

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2024, Том 7, № 3 / 2024, Vol. 7, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 677.027.16

DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-109-119

Повышение энергоэффективности процесса сушки волокнистых материалов

¹ Фёдорова А.П. *,

¹ Новикова Т.А.,

¹ Зайцева Я.П.,

¹ Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

* Ответственный автор E-mail: Alenka.savostina@yandex.ru

Аннотация: в современной текстильной промышленности одним из самых энергозатратных и распространенных процессов является сушка, которой подвергаются волокна, пряжа и ткани после различных операций (пропитка, экстрагирование, крашение и др.). Сложный тепло-массообменный процесс сушки проводится при достаточно высоких температурах и является энергозатратным. Для снижения общего энергопотребления в текстильном производстве необходимо проводить предварительное обезвоживание материалов перед сушкой, например, в центрифугах, интенсификацию сушки физическими полями и др. Современные промышленные сушильные установки для текстильных материалов обеспечивают достаточно быструю и равномерную сушку, повышая общую эффективность данного этапа производства готовой текстильной продукции. Энергоэффективные решения для процесса сушки, позволяют снизить негативное воздействие процесса на окружающую среду. Промышленная сушка текстильных материалов проводится в конвективных или контактных сушилках при использовании тепловой энергии. В конвективных сушилках сушильным агентом является воздух. В контактных сушилках для обогрева барабанов используется водяной пар. В статье рассматриваются важные направления совершенствования технологического процесса и оборудования, предназначенного для сушки волокнистых материалов. К ним относятся: внедрение механического предшествующего сушке обезвоживания; выбор гибридных систем в барабанных сушилках; утилизация конденсата и пара в барабанных сушилках; изоляция торцевых панелей и отмена промежуточной сушки в барабанных цилиндрических сушилках; контроль влажности материала для предотвращения пересушивания ткани; сокращение времени простоя сушилок посредством планирования подачи партий ткани; использование многократной сушки ткани в барабанных сушилках. Совершенствование процесса сушки текстильных материалов возможно при использовании ультразвукового поля, инфракрасного излучения и других способов интенсификации при обеспечении своевременного технического обслуживания сушильного оборудования, программируемого изменения температуры в процессе сушки.

Ключевые слова: текстильное производство, текстильные материалы, процесс сушки, интенсификация, энергосбережение, энергоэффективность

Для цитирования: Фёдорова А.П., Новикова Т.А., Зайцева Я.П. Повышение энергоэффективности процесса сушки волокнистых материалов // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 3. С. 109 – 119. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-109-119

Поступила в редакцию: 10 мая 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 17 июня 2024 г.; Принята к публикации: 21 сентября 2024 г.

Improving the energy efficiency of the drying process of fibre materials

¹ Fedorova A.P. *,

¹ Novikova T.A.,

¹ Zaitseva Ya.P.,

¹ Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art),

* Corresponding author: Alenka.savostina@yandex.ru

Abstract: *in the modern textile industry, one of the most energy-consuming and widespread processes is drying, to which fibers, yarns and fabrics are subjected after various operations (impregnation, extraction, dyeing, etc.). A complex heat and mass transfer drying process is carried out at sufficiently high temperatures and is energy-consuming. To reduce the overall energy consumption in textile production, it is necessary to carry out preliminary dehydration of materials before drying, for example, in centrifuges, intensification of drying by physical fields, etc. Modern industrial drying plants for textile materials provide sufficiently fast and uniform drying, increasing the overall efficiency of this stage of production of finished textile products. Energy-efficient solutions for the drying process can reduce the negative impact of the process on the environment. Industrial drying of textile materials is carried out in convective or contact dryers using thermal energy. In convective dryers, the drying agent is air. In contact dryers, water vapor is used to heat the drums. The article discusses important areas of improvement of the technological process and equipment designed for drying fibrous materials. These include: the introduction of mechanical pre-drying dewatering; the choice of hybrid systems in drum dryers; utilization of condensate and steam in drum dryers; insulation of end panels and the abolition of intermediate drying in drum cylindrical dryers; control of moisture content of the material to prevent drying of the fabric; reduction of dryer downtime by planning the supply of batches of fabric; the use of multiple drying of fabric in drum dryers. The improvement of the drying process of textile materials is possible with the use of an ultrasonic field, infrared radiation and other intensification methods while ensuring timely maintenance of drying equipment, programmable temperature changes during the drying process.*

Keywords: *textile production, textile materials, drying process, intensification, energy saving, energy efficiency*

For citation: Fedorova A.P., Novikova T.A., Zaitseva Ya.P. Improving the energy efficiency of the drying process of fibre materials. Chemical Bulletin. 2024. 7 (3). P. 109 – 119. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-109-119

The article was submitted: May 10, 2024; Approved after reviewing: June 17, 2024; Accepted for publication: September 21, 2024.

Введение

Важную роль в определении времени производства текстильного материала и качества готовой продукции имеет эффективность процесса сушки тканей, волокон, волокнообразующих полимеров [1-3]. Процесс сушки и различное сушильное оборудование используется в производстве тканей, трикотажных изделий, нетканых материалов, окрашенной пряжи и других видов текстиля. Важна разработка методов расчёта кинетики сушки [4-6].

На раннем этапе создания текстильного производства, когда процесс создания текстильных материалов в XVIII веке был механизирован, сушка проводилась на воздухе и под солнцем. Естественно, что имели место проблемы с точки зрения продолжительности и качества — это неравномерная сушка, усадка материала, увеличение сроков изготовления готового материала и т.д. Эти проблемы обусловили необходимость создания промышленных технологий сушки тканей. Появление промышленных сушильных установок для высушивания текстильной продукции позволило устранить недостатки традиционных методов [5].

Усовершенствованные методы сушки используют передовые технологии, такие как сушка горячим воздухом, инфракрасная сушка, микроволновая сушка, различные способы интенсификации, например ультразвуковое воздействие [7, 8].

Материалы и методы исследований

При высокой влажности объекта сушки, его предварительно обезвоживают. Как правило, процессы обезвоживания используются для удаления влаги, которая механически связывается с волокном. Такая обработка направлена на повышение эффективности следующего этапа, то есть сушки.

Содержание влаги в объекте сушки может быть снижено посредством центрифугирования. Сушка волокнистого полотна после предварительного обезвоживания обычно осуществляется с помощью сушильных барабанов. В некоторых случаях контактная сушка на них сочетается с сушкой горячим воздухом и/или инфракрасным излучением. Сушка ткани в виде жгутов осуществляется с помощью отжима на прессах с последующей продувкой горячим сухим воздухом. Ткань в расправленном виде сушится с помощью цепочки сушильных цилиндров, расположенных вертикально или горизонтально [3, 5]. Ткань подается в ряд цилиндрических барабанов, которые нагреваются паром, подаваемым под давлением. Цилиндрические барабаны можно использовать для сушки широкого спектра тканей. Работа сушильных установок является весьма энергоёмкой [3]. В табл. 1 приведены некоторые характеристики барабанных сушилок.

Таблица 1

Параметры энергопотребления сушилок с паровыми цилиндрами.

Table 1

Energy consumption parameters of dryers with steam cylinders.

Компонент	Потребление энергии (гДж/ тонна продукта)	Доля потребления энергии в общем объеме
Испарение	1,35	52%
Потери на излучение и конвекцию	0,87	34%
Ткань	0,16	6%
Влагоемкость	0,14	5%
Трение	0,07	3%

Есть ряд современных методов повышения энергоэффективности процесса сушки [5], которые представлены далее на рис. 1.

Внедрение механического предварительного обезвоживания материала
Выбор гибридных систем в сушилке с цилиндрическими барабанами
Утилизация конденсата и пара в барабанной сушилке
Изоляция торцевых панелей в сушилке с цилиндрическими барабанами
Отмена промежуточной сушки в барабанных сушилках
Контроль влажности для предотвращения пересушивания ткани
Сокращение времени простоя путем планирования подачи партий ткани
Использование многократной сушки ткани в барабанной сушилке
Своевременное техническое обслуживание сушильного оборудования
Использование радиочастотных сушилок
Использование микроволновых сушильных машин низкого давления
Программируемое изменение температуры в процессе сушки

Рис. 1. Методы повышения энергоэффективности процесса сушки.

Fig. 1. Methods for improving energy efficiency of the drying process.

Механические методы предварительного обезвоживания объектов сушки, включают центрифугирование, обезвоживание с разными устройствами и используются для снижения энергозатрат на сушку за счет удаления части влаги из ткани перед сушкой.

Результаты и обсуждения

Центробежное обезвоживание в отдельных случаях может быть использовано для некоторых материалов, хотя склонность тканей к образованию складок и заломов приводит к тому, что в ос-

новном центрифугирование используется для обезвоживания пряжи или штапельных материалов, для трикотажных изделий [3].

На рис. 2 представлено использование всасывающих щелей для обезвоживания. Всасывающие отверстия могут быть расположены в передней части сушилки. Отверстия пропускают воздух через ткань, которая проходит через прорезь [1]. Влажный воздух фильтруется и пропускается через водоотделитель (рис. 2).

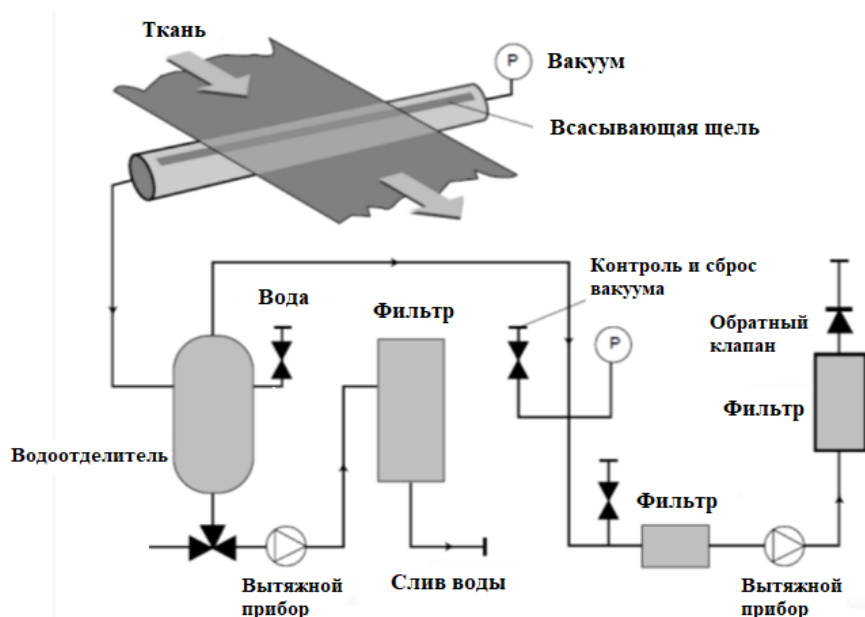


Рис. 2. Схема установки системы всасывающих щелей в передней части сушилки.

Fig. 2. Installation diagram of the suction slot system in the front part of the dryer.

Производительность паровых цилиндров может быть повышена за счёт использования направленного воздуха, как при комнатной, так и при повышенной температуре. Оборудование с направленным воздухом помогает рассеивать испаренную влагу. Одним из примеров является система ATIRA Rapidry, индийская разработка, в которой используются воздушные форсунки и скорость сушки увеличивается примерно на 25-30%. Другой пример – вытяжка Shirley, которая используется для проклейки и нанесения покрытий. Сообщается, что вытяжки Shirley могут увеличить скорость сушки на 40% [1].

Поскольку в барабанной сушилке с цилиндрическими барабанами используется большое количество пара, значительное количество конденсата также должно быть утилизировано и возвращено в котельную. Кроме того, вода, испаряясь, трансформируется в пар при понижении давления конденсата до атмосферного. Полученный в ходе

данного процесса пар может быть использован для нагрева воды или для других процессов с использованием пара низкого давления.

Изоляция торцевых панелей в сушилке позволяет уменьшить потери тепла, тем самым экономя тепловую энергию. Это наиболее практично для барабанов диаметром один метр и более. Для барабанов малого диаметра это может оказаться неосуществимым, поскольку препятствуют паропровод, конденсатопровод и предохранительный клапан.

При сушке важен контроль влагосодержания материала, чтобы не расходовалась лишняя энергия на проведение сушки. Существуют специальные датчики, которые отслеживают влажность ткани, проходящей на поверхности сушильных барабанов. На рис. 3 показана схема механизма регулирования влажности ткани в барабанных сушилках с цилиндрическими барабанами [1].

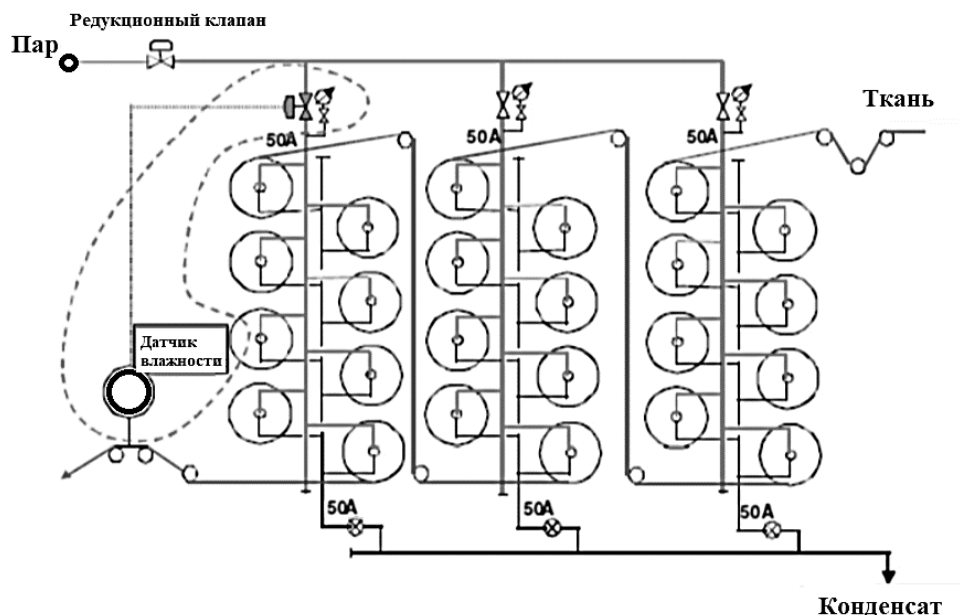


Рис. 3. Контроль влажности ткани в цилиндрической сушилке.

Fig. 3. Control of fabric moisture in a cylindrical dryer.

Предварительный расчёт и планирование подачи полотен ткани на цилиндрические барабаны может сократить время простоя и тем самым обеспечить экономию энергии. Аналогичным образом, эффективность можно повысить, сделав цилиндры более широкими, чтобы два полотна узкой ткани могли укладываться рядом. Для максимальной экономии энергии лучше использовать полотна ткани одинаковой длины, чтобы их сушка началась и заканчивалась одновременно. Это поможет избежать холостого хода одной стороны цилиндрических барабанов [2].

Поскольку сушильное оборудование является сложным и испытывает постоянные нагрузки, требуется его своевременное техническое обслуживание. Вакуумные выключатели, вентиляционные отверстия, вращающиеся соединения и конденса-

тоотводчики являются распространёнными местами утечки в паровых цилиндрах. Одна барабанная сушилка может включать до 32-х цилиндров, поэтому вероятность утечки велика. Важно, чтобы для каждого сушильного устройства была разработана программа технического обслуживания, которая должна включать периодическую проверку конденсатоотводчиков.

Радиочастотная сушка может эффективно заменить сушку с паровым обогревом мотков окрашенной акриловой пряжи, при этом уменьшатся затраты, улучшится качество изделий из акриловых нитей [4].

Схема высокочастотной сушилки с пониженным давлением для сушки пряжи на бобинах представлена на рис. 4.

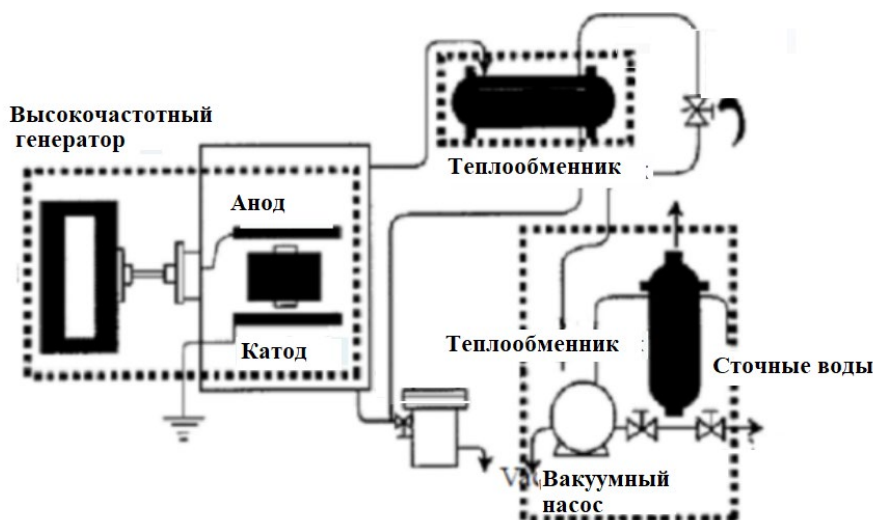


Fig. 4. Low pressure drying system using high frequency current.

В работах [9-11] и [6] показано, что для различных текстильных материалов эффективным явля-

В работе [15] проведены исследования полимерных и волокнистых материалов при воздействии ультразвука. Результаты представлены в табл. 2. Как видно из таблицы продолжительность процесса сушки меньше при воздействии ультразвука.

Таблица 2

Продолжительность процесса сушки гранул из полимера [15].

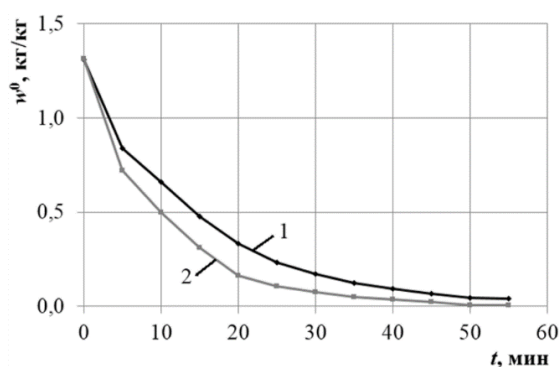
Table 2

Duration of the drying process of polymer granules [15].

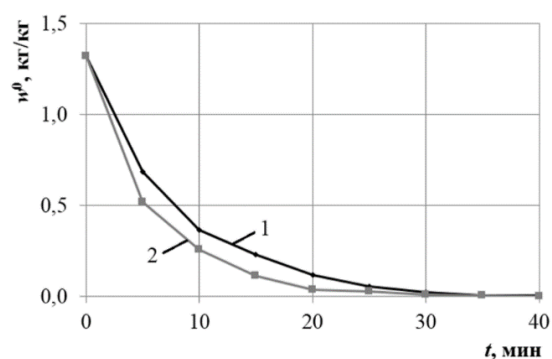
Продолжительность кон- вективной сушки, мин	Продолжительность сушки с интенсификацией ультра- звуком, мин	Сокращение продолжи- тельности сушки, раз
120	~105	~1,14
20	15	1,33

Экспериментальные данные по сушке синтепуха приведены на рисунке 5 [15], где w^0 – влагосодержание, кг влаги/кг сухого материала, t – время сушки, мин. На кривых сушки синтепуха наиболее заметно влияние ультразвукового воздействия на

процесс. Показано [15], что при температуре сушильного агента 40 °С сокращение времени сушки при ультразвуковом воздействии составляет около 35 %, а при 70 °С около 24 %.



а)



б)

Рис. 5. Кривые сушки синтепуха [15]. а) $T = 40$ °С; б) $T = 70$ °С; 1 – сушка без ультразвука; 2 – сушка с ультразвуком.

Fig. 5. Sintepuh drying curves [15]. а) $T = 40$ oC; б) $T = 70$ oC; 1 – drying without ultrasound; 2 – drying with ultrasound.

В [15] установлено, что наибольший эффект ультразвуковое воздействие оказывает на начальную стадию сушки, вне зависимости от вида материала и температуры. Причем, синтетические материалы (полиэстер и синтепух) лучше обезвоживаются при ультразвуковом воздействии, чем хлопчатобумажная ткань [15].

Полученные в изученных работах результаты можно использовать при выборе режимов сушки, при совершенствовании сушильных остановок. Повышение энергоэффективности сушки повышает экологическую безопасность процесса. Современными направлениями повышения эффективности процесса сушки является механическое обезвоживание материалов перед сушкой, выбор оп-

тимальных температурных режимов, контроль температуры в сушилке и влагосодержания материала, хорошая изоляция и применение многократной сушки в сушильных барабанах для тканей. Результаты изученных работ показывают, что использование ультразвукового поля, инфракрасного излучения, токов высокой и сверхвысокой частоты, другие способы интенсификации сушки существенно снижают энергетические затраты и тепловые выбросы. Анализ изученных работ показывают, что работы по исследованию и совершенствованию процесса сушки волокнистых материалов проводятся достаточно широко. Как основное

направление совершенствования процесса их сушки может быть отмечено применение различных физических полей.

Выводы

Проведён обзор работ по направлениям совершенствования процесса сушки текстильных материалов. Показано, что разработка энергоэффективных технологий сушки возможна на действующих сушилках при рациональном режиме их работы, выбираемом для различных текстильных материалов с учётом их свойств. Рассмотрены различные методы повышения энергоэффективности сушки текстильных материалов.

Список источников

1. Афанасьев А.В., Афанасьева В.В. Исследование теплообмена при струйном ламинарном обтекании цилиндра в режиме смешанной конвекции // Лесной вестник / Forestry bulletin. 2022. № 6. С. 114 – 124.
2. Исаев М.В. Повышение энергоэффективности и безопасности технологии получения тонкосуконного материала специального назначения // Второй международный конкурс научных проектов «Стираем границы». 2024. Т. 20. С. 96.
3. Шувалов Е.В., Жмакин Л.И. Канальная система нагрева паром контактной поверхности барабанных сушильных машин в текстильной промышленности // Сборник научных трудов аспирантов. 2014. С. 82 – 85.
4. Юдин Д.Р. Повышение эффективности процесса конвективной сушки волокнистых материалов // В сборнике: Проблемы развития современного общества: Сборник научных статей 9-й Всероссийской национальной научно-практической конференции: в 3-х т. Курск, 2024.
5. Walker A.C. Drying of Textiles // Journal of Fluids Engineering. December 2022. № 65 (4). P. 329 – 336. DOI:10.1115/1.4018759
6. Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Кошелева М.К., Генне Д.В., Тертишников П.П. Разработка экспериментального стенда для исследования непрерывной конвективной сушки текстильных материалов при контактном ультразвуковом воздействии // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2. С. 64 – 76. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2\(4\)-64-76](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-64-76)
7. Сажин Б.С., Федосов С.В., Кошелева М.К. Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности тепломассообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств в разделе "Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика" // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 116 – 122.
8. Куц П.С., Ольшанский А.И. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28. № 4. С. 19 – 21.

9. Хмелев В.Н., Кошелева М.К., Доровских Р.С., Голых Р.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Новикова Т.А. Ультразвуковая сушка текстильных материалов // Химическая технология. 2018. №4. С. 178 – 185.
10. Кошелева М.К., Дорняк О.Р. Моделирование процессов тепло- и массопереноса при конвективной сушке хлопчатобумажных тканей // Теоретические основы химической технологии. 2024. Т. 58. № 1. С. 27 – 34.
11. Kosheleva M.K., Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M. Convective drying of flat fibrous materials // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. Т. 96. № 4. С. 988 – 993.
12. Khmelev V., Shalunov A., Terentiev S., Golykh R., Nesterov V. Ultrasonic dehydration of materials without liquid-vapor transition. Drying Technology. 2024. Т. 42. № 6. С. 967 – 979.
13. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н., Нестеров В.А. выявление и исследование механизма удаления влаги из материалов при ультразвуковом бесконтактном воздействии // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 4. С. 939 – 950.
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. Т. 95. № 4. С. 909 – 917.
15. Терентьев С.А. Интенсификация процесса сушки капиллярно пористых материалов бесконтактным ультразвуковым воздействием: дис. канд. техн. наук. Бийск: БТИ АлтГТУ, 2022. 139 с.

References

1. Afanasyev A.V., Afanasyeva V.V. Study of heat transfer in jet laminar flow around a cylinder in mixed convection mode. Forestry bulletin. 2022. No. 6. P. 114 – 124.
2. Isaev M.V. Improving the energy efficiency and safety of the technology for producing fine-wool material for special purposes. Second International Competition of Scientific Projects “Erasing the Boundaries”. 2024. Vol. 20. Pp. 96.
3. Shuvalov E.V., Zhmakin L.I. Channel system for heating the contact surface of drum drying machines in the textile industry with steam. Collection of scientific papers of postgraduate students. 2014. P. 82 – 85.
4. Yudin D.R. Improving the efficiency of the convective drying process of fibrous materials. In the collection. Problems of development of modern society: Collection of scientific articles of the 9th All-Russian national scientific and practical conference: in 3 volumes. Kursk, 2024.
5. Walker A.C. Drying of Textiles. Journal of Fluids Engineering. December 2022. No. 65 (4). P. 329 – 336. DOI: 10.1115/1.4018759
6. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Kosheleva M.K., Genne D.V., Tertishnikov P.P. Development of an experimental stand for the study of continuous convective drying of textile materials under contact ultrasonic action. Industrial processes and technologies. 2022. Vol. 2. No. 2. P. 64 – 76. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2\(4\)-64-76](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-64-76)
7. Sazhin B.S., Fedosov S.V., Kosheleva M.K. Formation of scientific directions and reflection of scientific achievements in the field of increasing the efficiency of heat and mass transfer processes, environmental and indus-

trial safety of textile industries in the section "Environmental and industrial safety. Industrial heat and power engineering". News of universities. Textile industry technology. 2018. No. 4 (376). P. 116 – 122.

8. Kuts P.S., Olshansky A.I. On the issue of an approximate method for calculating the kinetics of convective drying of flat materials. Engineering and Physics Journal. 1975. Vol. 28. No. 4. P. 19 – 21.

9. Khmelev V.N., Kosheleva M.K., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Novikova T.A. Ultrasonic drying of textile materials. Chemical technology. 2018. No. 4. P. 178 – 185.

10. Kosheleva M.K., Dorniyak O.R. Modeling of heat and mass transfer processes during convective drying of cotton fabrics. Theoretical foundations of chemical technology. 2024. Vol. 58. No. 1. P. 27 – 34.

11. Kosheleva M.K., Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M. Convective drying of flat fibrous materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. Vol. 96. No. 4. Pp. 988 – 993.

12. Khmelev V., Shalunov A., Terentiev S., Golykh R., Nesterov V. Ultrasonic dehydration of materials without liquid-vapor transition. Drying Technology. 2024. Vol. 42. No. 6. Pp. 967 – 979.

13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Terentiev S.A., Golykh R.N., Nesterov V.A. Identification and study of the mechanism of moisture removal from materials under ultrasonic non-contact action. Engineering Physics Journal. 2024. Vol. 97. No. 4. P. 939 – 950.

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. P. 909 – 917.

15. Terentyev S.A. Intensification of the drying process of capillary porous materials by non-contact ultrasonic exposure: dis. candidate of technical sciences. Biysk: BTI Altai State Technical University, 2022. 139 p.

Информация об авторах

Федорова А.П., аспирант, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва, email: Alenka.savostina@yandex.ru

Новикова Т.А., старший преподаватель, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5951-0174>, email: Halihalo@yandex.ru

Зайцева Я.П., аспирант, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва, email: mitchick@yandex.ru

Information about the authors

Fedorova A.P., Postgraduate Student, Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, email: Alenka.savostina@yandex.ru

Novikova T.A., Senior Lecturer, Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5951-0174>, email: Halihalo@yandex.ru

Zaitseva Ya.P., Postgraduate Student, Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, email: mitchick@yandex.ru

© Федорова А.П., Новикова Т.А., Зайцева Я.П., 2024