

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ БЕСКОНТАКТНАЯ СУШКА ТЕКСТИЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ*

ULTRASONIC NON-CONTACT DRYING OF FIBROUS TEXTILE MATERIALS

В.Н. ХМЕЛЕВ, А.В. ШАЛУНОВ, С.А. ТЕРЕНТЬЕВ, В.А. НЕСТЕРОВ

V.N. KHMELEV, A.V. SHALUNOV, S.A. TERENTIEV, V.A. NESTEROV

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

(Biysk Technological Institute (branch of the
«Altai state technical university named after I.I. Polzunov»))

E-mail: sergey@bti.secna.ru

В процессе производства сырья для текстильных материалов сушка является обязательным процессом получения легкого и качественного продукта. Для интенсификации процесса сушки предлагается дополнительно к конвективной сушке воздействовать на волокнистые материалы ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. Размещение материала тонкими слоями (не более 15 мм) позволяет уменьшить время сушки в 2 раза по сравнению только с конвективной сушкой и при этом получить сокращение потребляемой электроэнергии в 1,8 раза. Выявлено, что снижение температуры сушильного агента позволяет повысить относительный вклад ультразвуковых колебаний в ускорение процесса сушки.

In the production of textile materials, drying is an indispensable process for obtaining a light and high-quality product. It is proposed to influence fibrous materials with high-intensity ultrasonic vibrations in addition to convective drying to intensify the drying process. Placing the material in thin layers (no more than 15 mm) makes it possible to reduce the drying time by 2 times compared to only convective drying and at the same time obtain a 1.8-fold reduction in electricity consumption. It was also found that lowering the temperature of the drying agent makes it possible to increase the relative contribution of ultrasonic vibrations to the acceleration of the drying process.

Ключевые слова: волокнистые материалы, ультразвуковое воздействие, конвективная сушка, уровень звукового давления, ультразвуковой аппарат.

Keywords: fibrous materials, ultrasonic treatment, convective drying, sound pressure level, ultrasonic apparatus.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10359, <https://rscf.ru/project/21-79-10359/>

Введение

Текстильные волокнистые материалы имеют широкий спектр бытового и промышленного назначения. Они являются основой большинства материалов и изделий текстильной промышленности [1]. Основой таких материалов во многих случаях является целлюлоза, от свойств которой напрямую зависят свойства получаемых материалов [2]. Целлюлоза в процессе подготовки ее для дальнейшего использования подвергается увлажнению и сушке. Сушка целлюлозы является энергоемким процессом. Поэтому снижение энергетических затрат на процесс сушки является актуальной задачей. Акустическое и, как частный случай, ультразвуковое (УЗ) воздействие применяется при сушке овощей и фруктов [3-6]. Однако исследований по ультразвуковой сушке текстильных материалов значительно меньше [7, 8]. Основной проблемой для развития технологии ультразвуковой сушки является отсутствие как высокоэффективных ультразвуковых излучателей, создающих уровни звукового давления более 150 дБ, так и рекомендаций по размещению и температурному воздействию на волокнистые материалы.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели и обеспечения максимального количества акустической энергии, излучаемой в газовую среду, авторами разработан и изготовлен пьезоэлектрический УЗ излучатель. Излучатель имеет форму диска ступенчато-переменного сечения и преобразует продольные колебания пьезопреобразователя в изгибные колебания диска на модах ультразвуковой частоты, кратных основной. Это обеспечивает вывод в газовую среду акустической энергии более 50 % потребляемой электрической мощности [9].

Конструктивная схема ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) представлена на рис. 1.

Высоковольтный электрический сигнал ультразвуковой частоты подается через электроды 4 на пьезокерамические дисковые элементы 2, которые преобразуют ее в механические колебания. Акустическая связь внутри ультразвуковой колебатель-

ной системы обеспечивается за счет того, что пьезокерамические преобразователи механически сжаты между частотно-понижающей накладкой 1 и отражающей накладкой 3 с силой, многократно превышающей величину знакопеременной силы, создаваемой пьезокерамическими преобразователями. Волновод 6 обеспечивает передачу колебаний на концентратор 7, где они усиливаются и передаются на дисковый излучатель 8. Стягивающее усилие обеспечивается шпильками 5.

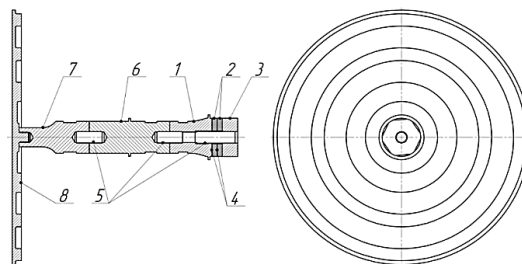


Рис. 1

Для питания ультразвукового преобразователя с дисковым излучателем используется электронный генератор, который преобразует энергию электрической промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты. Представленный генератор имеет схему с независимым возбуждением и способен автоматически подстраивать частоту выходного электрического сигнала в соответствии с резонансной частотой колебательной системы [9]. Фотография ультразвукового аппарата (излучателя в сборе с электронным генератором) представлена на рис. 2.



Рис. 2

В табл. 1 приведены технические характеристики УЗ аппарата.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Максимальная потребляемая мощность, ВА, не более	300
Частота механических колебаний излучателя, кГц	22±1,65
Максимальный уровень звукового давления (в пределах 1 м), дБ, не менее	150
Габаритные размеры электронного блока управления, мм	400x280x110
Диаметр излучающей поверхности, мм	250

Для эффективного использования УЗ колебаний, формируемых дисковым излучателем, форма сушильной камеры выбрана цилиндрической с внутренним диаметром 325 мм. Структурная схема УЗ цилиндрической камерной сушилки представлена на рис. 3.

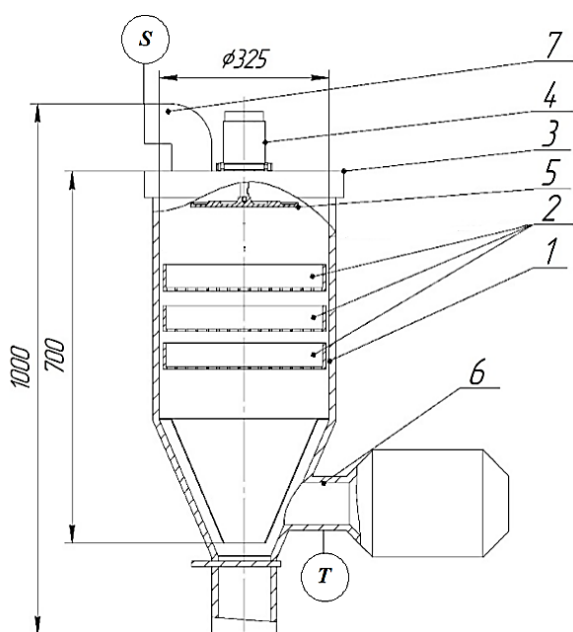


Рис. 3

В крышку 3 сушильной камеры 1 установлена ультразвуковая колебательная система 4 с дисковым излучателем 5, который формирует ультразвуковые колебания, направленные параллельно оси сушилки. В камере обеспечивается создание стоячих акустических волн. Через входной патрубок 6 поступает, а через выходной патрубок 7 отводится поток теплого воздуха, т. е. движение воздуха осуществляется параллельно оси цилиндрической камерной сушилки. На поддонах 2 располагается высушиваемый материал.

Температура сушильного воздуха T в камерной сушилке может быть установлена в диапазоне 30-120 °С с точностью ± 1 °С. Скорость воздушного потока S может устанавливаться в диапазоне от 0,5 м/с до 1 м/с. Измерения скорости производились цифровым анемометром UT363S фирмы UNI-T.

Для определения оптимальных мест размещения высушиваемого материала было построено распределение формируемого уровня звукового давления в объеме сушильной камеры с шагом 100 мм от плоскости дискового излучателя на акустической оси и на расстояниях 75 мм и 130 мм от оси (рис. 4). Измерения производились с помощью измерителя шума и вибраций Экофизика-110А/Инженер-110А.

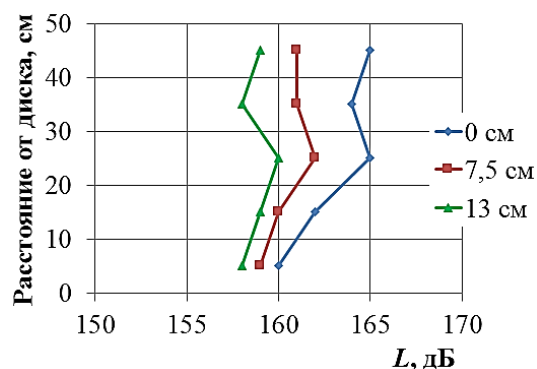


Рис. 4

В камерной сушилке можно выделить плоскую область с максимальным уровнем звукового давления на расстоянии 200-300 мм от УЗ дискового излучателя, где среднее значение составило 162 ± 3 дБ. Также существует область с минимальной интенсивностью на расстоянии 50-150 мм от излучателя. Поэтому для получения максимального эффекта от воздействия УЗ колебаний высушиваемый материал размещался на поддонах в выявленной области с

максимальным уровнем звукового давления. Схематично расположение высушиваемого материала на поддонах и распространение УЗ колебаний относительно высушиваемого материала показано на рис. 5.

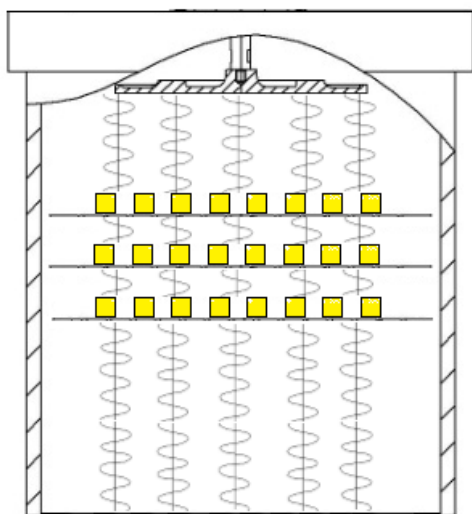


Рис. 5

Поддоны располагаются перпендикулярно акустической оси излучателя на расстоянии друг от друга, кратном половине длины волны. Фотография УЗ сушилки представлена на рис. 6.



Рис. 6

В качестве волокнистого материала выбрана целлюлоза. Выбор материала обусловлен широкой применимостью его в текстильной и других отраслях промышленности. Перед сушкой влагосодержание целлюлозы во всех экспериментах составляло 2,55 кг/кг.

Во всех проведенных исследованиях суммарная масса образцов составляла 500 ± 1 г, размеры образцов 10-15 мм. Средняя скорость сушильного агента в сушильной камере $0,5 \pm 0,1$ м/с. Относительная влажность воздуха в помещении 40 ± 3 %. Сушка осуществлялась до момента, когда влагосодержание материала достигало 0,07 кг/кг (равновесное влагосодержание). При этом влагосодержание W определялось весовым способом по формуле:

$$W = \frac{m_{ж}}{m_0},$$

где $m_{ж}$ – масса жидкости, m_0 – масса сухого материала.

Процесс взвешивания проводился через каждые 10 минут на электронных весах ПВ-6 (Россия) с точностью 0,5 г.

Результаты и обсуждения

Для проведения экспериментов выбраны две температуры сушильного агента 60 °С и 80 °С, поскольку при этих температурах не происходит ухудшения физико-химических свойств целлюлозы [10]. Полученные кривые сушки целлюлозы представлены на рис. 7.

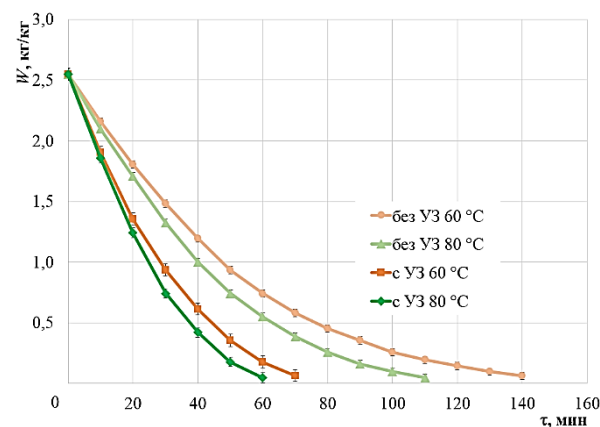


Рис. 7

Установлено, что при конвективной сушке с температурой 60 °С длительность сушки до влагосодержания 0,07 кг/кг составила 140 мин. Дополнительное УЗ воздействие уменьшило продолжительность сушки до 70 мин, т. е. в 2,0 раза. При температуре воздуха 80 °С без УЗ воздействия

длительность сушки составила 110 мин. Добавление ультразвукового воздействия сократило длительность сушки до 60 мин, т. е. в 1,8 раза. Вклад УЗ воздействия становится более существенным при снижении температуры сушильного агента.

Для сравнения энергетической эффективности сушки с применением ультразвукового воздействия по сравнению только с конвективной были проведены измерения потребляемой электроэнергии при температуре 60 °С.

Для осуществления конвективной сушки при температуре 60 °С нагреватель и вентилятор обеспечивают работу камерной сушилки при потребляемой средней мощности в 1,42 кВт. На весь процесс конвективной сушки без УЗ воздействия потрачено 3,31 кВт*ч электрической энергии. Средняя мощность, потребляемая УЗ аппаратом, составила 0,15 кВт, а за 70 мин УЗ сушки затрачено 0,18 кВт*ч. Суммарно израсходованная электроэнергия (конвективная + УЗ) – 1,83 кВт*ч, что в 1,8 раза меньше, чем при конвективной сушке без УЗ воздействия.

Заключение

В результате сушки волокнистых материалов установлено, что применение ультразвукового воздействия является эффективным способом интенсификации процесса сушки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размещение высушиваемого материала в виде тонких слоев позволяет сократить время процесса в 1,8-2 раза в зависимости от температуры.

Кроме того, проведенные исследования позволили показать, что повышение температуры сушильного агента приводит к уменьшению величины относительного сокращения времени сушки, достигаемого за счет ультразвукового воздействия. Так, при температуре сушильного агента 60 °С время сушки сократилось в 2 раза, а при увеличении температуры до 80 °С ультразвук обеспечил сокращение в 1,8 раза.

Оценка энергетической эффективности показала, что применение УЗ воздействия приводит к уменьшению затраченной на сушку электроэнергии в 1,8 раза по сравнению только с конвективной сушкой при

температуре 60 °С. Это делает ультразвуковой способ сушки текстильных волокнистых материалов эффективным для промышленного применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Морыганов А.П.* Отечественное целлюлозное волокно – перспективное сырье для российской текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 44...49.
2. *Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А.* Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесной вестник. 2019. Т.23. № 5. С. 116...125.
3. *Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А., Голых Р.Н.* Обезвоживание пищевых продуктов под действием ультразвуковых колебаний с удалением влаги без фазового перехода // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51 (2). С. 363...373.
4. *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. P. 564...576.
5. *Musielak G., Mierzwa D., Kroehnke J.* Food Drying Enhancement by Ultrasound – A Review // Trends Food Sci. Technol. 2016. Vol. 56. P. 126...141.
6. *Onwude D. I., Hashim N., Janius R.* Non-Thermal Hybrid Drying of Fruits and Vegetables: A Review of Current Technologies // Food Sci. Emerg. Technol. 2017. Vol. 43. P. 223...238.
7. *Khmelev V.N., Shalunov A.V., Terentiev S.A., Bochenkov A.S., Nesterov V.A., Tertishnikov P.P.* Research of the influence of ultrasonic oscillation on the drying of textile materials // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020, № 1679. 022027.
8. *Peng C., Ravi S., Patel V.K., Momen A.M., Moghaddam S.* Physics of direct-contact ultrasonic cloth drying process // Energy. 2017, 125. P. 498...508.
9. *Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Шалунова К.В.* Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах // Химическая техника. 2010. Т. 1. С. 23...28.
10. *Байжанова С.Б., Джанпаизова В.М., Сагитова Г.Ф., Батиркулова А.А.* Исследования влияния фотодеструкции на эксплуатационные свойства материалов для спецодежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 1 (355). С. 21...24.

REFERENCES

1. *Moryganov A.P.* Domestic cellulose fibres – perspective raw material for the russian textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. № 4 (376). P. 44...49.

2. Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. Cellulose and nanocellulose. Obzor // Forestry Bulletin, 2019, vol. 23, № 5, pp. 116–125. In Rus.

3. Shalunov A.V., Khmelev V.N., Terentiev S.A., Nesterov V.A., Golykh R.N. Ultrasonic Dehydration of Food Products with Moisture Removal without Phase Transition // Food Processing: Techniques and Technology. 2021. Vol. 51 (2). P. 363...373.

4. 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. P. 564...576.

5. Musielak G., Mierzwa D., Kroehnke J. Food Drying Enhancement by Ultrasound – A Review // Trends Food Sci. Technol. 2016. Vol. 56. P. 126...141.

6. Onwude D. I., Hashim N., Janius R. Non-Thermal Hybrid Drying of Fruits and Vegetables: A Review of Current Technologies // Food Sci. Emerg. Technol. 2017. Vol. 43. P. 223...238.

7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Terentiev S.A., Bochenkov A.S., Nesterov V.A., Tertishnikov P.P. Research of the influence of ultrasonic oscillation on the

drying of textile materials // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. № 1679. 022027.

8. Peng C., Ravi S., Patel V.K., Momen A.M., Moghaddam S. Physics of direct-contact ultrasonic cloth drying process // Energy. 2017, 125. P. 498...508.

9. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsiganok S.N., Barsukov R.V., Shalunova K.V. The use of ultrasonic vibrations of high intensity for the intensification of processes in gaseous media // Khimicheskaya tekhnika. 2010. T. 1. C. 23...28.

10. Baizhanova S.B., Janpaizova V.M., Sagitova G.F., Batirkulova A.A. Study on the influence photodestruction operational properties of materials for clothing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2015. № 1 (355). P. 21...24.

Рекомендована кафедрой методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ. Поступила 30.03.23.