

Разработка экспериментального стенда для исследования
непрерывной конвективной сушки текстильных материалов при
контактном ультразвуковом воздействии

В. Н. Хмелёв^{*1}, В. А. Нестеров^{*}, М. К. Кошелева^{**}, Д. В. Генне^{*},
П. П. Тertiшников^{*}

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

*** Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

В статье приводится описание экспериментального стенда и результатов предварительных экспериментов, подтверждающих эффективность применения контактного ультразвукового воздействия для конвективной сушки движущихся плоских текстильных материалов. В разработанном стенде ультразвуковое воздействие обеспечивается излучателем ультразвуковых колебаний, позволяющим создавать амплитуду колебаний рабочего инструмента не менее 70 ± 5 мкм на частоте 22 кГц по всей площади контакта высушиваемого текстильного материала с излучающей поверхностью ультразвуковой колебательной системы. Стенд оснащен необходимым измерительным оборудованием, позволяющим контролировать изменение массы высушиваемой ткани, температуру сушильного агента, скорость движения текстильного материала. Сушка материалов обеспечивается двумя видами энергетического воздействия: тепловым (сушильным агентом является воздух) и ультразвуковым. Проведенные на стенде исследования позволили установить, что применение контактного ультразвукового воздействия с амплитудой колебаний 70 ± 5 мкм в дополнение к тепловому (60°C) воздействию позволяет на 27% снизить время сушки до достижения одинакового влагосодержания (в исследованном диапазоне влагосодержания). При этом увеличение скорости движения ткани с 0.07 м/с до 0.28 м/с и соответственно, количества её протяжек и контактов с УЗ излучателем, также позволяет сократить время сушки на 27% (в исследованном диапазоне влагосодержания).

Ключевые слова

Конвективная сушка, плотные текстильные материалы, интенсификация, контактный ультразвук.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10359,
<https://rscf.ru/project/21-79-10359/> «Влияние характеристик ультразвукового поля на условия
низкотемпературного удаления влаги из капиллярно-пористых материалов»*

¹ Для переписки:

Email: vnh@u-sonic.ru

Введение

Повышение эффективности наиболее энергоёмкого процесса текстильной промышленности — процесса сушки текстильных материалов является одной из важных проблем. В настоящее время для сушки плоских текстильных материалов, в том числе плотных тканей, широко используется конвективный способ сушки [1, 2].

К недостаткам конвективной сушки тканей относятся высокие энергозатраты, значительная продолжительность и невысокая производительность процесса, снижение прочности, вероятность усадки тканей из натуральных волокон, возможная миграция красителей, печатной краски, аппретов при многократной высокотемпературной сушке [1, 2, 3].

Приведенные недостатки обусловлены не низким уровнем проработанности конструктивных решений, а принципиальными ограничениями высокотемпературного воздействия в сушилках для тканей, в том числе при сушке плотных шерстяных тканей.

Очевидно, что повышение эффективности процесса сушки, при одновременном снижении температуры процесса, возможно за счет интенсификации удаления влаги с поверхности и ускорения миграции влаги из внутренних слоев ткани на поверхность. Одним из возможных способов интенсификации процессов на границе раздела фаз и ускорения миграции жидкости на поверхность объекта сушки является воздействие акустическими ультразвуковыми (УЗ) колебаниями.

Эффективность такого воздействия была доказана еще в середине прошлого века [4]. Акустическая сушка звуковыми колебаниями на частотах 5...10 кГц при величине звукового давления 145...150 дБ в настоящее время практически не

используется и не рассматривается из-за чрезвычайной опасности для человека.

Известные исследования контактной ультразвуковой сушки [5-7] различных материалов проводились лишь при малых скоростях потоков воздуха (не более 1 м/с), поскольку считалось, что при больших скоростях потоков влияние ультразвукового воздействия становится несущественным. В современных промышленных сушилках тканей скорости потока сушильного агента (воздуха) могут достигать значительных величин — до 30 м/с [2]. В процессе производства текстильных материалов скорость движения ткани может достигать 10...20 м/мин. Очевидно, что бесконтактное УЗ воздействие не способно обеспечивать требуемый уровень вводимой энергии в высушиваемый материал при понижении температуры сушильного агента. Поэтому одним из перспективных способов применения ультразвуковых колебаний в процессе сушки текстильных материалов при их производстве является непосредственное контактное ультразвуковое воздействие. Однако, до настоящего времени, интенсификация процесса сушки за счет ультразвуковых колебаний не получила распространения из-за отсутствия высокоэффективных излучателей, способных создать равномерное распределение амплитуды колебаний поверхности рабочего инструмента [8–11]. На сегодняшний день это является сдерживающим фактором в практическом использовании и проведении исследований процесса ультразвуковой сушки для получения объективных научных результатов с определением оптимальных режимов и условий воздействия в производственных условиях.

Всё вышеуказанное делает актуальным создание специализированного экспериментального стенда для проведения исследований процесса конвективной непрерывной сушки плоских текстильных

материалов с интенсификацией процесса контактным ультразвуковым воздействием.

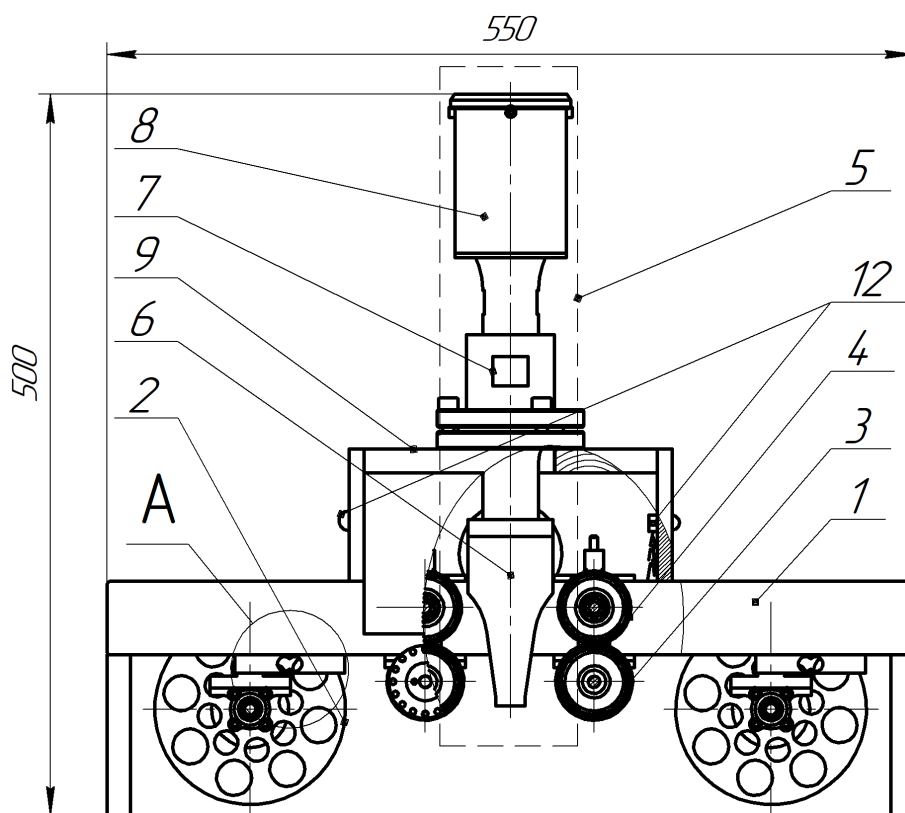
Материалы и методы решения задач. К разрабатываемому специализированному экспериментальному стенду для исследования процесса сушки предъявляются следующие требования:

1) Стенд должен обеспечивать как тепловое воздействие (с температурой до 60 °С), так и ультразвуковое контактное воздействие (совместно и по отдельности) по всей ширине ленты высушиваемого материала для получения сравнительных данных по эффективности сушки при различных видах энергетического воздействия на высушиваемый материал;

2) Стенд должен быть оснащен системой контроля массы материала для минимизации количества операций при перематке и уменьшения времени, необходимого для определения влагосодержания в высушиваемом материале;

3) Стенд должен обеспечивать многократную перематку материала с одной бобины на другую в диапазоне скоростей от 0 до 0,3 м/с для выявления скорости движения текстильного материала, при которой достигается максимальная эффективность сушки.

В соответствии с вышеизложенными требованиями был разработан и изготовлен специализированный стенд, схематично представленный на рисунке 1.



- 1 — рама; 2 — бобины для намотки ткани; 3 — протяжной ролик; 4 — прижимной ролик;
5 — ультразвуковая колебательная система; 6 — ультразвуковой рабочий инструмент;
7 — концентратор; 8 — пьезоэлектрический преобразователь; 9 — кронштейн ультразвуковой колебательной системы; 10 — тензобалка; 11 — подшипниковый узел; 12 — форсунки для распыления жидкости (начального увлажнения ткани)

Рисунок 1 — Эскиз экспериментального стенда.

Стенд состоит из рамы (рисунок 1, поз. 1), на которую установлены система протяжки ткани, система нагрева, колебательная система для воздействия колебаниями ультразвуковой частоты на ткань, система измерения массы ткани и система орошения ткани.

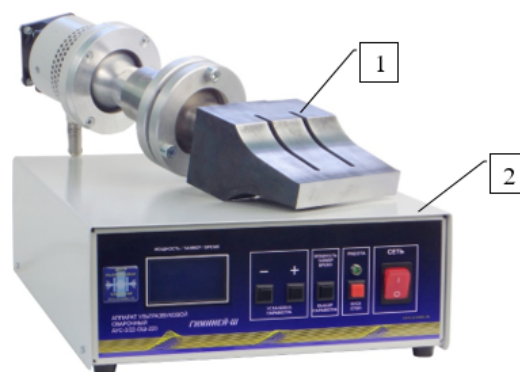
Система протяжки обеспечивает перемотку ткани с одной бобины на другую с возможностью регулирования силы натяжения ткани. Регулирование усилия протягивания позволяет изменять силу прижима ткани к колеблющемуся рабочему инструменту (рисунок 1, поз. 6) ультразвуковой колебательной системы (рисунок 1, поз. 5). Система протяжки ткани состоит из двух бобин для намотки ткани (рисунок 1, поз. 2), двух протяжных роликов с приводом от мотор-редукторов (рисунок 1, поз. 3), двух подпружиненных роликов (рисунок 1, поз. 4) предназначенных для прижима протягиваемой ткани к протяжным роликам. Для регулирования натяжения ткани на валу протяжных роликов установлены фрикционные тормоза. Бобины (рисунок 1, поз. 1) приводятся в движение с помощью ременного привода от протяжных роликов шкивов, установленных на осях приводных роликов (рисунок 1, поз. 3). Каждый электропривод в виде мотор-редуктора, установленного на вал каждого протяжного ролика (рисунок 1, поз. 4), имеет электронную систему регулирования и поддержания постоянной скорости протяжки.

Система нагрева подаваемого воздуха состоит из вентиляторной установки и установленного за ней электронагревателя (на рисунке не показана). Нагретый воздух по газоходу подается в область, сформированную кронштейном УЗКС (рисунок 1, поз. 9), рамой (рисунок 1, поз. 1) и высушиваемой тканью. Отходящий увлажненный воздух выходит вниз через

зазоры между рамой (рисунок 1, поз. 1) и высушиваемой тканью.

Для контактного воздействия колебаниями ультразвуковой частоты на ткань на раме (рисунок 1, поз. 1) с помощью кронштейна (рисунок 1, поз. 9) установлена ультразвуковая колебательная система. Рабочий инструмент (рисунок 1, поз. 6) расположен таким образом, чтобы ткань, проходящая между блоками протяжных/прижимных роликов, огибала окончание инструмента. За счет наличия системы стабилизации установленной амплитуды колебаний, уровень амплитуды остается постоянным при изменении внешних воздействий (изменение усилия прижима или площади соприкосновения материала с ультразвуковым инструментом УЗКС).

Фото ультразвукового генератора и ультразвуковой колебательной системы приведено на рисунке 2. Технические характеристики ультразвукового аппарата представлены в таблице 1.



1 — ультразвуковая колебательная система;
2 — электронный генератор

Рисунок 2 — Фото используемого ультразвукового технологического аппарата

Для определения содержания влаги в ткани в составе стенда предусмотрена система измерения массы объекта сушки. Система состоит из четырех тензометрических балок (тензодатчики) (рисунок 3, поз. 10) по два датчика на каждой бобине, установленных на подшипниковых узлах

(рисунок 3, поз. 11) бобин (рисунок 3, поз. 2), и микроконтроллера, который оцифровывает сигналы, формируемые датчиками. Таким образом в процессе сушки ткань перематывается с одного барабана на другой и обратно, при этом по окончании каждой перемотки ткани проводится измерение массы полного барабана. Масса ткани может быть измерена только непосредственно перед началом движения (протяжки) высушиваемого материала с одной бобины на другую и обратно.

Таблица 1 — Основные технические характеристики.

Мощность, Вт, не более	1000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	20
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Амплитуда колебаний рабочего инструмента, мкм, не менее	70
Размеры окончания рабочего инструмента, мм	110x20
Система стабилизации установленной амплитуды колебаний	Есть

Измерение массы в процессе перемотки материала нецелесообразно из-за большого числа факторов, влияющих на точность измерения массы, такие как вибрация при перемотке вследствие несбалансированности бобины с тканью, дополнительное усилие протяжки, которое меняется в процессе перемотки за счет изменения диаметра рулона ткани, усилие, создаваемое приводным ремнем и т. д.

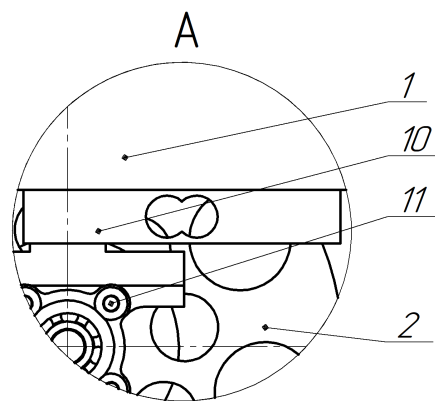


Рисунок 3 — Выносной элемент А – эскиз подшипникового узла бобины с подвесом на тензобалке

Для увлажнения ткани в процессе исследований предусмотрена система орошения ткани, состоящая из двух веерных форсунок (рисунок 1, поз. 12), помпы для нагнетания воды, бака с водой и блока питания.

В процессе первоначальной перемотки ткани с одного барабана на другой включается система орошения, при этом контролируется масса ткани посредством системы измерения массы.

Разработанный стенд имеет следующие характеристики:

- скорость протяжки текстильного материала: 0–0.3 м/с;
- максимальная скорость потока нагретого воздуха на входе: 3 м/с;
- максимальная температура нагретого воздуха: 60 °С;
- расход орошаемой жидкости 0–50 г/с;
- усилие прижима ткани к ультразвуковому инструменту: 2 кг (давление 0.01 МПа);
- максимальная измеряемая масса бобины с тканью 4 кг;
- максимальная ширина ткани 110 мм;
- максимальный объем наматываемой ткани на одну бобину (при ширине 110 мм) 3 дм³.

Результаты

Для проверки работоспособности стенда и получения экспериментальных данных об эффективности сушки текстильных материалов при различных видах воздействия (тепловое, УЗ воздействие и их совместное воздействие) были проведены исследования процесса сушки плотной шерстяной ткани с поверхностной плотностью $M = 760 + 54, \text{ г/м}^2$, состоящей из 90% шерстяного волокна и 10% полиамидного волокна. Толщина ткани 2.0 мм, пористость 50%.

Сушка подобных тканей в промышленных условиях осуществляется конвективным способом в непрерывных сушильно-ширильных машинах. В ходе сушки не допускается вытяжка ткани и её усадка по ширине.

Данные об объекте сушки на экспериментальном стенде: ширина ленты материала 0.1 м, длина ленты материала 8 м, масса сухой ткани 0.775 кг, начальное влагосодержание ткани всегда составляло 100%, т. е. перед началом процесса сушки

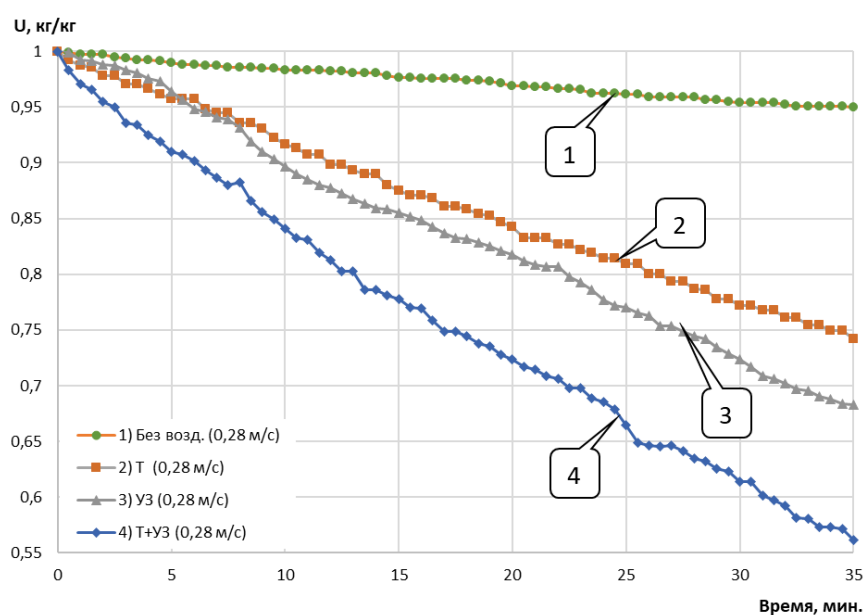
ткань пропитывалась водой в количестве 0.775 кг.

Амплитуда колебаний окончания ультразвукового инструмента установлена на уровне $70 \pm 5 \text{ мкм}$, сила прижима ткани к ультразвуковому инструменту 2 кг.

В процессе проведения исследований ткань многократно перематывалась с одной бобины на другую и обратно с постоянной скоростью.

На первом этапе исследований на разработанном стенде были получены сравнительные данные об изменении влагосодержания ткани в процессе сушки при различных видах воздействия. При проведении экспериментальных исследований были установлены следующие параметры стенда: скорость протяжки ткани – 0.28 м/с., скорость потока нагретого воздуха составляла 3 м/с, температура воздуха в потоке 60°C .

На рисунке 4 представлены кривые кинетики сушки плотной шерстяной ткани при различных видах энергетического воздействия.



1 — без дополнительного воздействия; 2 — тепловое воздействие (60°C); 3 — ультразвуковой воздействие; 4 — совместное тепловое и ультразвуковое воздействие

Рисунок 4 — Кривые кинетики сушки плотной шерстяной ткани при различных видах внешнего энергетического воздействия

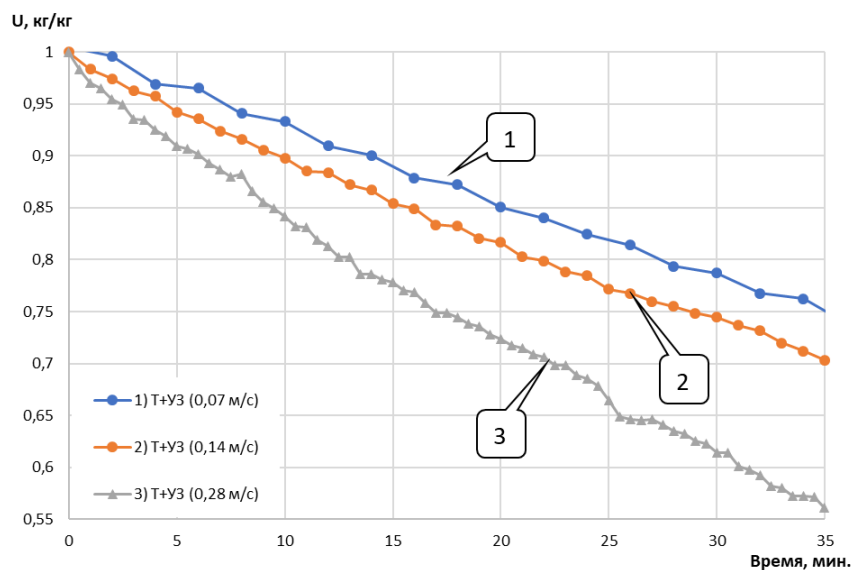


Рисунок 5 — Кривые кинетики сушки ткани при различных скоростях движения ткани

Каждая серия экспериментов проводилась при различном энергетическом воздействии на ткань или без него:

1) без воздействия, при этом происходил отжим ткани между протягивающих и прижимных роликов. Далее во всех сериях экспериментов фактор отжима присутствует, однако его влияние очень мало;

2) только тепловое воздействие;

3) только ультразвуковое воздействие

4) комбинированное тепловое и ультразвуковое воздействие.

По кривым кинетики сушки видно, что наиболее эффективным способом удаления влаги из материала является совместное акустическое и тепловое воздействие

Благодаря такому способу сушки за 35 минут удается добиться влагосодержания не более 55%, в то время как сушка только тепловым воздействием и только при УЗ воздействии позволяет за те же 35 минут добиться влагосодержания не более 75% и 68% соответственно. Таким образом, за счет применения контактного ультразвукового воздействия с амплитудой колебаний 70 мкм в дополнение к тепловому (60°C) позволяет снизить влагосодержание с 75% до 55% (на 27%) при одном и том же времени сушки.

При этом без какого-либо воздействия (за исключением отжима) процесс влагоудаления практически прекращается.

Так как при совместном воздействии УЗ колебаниями и нагретым воздухом при других равных условиях обеспечивается самая высокая эффективность сушки, то дальнейшие исследования были направлены на установление влияния скорости движения ткани (протяжки) на эффективность процесса сушки при комбинированном воздействии. Исследования проведены при тех же условиях, что и предыдущие, при этом изменялась скорость движения ткани (протяжки).

На рисунке 5 представлены кривые кинетики сушки при разных скоростях движения ткани (0,07 м/с, 0,14 м/с и 0,28 м/с).

Анализ зависимостей показал, что увеличение скорости движения ткани (протяжки) приводит к увеличению эффективности процесса сушки, из чего можно сделать вывод о том, что многократное перематывание ткани с малым временем УЗ воздействия (либо использование нескольких последовательно установленных ультразвуковых излучателей) приводит к лучшим результатам, чем медленная

протяжка ткани с увеличенным временем воздействия ультразвуковыми колебаниями (на низкой скорости). Таким образом, увеличение скорости движения ткани с 0.07 до 0.28 м/с позволяет уменьшить её конечное влагосодержание с 75% до 55% (на 27%).

Заключение

Анализ и кинетический расчет процессов конвективной сушки плоских волокнистых материалов требует накопления и систематизации данных по кинетике их сушки в различных условиях, по их теплофизическим характеристикам, по влиянию на кинетику различных способов интенсификации [2, 12–16].

Разработан специализированный экспериментальный стенд для исследования процесса сушки плоских текстильных материалов, позволяющий проводить контроль массы бобин с тканью без их снятия и установки. Это позволяет увеличить точность определения влагосодержания ткани и повысить точность эксперимента за счёт снижения времени измерения. Созданный стенд обеспечивает два вида энергетического воздействия: тепловое и ультразвуковое, что позволяет проводить сравнительные исследования. Исследования показали, что за счёт применения контактного ультразвукового воздействия с амплитудой колебаний 70 мкм в дополнение к тепловому (60°C) влагосодержание материала (в исследованном диапазоне) снижается на 27% при одинаковом времени сушки. Установлено, что увеличение скорости движения ткани и, соответственно, числа её протяжек и контактов с УЗ воздействием, также позволяет повысить эффективность сушки. Исследования будут продолжены в более широком диапазоне влагосодержания, включая требуемую кондиционную влажность объекта сушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Устройство для конвективной сушки текстильного материала; пат. на изобретение № 2008590 Российская Федерация: МПК : F26B13/00, F26B17/04 / Власов А.Е., Кошелева М.К., Реутский В.А., Сажин Б.С. (РФ); патентообладатель: Московская государственная текстильная академия им. А.Н. Косыгина (РФ) заявка: 4949341/06 от 25.06.1991, опубл. 28.02.1994.
- [2]. Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, М. Б. Сажина Процессы сушки и промывки текстильных материалов. М.: МГУДТ, 2013, 301 с.
- [3]. М. К. Кошелева, Р. Н. Голых, Т. А. Новикова, Р. С. Доровских и др. Ультразвуковая Сушка Текстильных Материалов. 18-я Международная конференция-семинар молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM' 2017. Новосибирск: НГТУ, 2017, С. 283-289.
- [4]. Greguss P. Drying by Airborne Ultrasonics. *Ultrasonics News*, 1963, 5, 3, 7.
- [5]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, V. A. Nesterov, R. S. Dorovskikh, R. N. Golykh. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015*, Novosibirsk, NSTU, 2015, P 224–228.
- [6]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. N. Golykh, R. S. Dorovskikh [et al.]. Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields. *Archives of Acoustics*, 2016, 41, 4, P. 757–771.
- [7]. Physical foundations of ultrasonic technology / Ed. By L. D. Rozenberg. М.: Science, 1969, 689 p.

- [8]. V. N. Khmelev, I. I. Savin, D. S. Abramenko, S. N. Tsyganok [et al.]. Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings*. Novosibirsk: NSTU, 2006, P. 223–228.
- [9]. G. V. Leonov, V. N. Khmelev, I. I. Savin, R. V. Barsukov [et al.] Acoustic Drying of Garments In Drum-Type Washing Machines. *International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings*. Novosibirsk: NSTU, 2005, P. 106–111.
- [10]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. V. Barsukov, D. S. Abramenko, A. N. Lebedev. Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, 12, 4, P. 247–354.
- [11]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. S. Dorovskikh, R. N. Golykh, V. A. Nesterov. The Measurements of Acoustic Power Introduced into Gas Medium by the Ultrasonic Apparatuses with the Disk-Type Radiators. *17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016*, 2016, P. 246–250.
- [12]. П. С. Куц, А. И. Ольшанский. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов. *Инженерно-физический журнал*, 1975, Т. 28, № 4, С. 594.
- [13]. А. И. Ольшанский. Исследование процесса сушки плоских влажных материалов методом обобщенных переменных. *Инженерно-физический журнал*, 2013, Т. 86, № 2, С. 66.
- [14]. А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных. *Инженерно-физический журнал*, 2017, Т. 90, № 3, С. 700.
- [15]. С. П. Рудобашта, О. Р. Дорняк, В. М. Дмитриев. Расчёт кинетики сушки пластины с учётом усадки. *Теоретические основы химической технологии*, 2021, Т. 55, № 5, С. 612–617.
DOI: 10.31857/S004035712104014X
- [16]. П. В. Акулич. Термогидродинамические процессы в технике сушки. Под ред. П. С. Куца. Минск: ИТМО НАН РБ, 2002.

Хмелёв Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Нестеров Виктор Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Кошелева Мария Константиновна — канд. техн. наук, профессор, кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Генне Дмитрий Владимирович — инженер, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Тертишников Павел Павлович — студент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Development of an experimental stand for the study of continuous convective drying of textile materials under contact ultrasonic exposure

V. N. Khmelev^{*1}, V. A. Nesterov^{*}, M. K. Kosheleva^{*}, D. V. Genne, P. P. Tertishnikov

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

*** The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The article describes the experimental stand and the results of preliminary experiments confirming the effectiveness of the use of contact ultrasonic exposure for convective drying of moving flat textile materials. In the developed stand, ultrasonic exposure is provided by an ultrasonic vibration emitter, which allows creating an amplitude of oscillations of the working tool of at least $70 \pm 5 \mu\text{m}$ at a frequency of 22 kHz over the entire contact area of the dried textile material with radiating surface of ultrasonic oscillatory system. The stand is equipped with the necessary measuring equipment that allows you to control the change in the mass of the dried fabric, the temperature of the drying agent, the speed of movement of the textile material. Drying of materials is provided by two types of energy effect: thermal (the drying agent is air) and ultrasonic. The studies carried out at the stand made it possible to establish that the use of contact ultrasonic exposure with an amplitude of oscillations of $70 \pm 5 \mu\text{m}$ in addition to the thermal (60°C) effect allows to reduce the drying time by 27% until the same moisture content is achieved (in the studied range of moisture content). At the same time, an increase in the speed of movement of the fabric from 0.07 to 0.28 m/s and, accordingly, the number of its broaches and contact with ultrasonic emitter, also allows you to reduce the drying time by 27% (in the studied moisture content range).

Keywords

Convective drying, dense textile materials, intensification, contact ultrasound.

REFERENCES

- [1]. Device for convective drying of textile material; stalemate. for invention No. 2008590 Russian Federation: IPC : F26B13/00, F26B17/04 / Vlasov A.E., Kosheleva M.K., Reutsky V.A., Sazhin B.S. (RF); patent holder: Moscow State Textile Academy named after A.N. Kosygin (RF) application: 4949341/06 of 25.06.1991, publ. 28.02.1994. (In Russ.)
- [2]. B. S. Sazhin, M. K. Kosheleva, M. B. Sazhina. Processy sushki I promyvki tekstilnykh materialov [Processes of drying

¹ *Corresponding author*
Email: vnh@u-sonic.ru

- and washing of textile materials]. Moscow, MGUDT Publ., 2013, 301 p. (In Russ.)
- [3]. M. K. Kosheleva, R. N. Golykh, T. A. Novikova, R. S. Dorovskikh. Ul'trazvukovaya Sushka Tekstil'nykh Materialov [Ultrasonic Drying of Textile Materials]. *18th International Conference-Seminar of Young Specialists in Micro- and Nanotechnologies and Electronic Devices EDM' 2017*. Novosibirsk: NSTU, 2017, pp. 283–289. (In Russ.)
- [4]. Greguss P. Drying by Airborne Ultrasonics. *Ultrasonics News*, 1963, 5, 3, 7.
- [5]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, V. A. Nesterov, R. S. Dorovskikh, R. N. Golykh. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015*, Novosibirsk, NSTU, 2015, P 224–228.
- [6]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. N. Golykh, R. S. Dorovskikh [et al.]. Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields. *Archives of Acoustics*, 2016, 41, 4, P. 757–771.
- [7]. Physical foundations of ultrasonic technology / Ed. by L. D. Rozenberg. Moscow, Science Publ., 1969, 689 p.
- [8]. V. N. Khmelev, I. I. Savin, D. S. Abramenko, S. N. Tsyganok [et al.]. Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings*. Novosibirsk: NSTU, 2006, P. 223–228.
- [9]. G. V. Leonov, V. N. Khmelev, I. I. Savin, R. V. Barsukov [et al.]. Acoustic Drying of Garments In Drum-Type Washing Machines. *International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings*. Novosibirsk: NSTU, 2005, P. 106–111.
- [10]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. V. Barsukov, D. S. Abramenko, A. N. Lebedev. Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, 12, 4, P. 247–354.
- [11]. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. S. Dorovskikh, R. N. Golykh, V. A. Nesterov. The Measurements of Acoustic Power Introduced into Gas Medium by the Ultrasonic Apparatuses with the Disk-Type Radiators. *17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016*, 2016, P. 246–250.
- [12]. P. S. Kuts, A. I. Ol'shanskiy. K voprosu priblizhennoy metodiki rascheta kinetiki konvektivnoy sushki ploskikh materialov [On the question of an approximate method for calculating the kinetics of convective drying of flat materials]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of engineering physics and thermophysics], 1975, Vol. 28, № 4, pp. 594. (In Russ.)
- [13]. A. I. Ol'shanskiy. Issledovaniye protsessa sushki ploskikh vlazhnykh materialov metodom obobshchennykh peremennykh [Study of the drying process of flat wet materials by the method of generalized variables]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of engineering physics and thermophysics], 2013, Vol. 86, № 2, pp. 66. (In Russ.)
- [14]. A. I. Ol'shanskiy, A. M. Gusarov. Eksperimental'noye issledovaniye kinetiki sushki tonkikh ploskikh vlazhnykh materialov metodom regul'yarnogo rezhima s ispol'zovaniyem obobshchennykh kompleksnykh peremennykh [Experimental study of the kinetics of drying thin flat wet materials by the regular mode method using generalized complex variables]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of engineering

physics and thermophysics], 2017, Vol. 90, № 3, pp. 700. (In Russ.)

[15]. S. P. Rudobashta, O. R. Dorniyak, V. M. Dmitriyev. Raschot kinetiki sushki plastiny s uchotom usadki [Calculation of the kinetics of drying of the plate, taking into account shrinkage]. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical

foundations of chemical technology], 2021, Vol. 55, № 5, pp. 612–617. (In Russ.)

DOI: 10.31857/S004035712104014X

[16]. P. V. Akulich. Termogidrodinamicheskiye protsessy v tekhnike sushki [Thermohydrodynamic processes in drying technique]. Ed. P. S. Kutsa. Minsk: ITMO NAN RB Publ., 2002.

Khmelev V. N. — Dr. Sc. (Eng.), professor, deputy director for research, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Nesterov V. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Kosheleva M. K. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071, Russian Federation).

Genne D. V. — Engineer, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Tertiшnikov P. P. — Engineer, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Разработка экспериментального стенда для исследования непрерывной конвективной сушки текстильных материалов при контактном ультразвуковом воздействии / В. Н. Хмелёв, В. А. Нестеров, М. К. Кошелева, Д. В. Генне, П. П. Тertiшников // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2(4). С. 64 – 76.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-64-76

Please cite this article as:

Khmelev V. N., Nesterov V. A., Kosheleva M. K., Genne D. V., Tertiшnikov P. P. Development of an experimental stand for the study of continuous convective drying of textile materials under contact ultrasonic exposure. *Industrial processes and Technologies*, 2022, vol. 2., no. 2(4), pp. 64 – 76

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-64-76