

УДК 66.047.76  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4164

## Повышение эффективности сушки целлюлозы ультразвуковым воздействием

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев✉, В.А. Нестеров

*Алтайский государственный технический университет, Россия, г. Бийск*

✉ sergey@bti.secna.ru

### Аннотация

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что существенная часть возобновляемых и ископаемых энергоресурсов расходуется на выработку тепла и электроэнергии, необходимых для реализации процесса сушки. При этом сушка целлюлозы в силу многотоннажности производств является одним из существенных потребителей энергоресурсов. Одним из способов снижения энергетических затрат на процесс сушки является воздействие ультразвуковыми колебаниями. Практически отсутствуют исследования по ультразвуковому воздействию во время сушки целлюлозы. Поэтому необходимо рассмотреть возможные варианты бесконтактного ультразвукового воздействия при конвективной сушке древесной целлюлозы. **Цель:** выявление наиболее рациональных вариантов размещения высушиваемого материала с учетом направления воздействия ультразвуковых колебаний и потока теплого воздуха относительно слоев высушиваемого материала при различных температурах. **Объекты:** процесс бесконтактного ультразвукового воздействия на древесную целлюлозу. **Методы.** Для определения распределения амплитуд колебаний дискового излучателя использовалось математическое моделирование на основе метода конечных элементов. В экспериментальной части исследований влагосодержание материала определялось весовым методом с использованием поверенных технических средств. **Результаты.** При параллельном направлении ультразвуковых колебаний относительно тонких слоев целлюлозы показано сокращение времени сушки в 2,5 раза при уровне звукового давления  $162 \pm 3$  дБ и температуре сушильного агента  $60$  °С. Выявлено, что снижение температуры сушильного агента позволяет повысить относительную эффективность ультразвукового воздействия. Оценка энергетической эффективности показала, что применение ультразвукового воздействия приводит к уменьшению затраченной на сушку электроэнергии в 2,3 раза по сравнению только с конвективной сушкой при прочих равных условиях. Проведенные исследования подтвердили эффективность ультразвукового способа сушки для промышленного применения и позволили рекомендовать варианты наиболее рационального размещения высушиваемого материала при проектировании конструкций сушильных камер.

**Ключевые слова:** сушка, целлюлоза, ультразвук, дисковый излучатель, уровень звукового давления.

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

**Для цитирования:** Повышение эффективности сушки целлюлозы ультразвуковым воздействием / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.А. Терентьев, В.А. Нестеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 167–176. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4164

---

UDC 66.047.76  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4164

## Increasing the efficiency of drying cellulose by ultrasonic influence

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, S.A. Terentiev✉, V.A. Nesterov

*Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation*

✉ sergey@bti.secna.ru

## Abstract

**Relevance.** Significant part of renewable and fossil energy resources is spent to generate heat and electricity needed to implement drying. At the same time, cellulose drying, due to the large-tonnage production, is one of the significant consumers of energy resources. One of the ways to reduce energy costs of drying is ultrasonic vibrations impact. There are practically no studies on ultrasonic exposure during cellulose drying. Therefore, it is necessary to consider possible options for non-contact ultrasonic treatment during convective drying of wood cellulose. **Aim.** To identify the most rational options for placing the material to be dried, taking into account the direction of exposure to ultrasonic vibrations and the flow of warm air relative to the layers of the material to be dried at different temperatures. **Objects.** Non-contact ultrasonic action on wood cellulose. **Methods.** Mathematical modeling based on the finite element method was used to determine the distribution of oscillation amplitudes of a disk radiator. In the experimental part of the research, a material moisture content was determined by the weight method using verified technical means. **Results.** When ultrasonic vibrations have parallel direction relative to cellulose thin layers, a 2.5-fold reduction in drying time was shown at a sound pressure level of  $162 \pm 3$  dB and a drying agent temperature of  $60^\circ\text{C}$ . The authors have found that temperature decrease of a drying agent makes it possible to increase the relative efficiency of ultrasonic treatment. An assessment of energy efficiency showed that the use of ultrasonic exposure leads to a 2.3-fold decrease in the energy spent on drying compared to only convective drying, all other things being equal. The conducted studies confirmed the effectiveness of the ultrasonic drying method for industrial use and made it possible to recommend options for the most rational placement of the material to be dried when designing the structures of drying chambers.

**Keywords:** drying, cellulose, ultrasonic, disc transducer, sound pressure level.

**Acknowledgements:** The study was supported by a grant from Russian Science Foundation No. 21-79-10359, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10359/>

**For citation:** Khmelev V.N., Shalunov A.V., Terentiev S.A., Nesterov V.A. Increasing the efficiency of drying cellulose by ultrasonic influence. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 167–176. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4164

## Введение

Сушка различных материалов является ключевым и самым энергозатратным процессом во многих отраслях промышленности. По данным Министерства энергетики РФ до 8 % всех добываемых в стране (ископаемых и возобновляемых) энергоресурсов расходуется на реализацию процессов сушки в различных отраслях промышленного производства. И, согласно приводимым прогнозам, затраты энергетических ресурсов на сушку будут только возрастать.

Среди наиболее энергозатратных видов продукции, производимых промышленностью, можно выделить целлюлозу. Целлюлоза является ценным сырьем, широко используемым в производстве бумаги и химической промышленности. В мире ежегодно производится более 400 млн т бумаги, что влечет за собой удаление более 530 млн т воды. Фактически изготовление бумаги – это масштабная операция по обезвоживанию. И хотя сушка удаляет меньшее количество воды в абсолютном выражении, она по-прежнему остается наиболее дорогостоящим и энергоемким этапом производства бумаги. Кроме того, применение химически модифицированной целлюлозы в качестве сырья для химической промышленности (в частности, при производстве искусственных волокон, пластмасс, пленок, лакокрасочных материалов, бездымного пороха, взрывчатки, твердых ракетных топлив) обуславливает повышенные требования к качеству целлюлозы, в том числе и

проведению процесса сушки. Все это обуславливает важность поиска новых энергоэффективных способов сушки целлюлозы для снижения энергозатрат и уменьшения выбросов  $\text{CO}_2$ , образуемого при выработке энергии на реализацию процесса сушки.

В этой связи большой потенциал имеют нетрадиционные способы интенсификации процесса сушки, например, воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями. Одними из первых работ по УЗ-сушке материалов являются исследования R.M.G. Boucher и P. Greguss [1, 2]. На сегодняшний день различными исследователями показано, что УЗ воздействие на высушиваемый материал позволяет:

- сократить продолжительность сушки [3–6];
- не оказывать значительного теплового воздействия [7];
- уменьшить потребляемую энергию [8];
- сохранить характеристики высушиваемых материалов [9, 10].

Для практической реализации сушки применяется два основных способа УЗ-воздействия: контактное и бесконтактное.

При УЗ-контактном воздействии колеблющаяся поверхность ультразвукового излучателя непосредственно воздействует на высушиваемый материал, обеспечивая, при наличии акустического контакта (плотном прилегании), максимальную передачу в него акустической энергии. При таком воздействии достигается значительное сокращение продолжительности сушки, например: до 85 % при сушке

моркови [11] и даже до 96 % при сушке волокнистых материалов [12]. Однако сложность создания больших по площади колеблющихся поверхностей и значительное повышение температуры в высушиваемом материале являются препятствием для промышленного применения такого способа УЗ-сушки (особенно для горючих и взрывчатых материалов).

Бесконтактное УЗ-воздействие на высушиваемый материал осуществляется через слой воздуха и также может обеспечивать сокращение времени сушки, например, на 31 % при сушке моркови [13] на 57 % при сушке картофеля [14], по сравнению с конвективной сушкой. Несмотря на меньший достигаемый эффект по сокращению времени сушки, такое воздействие обладает рядом преимуществ: большая поверхность обработки, возможность перемешивать материал, возможность сушить химически агрессивные, горючие и взрывчатые материалы, возможность комбинированного совмещения с другими видами сушки.

Основная проблема реализации такой сушки связана со сложностью введения УЗ-энергии в высушиваемый материал. Для решения этой проблемы ведутся исследования по выявлению эффективности различных способов УЗ-воздействия на материал, т. е. ведется непрерывный поиск максимально эффективных условий введения в материал УЗ-колебаний.

Очевидно, что наиболее эффективным способом УЗ-воздействия является формирование в камере сушилки стоячей волны [15]. Для этого необходимо проектировать и создавать УЗ-сушилки с геометрическими размерами, кратными длине волны УЗ-колебаний в воздухе. Поскольку в режиме стоячей волны формируется стационарная картина акустического поля, возникает необходимость размещения в сушильной камере высушиваемого материала таким образом, чтобы он не нарушал резонансного усиления УЗ-колебаний.

Дальнейшие исследования направлены на выявление наиболее рациональных вариантов размещения высушиваемого материала.

### Материалы и методы

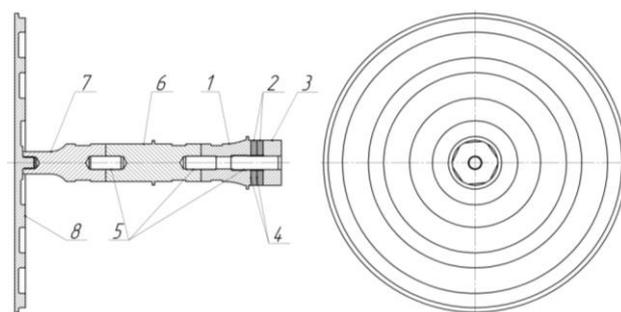
Поскольку для формирования поля УЗ-колебаний в сушильной камере возможно использование различных типов излучателей, рассмотрим применение одного из наиболее эффективных в настоящее время. Для достижения поставленной цели и обеспечения максимального количества акустической энергии, излучаемой в газовую среду, авторами разработан и изготовлен пьезоэлектрический УЗ-излучатель [16, 17]. Излучатель имеет форму диска ступенчато-переменного сечения и преобразует продольные колебания пьезопреобразователя в изгибные колебания диска на модах ультразвуковой частоты, кратных основной. Это обеспечивает КПД вывода в газовую среду акустиче-

ской энергии более 50 % относительно потребляемой электрической мощности [16].

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

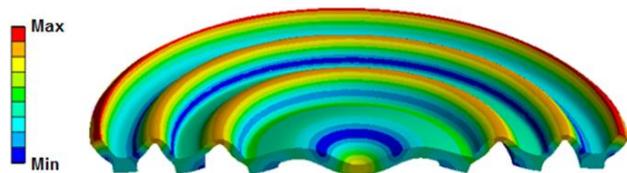
Высоковольтный электрический сигнал ультразвуковой частоты подается через электроды – 4 на пьезокерамические дисковые элементы – 2, которые преобразуют ее в механические колебания. Акустическая связь внутри ультразвуковой колебательной системы обеспечивается за счет того, что пьезокерамические преобразователи зажаты между частотопонижающей 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.

Расчеты распределения амплитуд колебаний дискового излучателя проводились с помощью модельного анализа в системе конечно-элементного моделирования ANSYS [18]. При проведении расчетов были использованы данные о материале (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Тип конечного элемента представлял собой тетраэдр, который позволяет аппроксимировать тела сложной формы. Размер элемента был выбран (4 мм) много меньшим длины волны УЗ-колебаний в материале излучателя и обеспечивал сходимость результатов моделирования (рис. 2).



**Рис. 1.** Конструктивная схема ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя с излучателем дисковой формы: 1 – частотопонижающая накладка; 2 – пьезокерамические преобразователи; 3 – отражающая накладка; 4 – электроды; 5 – шпильки; 6 – волновод; 7 – концентратор; 8 – дисковый излучатель

**Fig. 1.** Design circuit of an ultrasonic piezoelectric transducer with a disc-shaped emitter: 1 – frequency-reducing element; 2 – piezoceramic transducers; 3 – sound-reflecting nut; 4 – electrodes; 5 – studs; 6 – waveguide; 7 – concentrator; 8 – disk emitter



**Рис. 2.** Распределение амплитуд колебаний дискового излучателя

**Fig. 2.** Distribution of amplitudes of oscillations of the disk emitter

Поверхность дискового излучателя совершает изгибные колебания. Распределение и амплитуда колебательных смещений вдоль радиуса пластины имеют вид знакопеременных изгибных волн. Каждая точка диска излучает в воздушную среду ультразвуковые колебания. За счет формы диска максимумы колебательных смещений расположены от центра диска на расстоянии, равном длине волны изгибных колебаний в металле.

Для питания ультразвуковой преобразователя с дисковым излучателем используется электронный генератор. Электронный генератор преобразует энергию электрической промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты. Представленный генератор имеет схему независимого возбуждения и способен автоматически подстраивать частоту выходного электрического сигнала в соответствии с резонансной частотой колебательной системы [19].

Фотография ультразвукового аппарата (излучателя в сборе с электронным генератором) представлена на рис. 3.

В таблице приведены технические характеристики УЗ-аппарата.

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. 4.

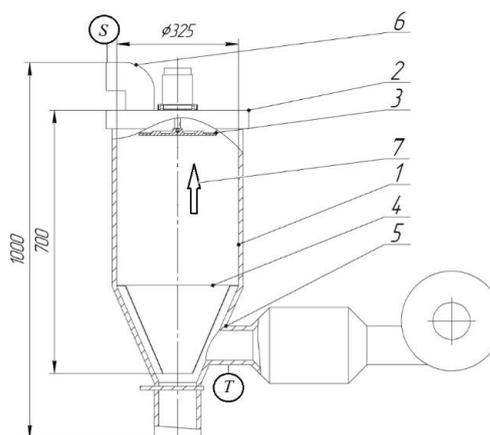
В крышку – 2 сушильной камеры – 1 установлен дисковый излучатель – 3, формирующий УЗ-колебания, направленные параллельно оси камерной сушилки.

С противоположной стороны сушилки располагается отражающий диск – 4. За счет регулировочного винта отражающий диск можно перемещать по оси сушильной камеры, тем самым обеспечивая создание стоячих акустических волн в сушильной камере. Через входной патрубок – 5 поступает, а через выходной патрубок – 6 отводится поток теплого воздуха – 7, т. е. движение воздуха осуществляется параллельно оси цилиндрической камерной сушилки.



**Рис. 3.** Фотография УЗ-аппарата для газовых сред

**Fig. 3.** Photo of an ultrasonic device for gas media



**Рис. 4.** Структурная схема ультразвуковой камерной сушилки

**Fig. 4.** Structural diagram of an ultrasonic chamber dryer

**Таблица.** Технические характеристики УЗ-аппарата  
**Table.** Technical characteristics of the ultrasonic device

Наименование параметра Parameter	Значение Magnitude
Напряжение питания переменного тока, В AC power supply voltage, V	220±22
Максимальная потребляемая мощность, не более ВА Maximum power consumption, no more than VA	300
Диапазон регулирования мощности, % Power control range, %	40/100
Частота механических колебаний излучателя, кГц Frequency of mechanical vibrations of the emitter, kHz	22±1,65
Максимальный уровень звукового давления (в пределах 1 м), дБ, не менее Maximum sound pressure level (within 1 m), dB, not less	150
Габаритные размеры электронного блока управления, мм Overall dimensions of an electronic control unit, mm	400×280×110
Габаритные размеры ультразвуковой колебательной системы, мм Overall dimensions of the ultrasonic oscillating system, mm	Ø250×270
Диаметр излучающей поверхности, мм Diameter of a radiating surface, mm	250
Система охлаждения/Cooling system	принудительная воздушная forced air



**Рис. 5.** Фотография УЗ камерной сушилки  
**Fig. 5.** Photo of the ultrasonic chamber dryer

Температура сушильного воздуха  $T$  в камерной сушилке может быть установлена в диапазоне 30...120 °С с точностью  $\pm 1$  °С. Скорость воздушно-го потока  $S$  может устанавливаться в диапазоне от 0,5 до 1 м/с. Измерения скорости производились цифровым анемометром UT363S фирмы UNI-T. Фотография внешнего вида УЗ-сушилки представлена на рис. 5.

Для определения оптимальных мест размещения высушиваемого материала было исследовано распределение формируемого уровня звукового давления в объеме сушильной камеры. Измерения проводились при помощи измерителя шума и вибраций Экофизика-110А/Инженер-110А. Шумомер использовался в режиме с автоматической передачей данных на компьютер. Для перемещения микрофона шумомера в объеме сушильной камеры использовался двухкоординатный привод, расположенный в нижней части сушильной камеры. Микрофон закреплялся на подвижной каретке при помощи подвеса, позволяющего регулировать высоту его расположения. При проведении измерений уровня звукового давления сушильная камера переворачивалась. Дисконный излучатель таким образом оказывался внизу, а микрофон устанавливался на подвесе в направлении диска.

Было установлено, что в центральном вертикальном сечении сушильной камеры по высоте камеры формируется стоячая волна с регулярным расположением максимумов колебаний. Средний

уровень звукового давления по объему камерной сушилки составил  $162 \pm 3$  дБ. В свою очередь, распределение уровней звукового давления в центральном горизонтальном сечении сушильной камеры также имеет регулярную картину, но в виде окружностей. Количество максимумов уровня звукового давления соответствует количеству полуволн дисконного изгибно-колеблющегося излучателя (рис. 2).

Таким образом, установлено, что структура акустического поля, формируемая в объеме сушильной камеры дисконным излучателем, имеет регулярную структуру как в продольном направлении (в направлении акустической оси излучателя), так и в поперечном (вдоль радиуса излучателя).

Это обуславливает два возможных способа размещения высушиваемого материала:

- 1) на круглых поддонах, располагаемых перпендикулярно направлению акустической оси излучателя и движению сушильного агента;
- 2) на прямоугольных поддонах в направлении, параллельном акустической оси излучателя и направлению воздушных потоков.

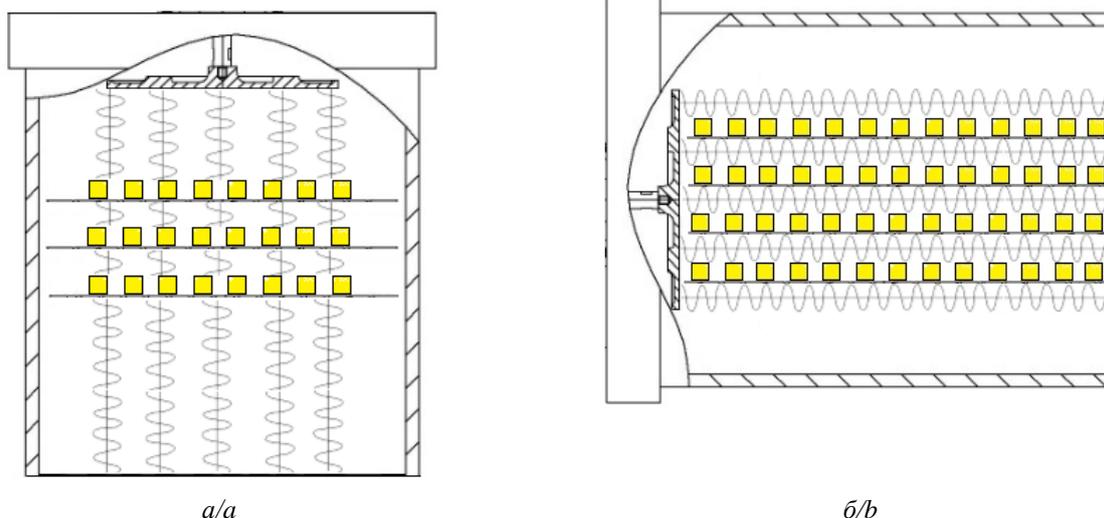
Схематично расположение высушиваемого материала на поддонах и распространение УЗ-колебаний относительно высушиваемого материала показано на рис. 6.

В случае, показанном на рис. 6, а, поддоны располагаются перпендикулярно акустической оси излучателя, в пучностях звукового давления, на расстоянии друг от друга, кратном половине длины волны. В свою очередь, поддоны на рис. 6, б располагаются параллельно друг другу на расстоянии, обеспечивающем размещение в условиях, соответствующих одинаковой фазе колебаний УЗ-излучателя. Такие условия позволяют сохранить равномерность распределения звуковых колебаний и воздушных потоков в сушильной камере.

Фотографии УЗ-сушилок с расположением поддонов перпендикулярно и параллельно направлению распространения УЗ-колебаний представлены на рис. 7.

Для проведения исследований по выявлению эффективности процессов сушки в качестве высушиваемого материала была выбрана древесная целлюлоза. Выбор материала обусловлен максимальной применимостью в химической промышленности, в частности при производстве порохов, в фармацевтической технологии при производстве наполнителей для таблеток и т. д. [20, 21].

Поскольку в реальных условиях, при производстве целлюлозы после мокрых пресспатов, ее влажность составляет 70...75 % (соответствует влагосодержанию 2,3...3,0 кг/кг), начальное влагосодержание целлюлозы во всех экспериментах было выбрано одинаковым и равным 2,55 кг/кг.



**Рис. 6.** Распространение УЗ-колебаний относительно высушиваемого материала: а) расположение перпендикулярно акустической оси излучателя; б) расположение параллельно акустической оси излучателя  
**Fig. 6.** Propagation of ultrasonic oscillations relative to the material to be dried: a) location perpendicular to the acoustic axis of the emitter; b) location parallel to the acoustic axis of the emitter



a/a



б/б

**Рис. 7.** Фотографии УЗ камерных сушилок с перпендикулярным (а) и параллельным (б) направлением распространения УЗ-колебаний относительно поддонов  
**Fig. 7.** Photographs of ultrasonic chamber dryers with perpendicular (a) and parallel (b) direction of propagation of ultrasonic oscillations relative to pallets

Во всех проведенных исследованиях суммарная масса образцов для исследований составляла  $500 \pm 1$  г, размеры образцов 10...15 мм, расстояние между образцами на одном поддоне не менее 10...15 мм. Коэффициент заполнения сушильной камеры не превышал 0,1. Такая загрузка обеспечивает формирование в объеме сушильной камеры равномерного акустического поля с уровнем звукового давления не менее 159 дБ и малое гидравлическое сопротивление потоку воздуха, проходящему между отдельными расположенными образцами высушиваемой целлюлозы в независимости от его направления.

Средняя скорость сушильного агента в сушильной камере поддерживалась в пределах  $0,5 \pm 0,1$  м/с.

Относительная влажность воздуха в помещении была  $40 \pm 3$  %.

Сушка осуществлялась до момента, когда влагосодержание материала достигало 0,07 кг/кг (равновесное влагосодержание). При этом влагосодержание 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.

Для проведения экспериментов были выбраны две температуры сушильного агента 60 и 80 °С, поскольку при температурах сушки целлюлозы выше 100 °С могут ухудшаться ее физико-химические свойства.

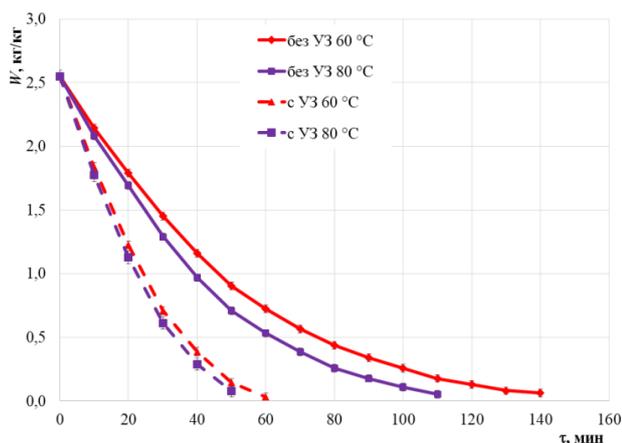
Для каждого варианта размещения (перпендикулярно либо параллельно направлению акустической оси излучателя) поддонов с высушиваемым материалом было проведено по две серии четырех типов экспериментов:

- 1) сушка при температуре 60 °С;
- 2) сушка при температуре 80 °С;
- 3) сушка при температуре 80 °С совместно с воздействием УЗ колебаниями;
- 4) сушка при температуре 60 °С совместно с воздействием УЗ колебаниями.

### Результаты исследования

Первая серия экспериментов по сушке целлюлозы проводилась при параллельном направлении акустической оси УЗ-излучателя и воздушного потока относительно расположения поддонов с высушиваемым материалом. Полученные кривые сушки целлюлозы представлены на рис. 8.

При температуре воздуха 60 °С продолжительность конвективной (тепловой) сушки до равновесного влагосодержания 0,07 кг/кг составила 140 мин. Осуществление УЗ воздействия позволило сократить продолжительность сушки до 55 мин, т. е. в 2,5 раза. При температуре 80 °С без УЗ-воздействия длительность сушки составила 110 мин. При неизменных параметрах сушки с реализацией дополнительно ультразвукового воздействия длительность сушки – 50 мин, т. е. время сушки уменьшилось в 2,2 раза.



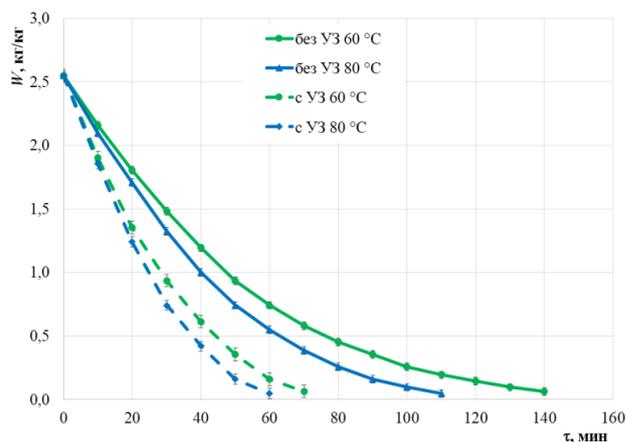
**Рис. 8.** Кривые сушки древесной целлюлозы при температурах 60 и 80 °С с параллельным направлением воздушного потока и УЗ-колебаниями относительно поддонов

**Fig. 8.** Drying curves of wood cellulose at 60 and 80°C with a parallel direction of air flow and ultrasonic oscillations relative to pallets

Таким образом, установлено, что ультразвуковое воздействие при параллельном направлении акустической оси УЗ излучателя и воздушного потока относительно расположения поддонов с высушиваемым материалом обеспечивает сокращение времени процесса сушки в 2,2...2,5 раза в зависимости от температуры сушильного агента. При этом повышение температуры сушильного агента приводит к уменьшению относительного сокращения времени сушки, достигаемого за счет УЗ воздействия.

Вторая серия экспериментов проводилась при перпендикулярном направлении воздушного потока и УЗ-колебаний относительно расположения поддонов с высушиваемым материалом при температурах 60 и 80 °С (рис. 9).

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.



**Рис. 9.** Кривые сушки древесной целлюлозы при температурах 60 и 80 °С с перпендикулярным направлением воздушного потока и УЗ-колебаниями относительно поддонов

**Fig. 9.** Wood cellulose drying curves at 60 and 80°C with perpendicular direction of air flow and ultrasonic oscillations relative to pallets

При температуре воздуха 80 °С без УЗ-воздействия длительность сушки составила 110 мин. Добавление УЗ-воздействия сократило длительность сушки до 60 мин, т. е. в 1,8 раза. Так же как и при параллельном направлении, вклад УЗ-воздействия становится менее существенным при снижении температуры сушильного агента.

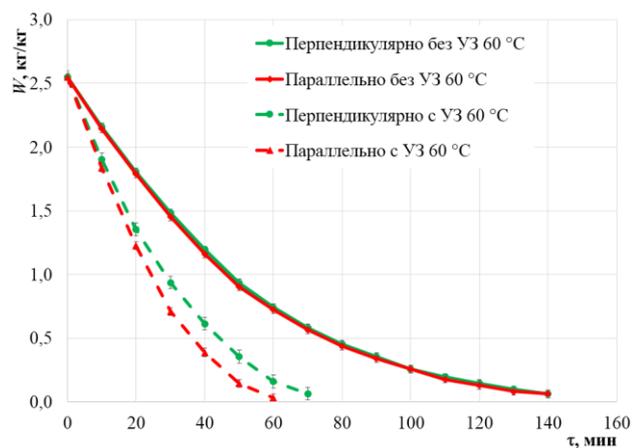
Для сравнения эффективности УЗ-воздействия при различном расположении высушиваемого материала на рис. 10 приведены кривые сушки при температуре 60 °С (т. е. для случаев, когда УЗ-

воздействие более эффективно) с параллельным и перпендикулярным направлением УЗ-воздействия относительно плоскости поддонов.

Из представленных зависимостей следует, что при конвективной сушке с параллельным и перпендикулярным расположением поддонов с высушиваемым материалом относительно направления движения воздушного потока время сушки оказывается одинаковым. Это свидетельствует о неизменности гидродинамических параметров сушки при различном расположении поддонов с высушиваемым материалом, которые обеспечивались низким коэффициентом заполнения (не более 0,1) сушильной камеры.

В свою очередь, при наличии УЗ-воздействия расположение поддонов относительно направления распространения ультразвуковых колебаний оказывает существенное влияние на продолжительность процесса сушки.

Так, для параллельного расположения поддонов время сушки оказывается на 27,2 % меньшим, чем при перпендикулярном.



**Рис. 10.** Кривые сушки древесной целлюлозы при температуре 60 °C при различных направлениях воздушного потока и УЗ-колебаний относительно поддонов

**Fig. 10.** Drying curves of wood cellulose at 60°C at different directions of air flow and ultrasonic oscillations relative to pallets

Вероятно, это происходит из-за поглощения части УЗ-энергии в слоях, находящихся рядом с дисковым излучателем.

Для сравнения энергетической эффективности совместной УЗ и конвективной сушки по сравнению только с конвективной были проведены измерения потребляемой электроэнергии при параллельном воздействии УЗ-колебаний относительно поддонов при температуре 60 °C.

Для обеспечения конвективной сушки с параллельным направлением потока воздуха относи-

тельно поддонов при температуре 60 °C нагреватель и вентилятор обеспечивают работу камерной сушилки при потребляемой средней мощности в 1,42 кВт. На весь процесс конвективной сушки без УЗ-воздействия было потрачено 3,31 кВт·ч электрической энергии. Средняя мощность, потребляемая УЗ-аппаратом, составила 0,15 кВт, а за 55 мин УЗ-сушки было затрачено 0,14 кВт·ч. Суммарно израсходованная электроэнергия (конвективная + УЗ) – 1,44 кВт·ч, что в 2,3 раза меньше, чем при конвективной сушке без УЗ-воздействия.

### Заключение

В результате проведенных исследований на примере сушки целлюлозы установлено, что применение УЗ-воздействия является эффективным способом интенсификации процесса сушки волокнистых материалов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размещение высушиваемого материала в виде тонких слоев позволяет сократить время процесса до 2...2,5 раз в зависимости от расположения материала относительно направления распространения ультразвуковых колебаний.

Выявлено, что при параллельном расположении поддонов с высушиваемым материалом время сушки целлюлозы сокращается в 2,5 раза по сравнению только с конвективной сушкой при температуре 60 °C, в то время как перпендикулярное слоям материала воздействие УЗ-колебаний обеспечивает уменьшение времени сушки только в 2,0 раза.

Кроме того, проведенные исследования показали, что при более высоких температурах сушильного агента влияние УЗ-воздействия на скорость сушки уменьшается.

Так, при температуре сушильного агента 60 °C сокращение времени сушки составляет 2...2,5 раза (в зависимости от взаимного расположения высушиваемого материала и направления УЗ-колебаний), а при увеличении температуры до 80 °C ультразвук обеспечил сокращение всего в 1,8...2,2 раза.

Оценка энергетической эффективности показала, что применение УЗ-воздействия приводит к уменьшению затраченной на сушку электроэнергии в 2,3 раза по сравнению только с конвективной сушкой при прочих равных условиях.

Следует отметить, что представленные результаты получены для высушиваемой целлюлозы массой 0,5 кг с низким коэффициентом заполнения сушильного объема. Дальнейшее повышение эффективности процесса сушки при больших значениях заполнения сушильной камеры возможно за счет создания ультразвуковых излучателей, частично или полностью нивелирующих эффект взаимного экранирования ультразвуковых колебаний слоями высушиваемого материала. Например, в качестве источника УЗ-воздействия может выступать цилиндрический корпус сушильной камеры.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность ультразвукового способа сушки малых объемов целлюлозы и позволили ре-

комендовать варианты наиболее рационального размещения высушиваемого материала при проектировании конструкций сушильных камер.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boucher R.M.G. Drying by airborne ultrasonics // *Ultrasonic News*. – 1959. – V. 3 (2). – P. 8–9.
2. Greguss P. The mechanism and possible applications of drying by ultrasonic irradiation // *Ultrasonics*. – 1963. – V. 1. – № 2. – P. 83–86.
3. Musielak G., Mierzwa D., Kroehnke J. Food drying enhancement by ultrasound: a review // *Trends Food Sci. Technol.* – 2016. – V. 56. – P. 126–141.
4. 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. – V. 43. – P. 223–238.
5. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis* / J. Xu, D. Wang, Y. Lei, L. Cheng, W. Zhuang, Y. Tian // *Ultrasonics sonochemistry*. – 2022. – V. 84. – 105963.
6. Dehsheikh F.N., Dinani S.T. Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying // *Ultrasonics sonochemistry*. – 2019. – V. 52. – P. 401–413.
7. Ultrasonic applications for food dehydration #41 / M. Baslar, O.S. Toker, S. Karasu, Z.H. Tekin, H. Biranger Yildirim // *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. – Singapore: Springer, 2016. – P. 1247–1270.
8. Kowalski S.J. Ultrasound in wet materials subjected to drying: a modeling study // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 84. – P. 998–1007.
9. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot / J. Szadzinska, D. Mierzwa, A. Pawłowski, G. Musielak, R. Pashminehazar, A. Kharaghani // *Drying Technology*. – 2020. – V. 38:1-2. – P. 93–107.
10. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – a response surface approach / S.M. Beck, H. Sabarez, V. Gaukel, K. Knoerzer // *Ultrason. Sonochem.* – 2014. – V. 21. – P. 2144–2150.
11. Gallego-Juarez J.A. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances // *Physics Procedia*. – 2010. – V. 3. – № 1. – P. 35–47.
12. Physics of direct-contact ultrasonic cloth drying process / C. Peng, S. Ravi, V.K. Patel, A.M. Momen, S. Moghaddam // *Energy*. – 2017. – V. 125. – P. 498–508.
13. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetable: processes and devices / J.A. Gallego-Juarez, E. Riera, S.D.F. Blanco, G. Rodriguez-Corral, V.M. Acosta-Aparicio, A. Blanco // *Drying Technol.* – 2007. – V. 25. – P. 1893–1901.
14. Identification of regimes and conditions for moisture, removal from materials by noncontact exposure to ultrasonic vibrations / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, S.A. Terent'ev, V.A. Nesterov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2022. – V. 95. – № 4. – P. 909–917.
15. Интенсификация процесса эмульгирования в условиях одновременного воздействия прямых и отраженных ультразвуковых колебаний / В.Г. Афанасенко, И.П. Кузеев, Ю.С. Ковшова, П.А. Кулаков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 44–51.
16. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 688 с.
17. Разработка и исследование нового способа газоочистки от частиц размером менее 2,5 мкм / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.С. Боченков, В.А. Нестеров // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 127–139.
18. Создание и применение ультразвуковых излучателей для интенсификации процессов химических технологий в газовых средах или через газовые промежутки / В.Н. Хмелёв, А.Н. Галахов, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2013. – № 2 (4). – С. 82–93.
19. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, К.В. Шалунова // *Химическая техника*. – 2010. – Т. 1. – С. 23–28.
20. Алешина Л.А., Мелех Н.В., Фофанов А.Д. Исследования структуры целлюлозы и лигнинов различного происхождения // *Химия растительного сырья*. – 2005. – № 3. – С. 31–59.
21. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор / А.Н. Зарубина, А.Н. Иванкин, А.С. Кулезнев, В.А. Кочетков // *Лесной вестник*. – 2019. – Т. 23. – № 5. – С. 116–125.

### REFERENCES

1. Boucher R.M.G. Drying by airborne ultrasonics. *Ultrasonic News*, 1959, vol. 3 (2), pp. 8–9.
2. Greguss P. The mechanism and possible applications of drying by ultrasonic irradiation. *Ultrasonics*, 1963, vol. 1, no. 2, pp. 83–86.
3. Musielak G., Mierzwa D., Kroehnke J. Food drying enhancement by ultrasound: a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 2016, vol. 56, pp. 126–141.
4. 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, pp. 223–238.
5. Xu J., Wang D., Lei Y., Cheng L., Zhuang W., Tian Y. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis*. *Ultrasonics sonochemistry*, 2022, vol. 84, 105963.
6. Dehsheikh F.N., Dinani S.T. Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying. *Ultrasonics sonochemistry*, 2019, vol. 52, pp. 401–413.
7. Baslar M., Toker O.S., Karasu S., Tekin Z.H., Biranger Yildirim H. Ultrasonic applications for food dehydration #41. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Singapore, Springer, 2016. pp. 1247–1270.
8. Kowalski S.J. Ultrasound in wet materials subjected to drying: a modeling study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 84, pp. 998–1007.
9. Szadzinska J., Mierzwa D., Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technology*, 2020, vol. 38:1-2, pp. 93–107.

10. 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, pp. 2144–2150.
11. Gallego-Juarez J.A. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 35–47.
12. Peng C., Ravi S., Patel V.K., Momen A.M., Moghaddam S. Physics of direct-contact ultrasonic cloth drying process. *Energy*, 2017, vol. 125, pp. 498–508.
13. 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 Technol*, 2007, vol. 25, pp. 1893–1901.
14. Shalunov A.V., Khmelev V.N., Terent'ev S.A., Nesterov V.A. Identification of regimes and conditions for moisture, removal from materials by noncontact exposure to ultrasonic vibrations. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 4, pp. 909–917.
15. Afanasenko V.G., Kuzeev I.R., Kovshova Yu.S., Kulakov P.A. Emulsification intensification under simultaneous impact of original and reflected ultrasonic vibrations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 44–51. In Rus.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. *Ultrazvuk. Apparaty i tekhnologii. Monografiya* [Ultrasound. Apparatus and technologies: monograph]. Biysk, Altai State Technical University Publ. house, 2015. 688 p.
17. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bochenkov A.S., Nesterov V.A. Development and research of a new method of gas cleaning from particles less than 2.5 micron in size. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 127–139. In Rus.
18. Khmelev V.N., Galakhov A.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Creation and application of ultrasonic emitters for the intensification of chemical technology processes in gaseous media or through gas gaps. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (4), pp. 82–93. In Rus.
19. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Shalunova K.V. Application of ultrasonic vibrations of high intensity for intensification of processes in gas media. *Chemical Engineering*, 2010, vol. 1, pp. 23–28. In Rus.
20. Aleshina L.A., Melekh N.V., Fofanov A.D. Studies of the structure of cellulose and lignins of various origin. *Chemistry of plant raw materials*, 2005, no. 3, pp. 31–59. In Rus.
21. Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. Cellulose and nanocellulose. *Obzor. Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 116–125. In Rus.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Владимир Николаевич Хмелев**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

**Андрей Викторович Шалунов**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

**Сергей Александрович Терентьев**, кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>; шифр специальности ВАК: 2.6.13

**Виктор Александрович Нестеров**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, Россия, 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27; nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Поступила в редакцию: 05.04.2023

Поступила после рецензирования: 18.04.2023

Принята к публикации: 13.05.2023

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir N. Khmelev**, Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Research at the Biysk Technological Institute, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; vnh@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

**Andrey V. Shalunov**, Dr. Sc., Leading Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; shalunov@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

**Sergey A. Terentiev**, Cand. Sc., Associate Professor, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; sergey@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6989-9769>

**Viktor A. Nesterov**, Cand. Sc., Leading Researcher, Altai State Technical University, 27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russian Federation; nva@bti.secna.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6140-5699>

Received: 05.04.2023

Revised: 18.04.2023

Accepted: 13.05.2023