



ЛАБОРАТОРНАЯ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СУШИЛКИ

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

Терентьев С.А., старший преподаватель; Шалунов А.В., д-р техн. наук, доцент, профессор; Хмелёв В.Н., д-р техн. наук, профессор; Нестеров В.А., канд. техн. наук, доцент; Голых Р.Н., канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. Трофимова, 27, Бийск, Российская Федерация, 659305

E-mail: sergey@bti.secna.ru, shalunov@bti.secna.ru, vnh@bti.secna.ru, nva@bti.secna.ru, grn@bti.secna.ru

Ключевые слова:
уровень звукового давления, сушка, диспергирование, ультразвуковая сушилка, кривая сушки

В статье рассматривается процесс конвективной сушки материалов на примере картофеля при температуре 60 °С. Для интенсификации сушки добавлялось бесконтактное ультразвуковое воздействие с различными уровнями звукового давления в диапазоне 130–175 дБ. Ультразвуковое воздействие 175 дБ позволило сократить время сушки картофеля на 57,1% по сравнению с конвективной сушкой. Начиная с уровня звукового давления 150 дБ, было отмечено скачкообразное изменение скорости сушки на начальном этапе (при высоком влагосодержании). Это позволило сделать предположение о том, что запускается механизм обезвоживания материала без фазового перехода, то есть за счет диспергирования влаги с поверхности высушиваемого материала. Для подтверждения механизма диспергирования было проведено улавливание капель воды на предметное стекло с иммерсионной жидкостью. При этом отмечалось, что с уменьшением влагосодержания материала также уменьшалось количество диспергированных капель. Оптимальным уровнем звукового давления с точки зрения сокращения времени сушки и потребляемой энергии является диапазон 160–165 дБ. Для увеличения массы одновременно высушиваемого материала были предложены две конструкции сушильных установок барабанного типа. Ультразвуковая сушка (160–165 дБ) картофеля в виде кубиков в предложенных установках осуществлялась на 45–47% быстрее, чем при конвективной сушке.

Введение

Во многих отраслях промышленности сушка является энергоемким и длительным процессом. Поэтому разработка новых технологий и аппаратов, позволяющих снизить энергетические затраты и уменьшить время сушки, является актуальной задачей. Ученными исследователями ведутся активные поиски по интенсификации процесса сушки различных материалов. При этом остро стоит вопрос по ограничению максимальной температуры процесса, для сохранения свойств высушиваемого материала [1-5]. Перспективным путём снижения температуры при одновременном повышении скорости сушки считается совместное тепловое и акустическое воздействие [6-9].

Наложение акустических колебаний совместно с конвективной сушкой позволяет уменьшить время сушки за счет следующих физических механизмов: акустических



потоков рэлеевского типа, микропотоков около препятствий, механического воздействия или «эффекта губки», термического действия, изменения давления у поверхности и т. п. [10].

Перечисленные механизмы проявляются, начиная с определенного уровня звукового давления (не менее 130 дБ) [10]. В случае колебаний с более низким уровнем звукового давления процесс сушки практически не отличается от конвективной сушки. В свою очередь оптимальная частота воздействия определяется характеристиками материала, структурой его микропор, размером отдельных частиц. В последние годы предпочтение отдается ультразвуковому диапазону частот (от 20 до 35 кГц), поскольку это более безопасно для человека (по сравнению с акустическими колебаниями слышимого диапазона).

Ультразвуковое воздействие на высушиваемый материал может быть контактным (УЗ-излучатель – высушиваемый материал) или бесконтактным (УЗ-излучатель – воздух – высушиваемый материал).

При контактном способе колеблющаяся поверхность ультразвукового излучателя непосредственно воздействует на высушиваемый материал, обеспечивая при плотном прилегании максимальную передачу акустической энергии. Исследователями показано уменьшение времени сушки при использовании контактного УЗ-воздействия совместно с конвективной сушкой по сравнению с конвективной сушкой: так в работе [11] на 63% при сушке грибов, в [12] – на 47,7% при сушке картофеля, в [2] на 80% при сушке моркови.

Однако, по мнению некоторых авторов [13], высокую эффективность можно отнести к значительному тепловому эффекту, создаваемому механическим трением между высушиваемым материалом и поверхностью излучателя, что часто является нежелательным результатом. При этом основным недостатком контактного ультразвукового воздействия является необходимость использования большой суммарной площади УЗ-излучателя для введения УЗ-энергии непосредственно в материал. В свою очередь высушиваемый материал тоже должен иметь максимальную площадь соприкосновения с излучателем. При реализации процесса сушки в промышленных масштабах это технически не реализуемо.

Приведенные недостатки обуславливают необходимость использования ультразвукового воздействия через промежуточную газовую среду. Из работ [2, 14] следует, что бесконтактное ультразвуковое воздействие интенсифицирует процесс сушки, при этом можно отметить, что результаты оказываются несколько хуже, чем при контактном воздействии. Причинами этого являются низкая эффективность ультразвуковых излучателей и отражение колебаний на границах «излучатель – воздух – высушиваемый материал».

Разработанные авторами эффективные излучатели в виде изгибно-колеблющихся пластин или дисков [15-17] позволяют сократить время сушки макаронных изделий на 24-26% [18], кипрей-чая и текстильных материалов на 30% [19-20]. Однако эти результаты были получены при уровне звукового воздействия не более 150 дБ. Практически не исследовался процесс ультразвуковой сушки до 175 дБ, также различные авторы



произвольно выбирали высушиваемый материал и его размеры, что не позволяет объективно сравнивать результаты.

Из закона Дальтона известно, что процесс испарения влаги со свободной поверхности в изотермических условиях:

$$\frac{dm}{d\tau} = KS \frac{P_0 - P_\infty}{P_6}, \quad (1)$$

где m – масса испарившейся жидкости; τ – время; K – коэффициент, учитывающий гидродинамические условия на поверхности; S – площадь поверхности испарения материала; P_0 – давление насыщенного пара на поверхности материала (при температуре поверхности); P_∞ – парциальное давление пара в окружающей среде; P_6 – барометрическое давление в окружающей среде.

Таким образом, уменьшение размеров материала, приводит к увеличению площади поверхности испарения, что в свою очередь будет увеличивать скорость сушки. Размеры высушиваемого материала выбирались кратными длине волны УЗ-воздействия в воздухе для обеспечения лучших условий проникновения колебаний в материал и возбуждений его колебаний на частоте УЗ-воздействия.

Основная часть

Исследования по ультразвуковой сушке совместно с конвективной сушкой проводились в сушильной установке SHINI SHD25, в которую был интегрирован УЗ-дисковый излучатель [21] (рис. 1).

Для определения уровня звукового давления на поддоне с высушиваемым материалом использовался измеритель шума Экофизика-110А/Инженер-110А. Измерения проводились на акустической оси излучателя и на расстоянии 70 мм от оси при разных уставках генератора (табл. 1).



Рис. 1. Внешний вид сушильной установки с УЗ-аппаратом

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

Расстояние от оси диска, мм	Уровень уставки электронного генератора от максимальной мощности, %						
	40	50	60	70	80	90	100
	Уровень звукового давления L , дБ						
0	132	141	152	162	166	171	176
70	128	140	149	159	164	168	174
Среднее значение	130	140,5	150,5	160,5	165	169,5	175

В качестве высушиваемого материала был выбран картофель как самый распространенный овощ в РФ. Во всех опытах масса картофеля была равна $(250 \pm 0,1)$ г, с размером кубиков $15 \times 15 \times 15 \pm 1$ мм. Температура сушильного агента $t = 60 \pm 1$ °С. Скорость сушильного агента – $(0,5 \pm 0,03)$ м/с. Влажность воздуха в помещении $(55 \pm 5)\%$.

Влагосодержание картофеля в процессе сушки определялось по формуле



$$w^0 = \frac{W}{G_c}, \quad (2)$$

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

Скорость сушки определялась методом численного дифференцирования:

$$\frac{dw^0}{d\tau} = -\frac{w_{i+1}^0 - w_i^0}{\tau_{i+1} - \tau_i}, \quad (3)$$

где w_i^0 – влагосодержание картофеля в момент времени τ_i ; w_{i+1}^0 – влагосодержание в момент времени τ_{i+1} .

Картофель взвешивали каждые 15 мин с точностью $\pm 0,1$ г. В процессе сушки масса картофеля уменьшалась в 4 раза, т.е. до достижения влагосодержания $(0,14 \pm 0,01)$ кг/кг.

Кривые сушки картофеля представлены на рис. 2.

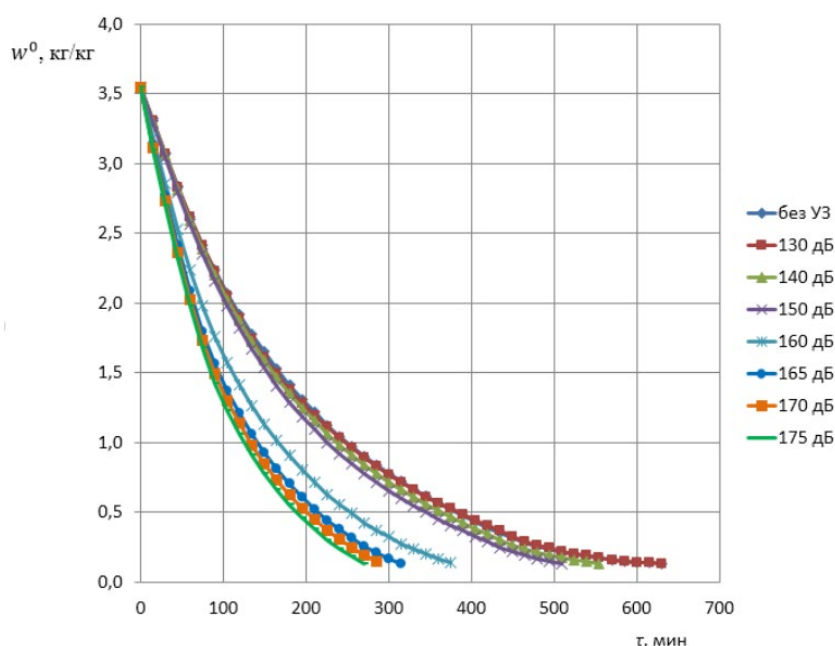


Рис. 2. Кривые сушки картофеля при различных уровнях звукового давления

Время сушки в контрольном (конвективная сушка) эксперименте составляло 630 мин. При совместном воздействии нагретым воздухом и УЗ-колебаниями 175 дБ было достигнуто сокращение времени сушки на 57,1%. (табл. 2).

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

	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	40,5	50	54,8	57,1

Эффективность сушки определялась по сокращению времени процесса относительно контрольного эксперимента. При уровне звукового давления 130 дБ прироста эффективности сушки не наблюдается. Это подтверждает, что ультразвуковое воздействие низкой интенсивности не дает эффекта. Дальнейший рост уровня звукового давления до



150 дБ приводит к пропорциональному сокращению времени сушки. При уровнях звукового давления выше 150 дБ наблюдается скачкообразное увеличение эффективности сушки.

На кривых скорости сушки до 150 дБ можно обнаружить постоянную скорость сушки (рис. 3). При уровнях 160 дБ и выше периода постоянной скорости сушки нет.

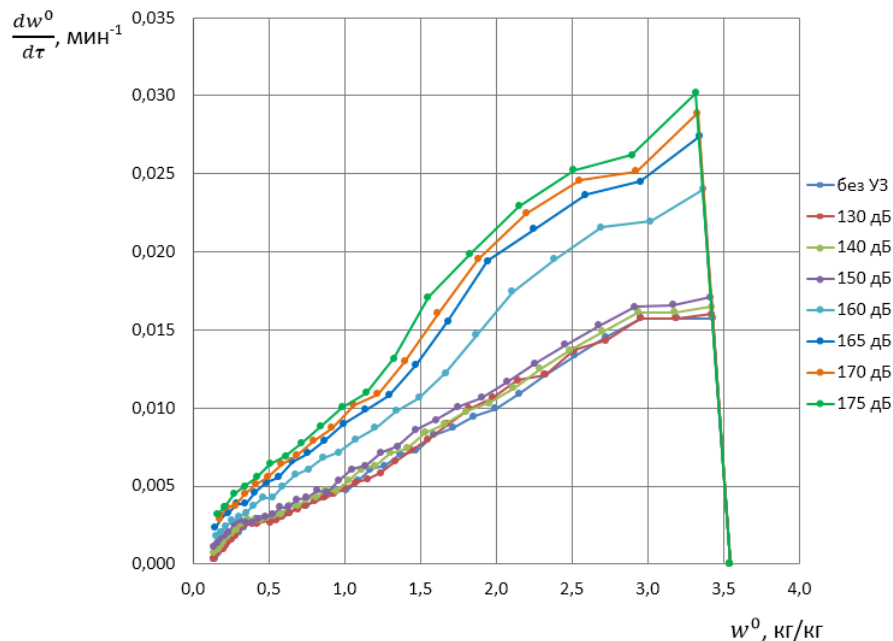


Рис. 3. Кривые скорости сушки картофеля при различных уровнях звукового давления

Для более детального анализа влияния уровня звукового давления на эффективность процесса, скорость сушки были усреднена для двух равных периодов высокого влагосодержания (влагосодержание больше среднего значения 1,78) и малого влагосодержания (<1,78). Полученные зависимости средней скорости сушки от уровня звукового давления представлены на рис. 4.

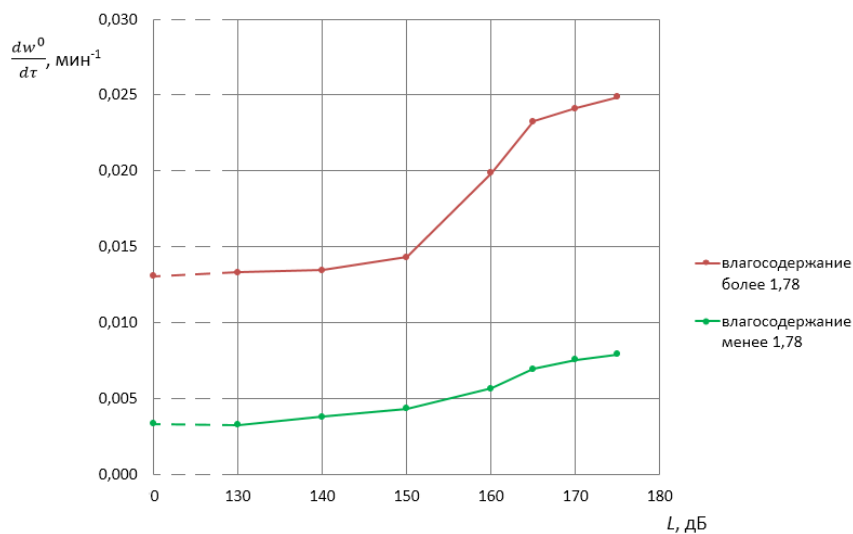


Рис. 4. Зависимость средней скорости сушки картофеля от уровня звукового давления при $t = 60$ °С



При высоком влагосодержании ($> 1,78$) в диапазоне 150–165 дБ ускорение сушки составляет $600 \cdot 10^{-6}$ (мин·дБ) $^{-1}$. При дальнейшем увеличении уровня звукового давления ускорение меньше и составляет $160 \cdot 10^{-6}$ (мин·дБ) $^{-1}$. Возрастание скорости сушки в диапазоне 150–165 дБ может быть вызвано диспергированием влаги с внешней поверхности материала.

Подтверждение механизма диспергирования осуществлялось следующим образом. Под сетчатым поддоном с высушиваемым материалом размещалось предметное стекло с иммерсионной жидкостью, в которую осаждались частицы диспергированной воды. Затем производилось фотографирование предметного стекла через микроскоп Микмед-6 (Ломо) с увеличением 400 крат (рис. 5). Процесс сушки проводился при уровне звукового давления 160 дБ.

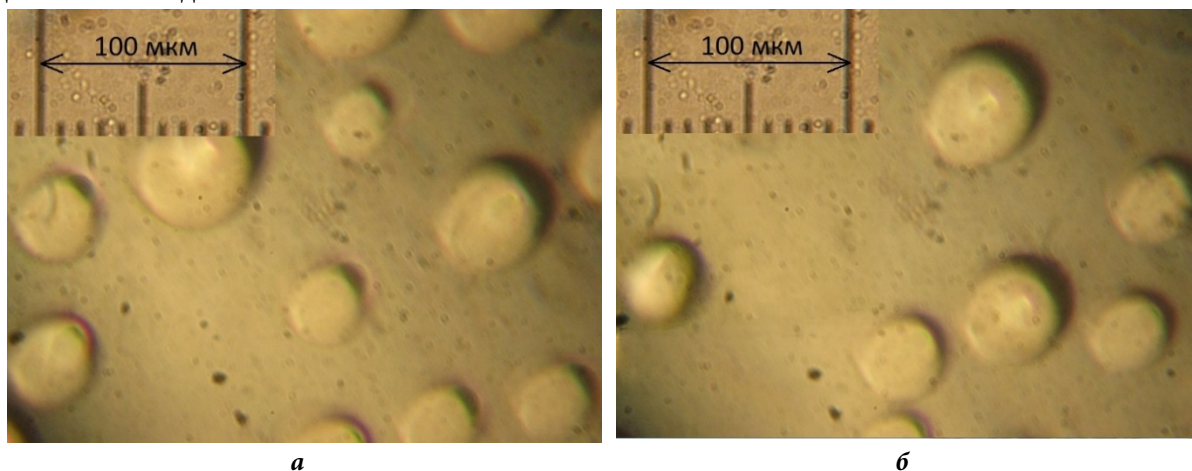


Рис. 5. Фотографии диспергированной жидкости при различных влагосодержаниях картофеля: а – 3,5 кг/кг; б – 2,2 кг/кг

При высоком влагосодержании, т.е. при наличии влаги на поверхности высушиваемого картофеля, происходит отделение капель и их осаждение на предметное стекло. С уменьшением влагосодержания происходит уменьшение количества капель. При влагосодержании менее 1 кг/кг капель не наблюдается.

При достаточно высокой температуре сушильного агента в дальнейшем происходит испарение диспергированных капель в объеме сушильной установки. Однако при комнатной температуре и достаточной скорости сушильного агента можно добиться уноса влаги в виде капель из установки, что снизит энергию, потребляемую сушильной установкой.

Пропорциональное увеличение уровня звукового давления сопровождается нелинейным ростом потребляемой электроэнергии ультразвуковым аппаратом. Для энергетически эффективного использования ультразвуковых колебаний в процессе сушки необходимо использовать бесконтактное ультразвуковое воздействие с уровнем 160–165 дБ.

Для полупромышленного применения ультразвуковой сушки совместно с конвективной были разработаны две сушилки барабанного типа.

Сушилка барабанного типа с горизонтальным барабаном состоит из цилиндрического корпуса 1 и цилиндрических поверхностей 2 и 3, расположенных соосно с корпусом. В каждой поверхности есть продольные отверстия 5 и лопасти 4, также лопасти



имеются и на внутренней части корпуса (рис. 6). Перед торцевой стенкой сушилки располагается ультразвуковой дисковый излучатель. Сушка осуществляется конвективным способом с ультразвуковым воздействием 160–165 дБ. При этом при вращении барабана происходит подхватывание высушиваемого материала 6 лопастями и его пересыпание из одного объема сушилки в другой через продольные отверстия. Тем самым сыпучий продукт всегда находится в тонких слоях, что обеспечивает эффективное воздействие сушильного агента и ультразвуковых колебаний.

Кривые скорости сушки картофеля представлены на рис. 7. Сушка проводилась при тех же параметрах сушильного агента, что и в лабораторной установке при уровне звукового давления 160–165 дБ. Масса картофеля составляла 6 кг.

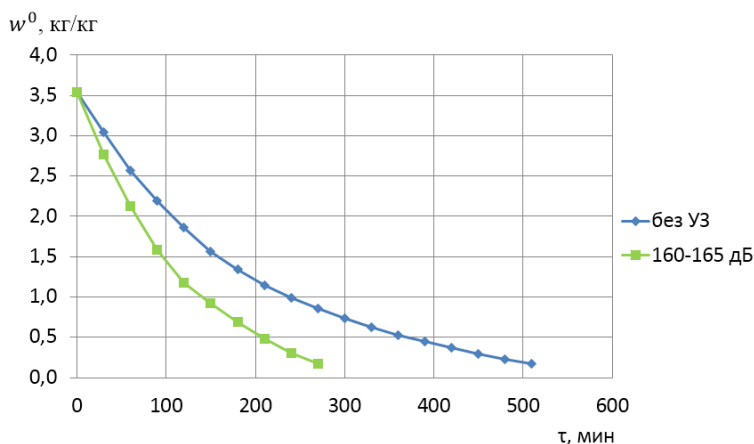


Рис. 7. Кривые сушки в сушилке горизонтального типа

Время конвективной сушки составило 510 мин, при дополнительном ультразвуковом воздействии – 270 мин.

Сушилка с барабаном вертикального типа (рис. 8) состоит из цилиндрического барабана 2 с диаметром D , внутри которого расположен спиральный лоток 3 с уменьшающимся внутренним диаметром к верхней части сушилки. Высушиваемый материал 1 перемещается снизу-вверх за счет подкручивания и вибрации барабана виброприводом 4, после чего продукт сыпается вниз по лотку 7. Ультразвуковой излучатель 5 воздействует на материал путем прямого действия (во время сыпания материала) или путем отражения от отражателей 6 и корпуса сушилки (при нахождении материала на спиральном лотке).

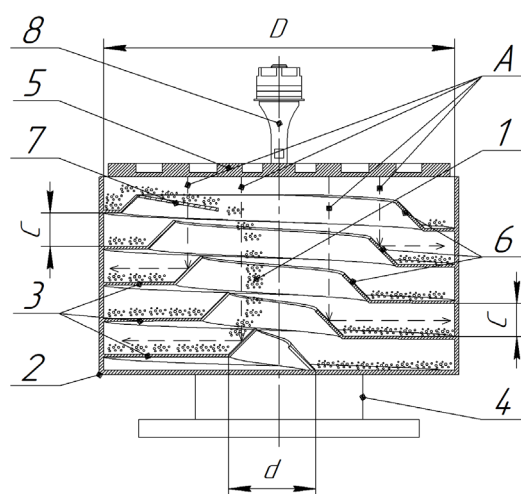


Рис. 8. Конструкция ультразвуковой барабанной сушилки вертикального типа



В процессе проведения сушки было получено время сушки конвективным способом 540 мин с добавлением ультразвукового воздействия – 300 мин (рис. 9). Масса картофеля составляла 6 кг.

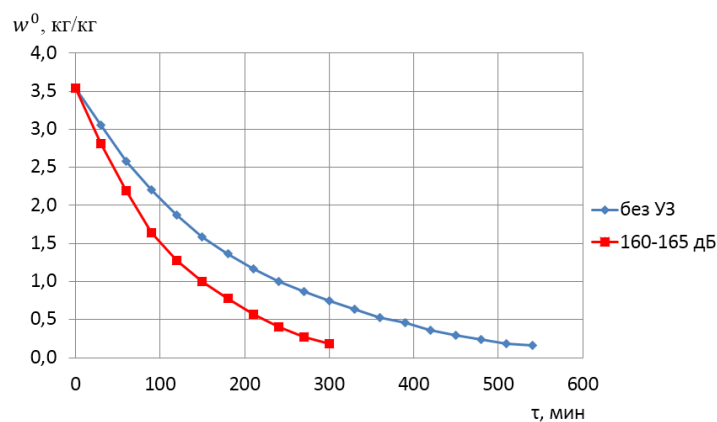


Рис. 9. Кривые сушки картофеля в вертикальном барабане

Разработанные сушилки барабанного типа позволили сократить время сушки на 44-47% по сравнению с конвективной сушкой.

Выводы

В результате проведенных исследований показана эффективность применения ультразвукового бесконтактного воздействия для интенсификации процесса сушки материалов на примере картофеля. При этом установлено, что:

максимальное сокращение времени процесса сушки составляет 57,1% при уровне звукового давления 175 дБ;

оптимальный эффект ультразвукового воздействия на процесс сушки материалов в неподвижном тонком слое достигается при уровне звукового воздействия в пределах 160–165 дБ;

для практической реализации ультразвуковой сушки в условиях выявленных оптимальных уровней ультразвукового давления предложены и разработаны конструкции сушильных установок, реализующих непрерывное перемещение (пересыпание) высушиваемого материала в горизонтальном и вертикальном барабанах;

происходит сокращение времени сушки в разработанных сушилках на 44–47% по сравнению с конвективной сушкой;

Это обуславливает перспективы использования ультразвукового воздействия для сушки термолабильных материалов.

Литература

1. Верболоз Е.И., Иванова М.А., Демченко В.А., Фартуков С., Евона Н.К. Исследование процесса сушки шиповника в поле действия ультразвука. *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50, № 1. С. 79–86.
2. Gallego-Juarez J. A., Riera E., Blanco S. D. F., Rodriguez-Corral G., Acosta-Aparicio V. M., Blanco A. Application of High-Power Ultrasound for Dehydration of Vegetable: Processes and Devices. *Drying Technology*. 2007. Vol. 25(11). P. 1893–1901. DOI: 10.1080/07373930701677371
3. Fairbank H.V. Applying ultrasound to continuous drying process. *Ultrasonic International 1975 Conference Proceedings*. Guildford, UK: IPC Science and Technology Press Ltd, 1975. P. 43-45.



4. Szadzińska J., Mierzwa D., Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technology*. 2020. Vol. 38. Iss. 1-2. P. 93–107. URL: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1624565>
5. Kowalski S. J. Ultrasound in wet materials subjected to drying: A modeling study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 84. May. P. 998–1007. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.086>
6. Baslar M., Toker O.S., Karasu S., Tekin Z.H., Yildirim B.H. Ultrasonic applications for food dehydration. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. 2016. P. 1247–1270. DOI:10.1007/978-981-287-470-2_64-1
7. Gallego-Juárez J.A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010. Vol. 17. N 6. P. 953–964. DOI:10.1016/j.ultsonch.2009.11.006
8. Bantle M., Eikevik T.M. A study of the energy efficiency of convective drying systems assisted by ultrasound in the production of clipfish. *J. Clean. Prod.* 2014. Vol. 65. P. 217–223. DOI:10.1016/j.jclepro.2013.07.016
9. Beck S.M., Sabarez H., Gaukel V., Knoerzer K. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – a response surface approach. *Ultrason. Sonochem.* 2014. Vol. 21. N 6. P. 2144–2150. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.02.013>
10. Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 кн. / АН СССР. Акустический ин-т. Москва: Наука, 1967-1970.
11. Rieara E., Gallego-Juarez J.A., Corral G.R., Aparicio V. M.A., Gallego E.A. Application of high-power ultrasound for drying vegetables. 2002. Oct. P. 143-148. URL: https://www.researchgate.net/publication/39397817_Application_of_high-power_ultrasound_for_drying_vegetables
12. Liu Y., Sun Y., Yu H., Yin Y., Li X., Duan X. Hot Air Drying of Purple-Fleshed Sweet Potato with Contact Ultrasound Assistance. *Drying Technol.* 2017. Vol. 35. N 5. P. 564–576. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1193867>
13. Schössler K., Jäger H., Knorr D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper *J. Food Eng.* 2012. Vol. 108. N 1. P. 103–110. DOI:10.1016/j.ifset.2012.05.010
14. Gallego-Juarez J.A., Rodriguez-Corra G., Galvez-Moraleda J.C., Yang T.S. A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*. 1999. Vol. 17(3). P. 597–608. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07373939908917555>
15. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power. *Ultrasonics*. 2021. Vol. 114. 106413
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Ultrasonic transducer with increased exposure power and frequency up to 100 kHz. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2021. Vol. 68, Iss. 5. P. 1773-1782. DOI:10.1109/TUFFC.2020.3029159
17. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Abramenko D.S., Lebedev A.N. Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2011. Vol. 12. N 4. P. 247–354. DOI:10.1631/jzus.A1000155
18. Верболоз Е.И., Николук 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.
19. 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*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. С. 332–335.
20. Марущак А.С., Жерносек С.В., Ольшанский В.И. Влияние акустических колебаний ультразвукового диапазона на прочностные свойства текстильных материалов в процессах сушки. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2019. № 2 (37), С. 44–51.
21. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Нестеров В.А., Тертишников П.П., Цыганок С.Н. Патент на ПИМ RU 195247 U1. 2020.

Поступила в редакцию 04.05.2021

Принята к опубликованию 08.06.2021