

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.В. Неверов

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

Аннотация. В статье описывается установка для ультразвуковой сушки, обладающая улучшенными техническими характеристиками, достигнутыми за счет применения созданных излучателей и сушильной камеры специальной формы. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтвердивших высокую эффективность созданной установки при сушке капиллярно пористых материалов. Показывается, что максимальная эффективность сушки достигается при осуществлении ультразвукового воздействия совместно с подачей нагретого (не более 40°C) сушильного агента.

Ключевые слова: сушка, ультразвук, колебательная система, сушильная камера.

ВВЕДЕНИЕ

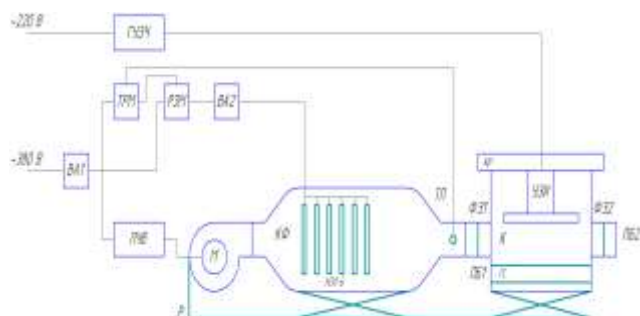
Процесс сушки – достаточно продолжительная и затратная стадия производства конечных изделий и материалов. Кроме того при сушке термолабильных и легкоокисляемых материалов процесс нужно проводить при невысоких температурах или вообще без нагрева высушиваемого материала. Сократить энергозатраты и время сушки при осуществлении процесса при пониженных температурах можно за счет ультразвукового воздействия.

Однако до настоящего времени имеющиеся в научных публикациях данные по эффективности ультразвуковой сушки не позволяют однозначно свидетельствовать о возможности ее промышленного применения.

Это обуславливает актуальность задачи создания экспериментального стенда и проведения исследований эффективности процесса ультразвуковой сушки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Созданные структурные схемы стендов показаны на рисунках 1 и 2. Калорифер осуществляет нагрев с помощью шести электронагревателей. Мощность каждого электронагревателя равна 1,1 кВт. На выходе калорифера расположен термоэлектрический преобразователь. Второй стенд отличается конструкцией сушильной камеры, предназначенной для реализации процесса во взвешенном слое.



ВА1, ВА2 – выключатели автоматические; ГС – горизонтальная сетка;
ГУЗЧ – генератор ультразвуковой частоты; К – камера; КР – крышка;
КФ – калорифер; М – электродвигатель;

НЭ1-6 – нагревательные элементы (шесть штук); ПБ1, ПБ2 – патрубки;

ПЧВ – преобразователь частоты векторный; Р – рама;

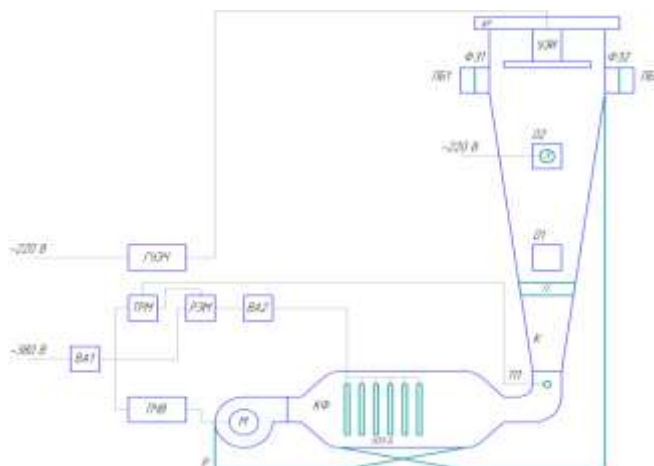
РЭМ – реле электрохимическое;

ТРМ – измеритель-регулятор одноканальный;

УЗИ – ультразвуковой излучатель;

ФЭ1, ФЭ2 – фильтровальные элементы

Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования эффективности сушки с неподвижным материалом



ВА1, ВА2 – выключатели автоматические; ГС – горизонтальная сетка;

ГУЗЧ – генератор ультразвуковой частоты; К – камера; КР – крышка;

КФ – калорифер; Л – LED-фонарь; М – электродвигатель;

НЭ1-6 – нагревательные элементы (шесть штук); О1, О2 – окна;

ПБ1, ПБ2 – патрубки; ПЧВ – преобразователь частоты векторный;

Р – рама; РЭМ – реле электрохимическое;

ТРМ – измеритель-регулятор одноканальный;

УЗИ – ультразвуковой излучатель; ФЭ1, ФЭ2 – фильтровальные элементы

Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования эффективности сушки с подвижным материалом

Фото изготовленного стенда для исследования эффективности процесса низкотемпературной с неподвижным материалом на рисунке 3.



Рис. 3. Фото экспериментального стенда сушки с неподвижным материалом

При достижении требуемого уровня температуры воздушного потока на входе в экспериментальную камеру регулятор генерировал импульс, отключающий электромеханическое реле РЭМ, что приводило к отключению электронагревателей. При этом в общем случае автоматический выключатель ВА2 всегда находился во включенном состоянии. Электроприборы экспериментального стенда подключены к трехфазной электрической сети переменного тока через автоматический выключатель ВА1.

Фото изготовленного стенда для исследования эффективности процесса низкотемпературной сушки дисперсных материалов наложением акустических полей ультразвуковой частоты при различных условиях (температура воздушного потока, наличие ультразвукового акустического поля) показано на рисунке 4.



Рис. 4. Фото экспериментального стенда для исследования эффективности сушки с подвижным материалом

Были исследованы хлопчатобумажная ткань, пробковый материал и опилки эти материалы особенно распространены в быту и на производстве.

В качестве объекта сушки использовалась хлопчатобумажная ткань, размерами 150×250 мм. Общий начальный (влажный) вес составил 382 гр.

На рисунке 5, в виде графика, представлены сравнительные результаты по скорости сушки, полученные с воздействием и без воздействия УЗ колебаний. Время высыхания без УЗ колебаний составила 3 часа 14 минут с УЗ колебаниями 2 часа 49 минут. Из графика на рисунке 5 следует, что воздействие ультразвуковыми колебаниями позволяет увеличить скорость ультразвуковой сушки от 3 до 6 г/мин на один грамм массы высушиваемого образца при температуре 30 градусов Цельсия и скорости сушильного агента 10 м/с.

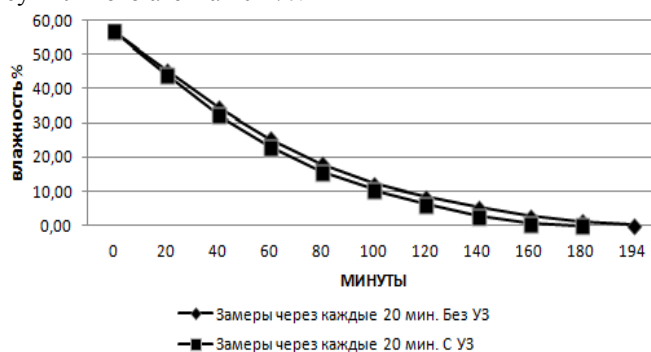


Рис. 5. Зависимости влажности хлопчатобумажной ткани от времени (температура 30 °С)

Ультразвук ускоряет процесс сушка на 13%.

Во втором эксперименте на рисунке 6, температура стенда 55 градусов Цельсия. Время высыхания хлопчатобумажной ткани без УЗ колебаний составила 2 часа 10 минут с УЗ колебаниями 1 час 40 минут соответственно. Скорость ультразвуковой сушки от 4 до 12 г/мин на один грамм массы высушиваемого образца.

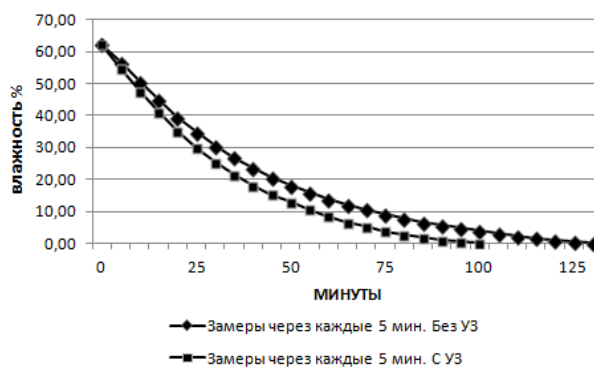


Рис. 6. Зависимости влажности хлопчатобумажной ткани от времени (температура 55 °С)

Ультразвук ускоряет процесс сушка на 23%.

В роли объекта сушки использовался пробковый материал, размерами 150×200 мм. Общий начальный (влажный) вес составил 202,2 гр.

На рисунке 7, в виде графика, представлены сравнительные результаты по скорости сушки, полученные с воздействием и без воздействия УЗ колебаний. Время высыхания без УЗ колебаний составила 38 минут с УЗ колебаниями 28 минут. Из графика на рисунке 7 следует, что воздействие ультразвуковыми колебаниями позволяет увеличить скорость ультразвуковой сушки от 1 до 3 г/мин на один грамм массы высушиваемого образца при температуре 40 градусов Цельсия и скорости сушильного агента 10 м/с.

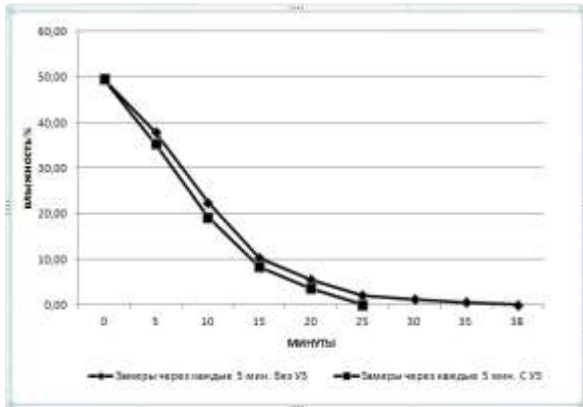


Рис. 7. Зависимости влажности пробкового материала от времени (температура 40 °C)

Ультразвук ускоряет процесс сушка на 23%.

Во втором эксперименте на рисунке 8, температура стенда 55 градусов Цельсия и скорость сушильного агента 10 м/с. Время высыхания хлопчатобумажной ткани без УЗ колебаний составила 22 минут с УЗ колебаниями 15 минут соответственно. Скорость ультразвуковой сушки от 2 до 6 г/мин на один грамм массы высушиваемого образца. При воздействии ультразвуковых колебаний, в высушиваемом материале возникает движение влаги из внутренних слоев материала к поверхностным, в достаточном количестве для ее эффективного удаления. Это препятствует образованию осушенного поверхностного слоя и значительно повышает эффективность сушки в целом.

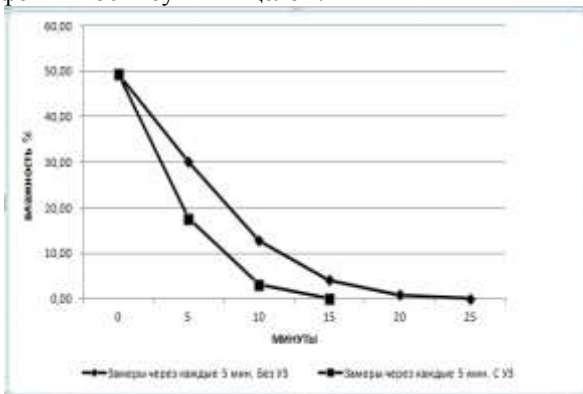


Рис. 8. Зависимости влажности пробкового материала от времени (температура 55 °C)

Ультразвук ускоряет процесс сушка на 30%.

Дальнейшие исследования были направлены на определение зависимости эффективности применения ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры материала.

На рисунке 9 приведены зависимости влажности от температуры сушильного агента при различных видах ультразвукового воздействия на плотный слой опилок (толщина 2 см).

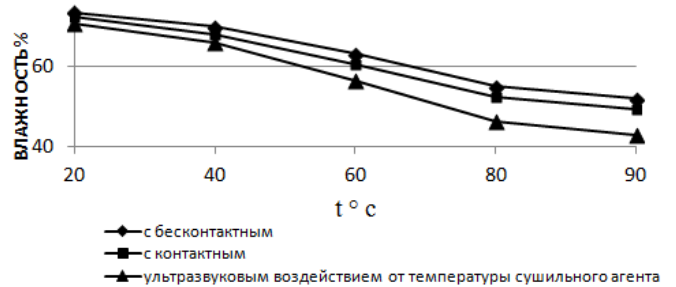


Рис. 9. Зависимости влажности опилок при конвективной сушке

Температура слоя опилок измерялась в трех равноудаленных точках путем погружения термодатчика до середины толщины слоя. Скорость сушильного агента составляла 10 м/с, время сушки во всех случаях равнялась 30 мин. Из представленных зависимостей следует, что применение бесконтактного ультразвукового воздействия обеспечивает незначительное ускорение процесса сушки. Ультразвуковые колебания обеспечивают уменьшение влажности от 1 % при 20 °C (в пределах погрешности измерений) до 2,5 % при температуре сушильного агента выше 60 °C. В случае контактного воздействия эффект от применения ультразвуковых колебаний является более существенным: начиная от 3% (снижение влажности) при 20 °C и до 9% при температуре сушильного агента 90 °C. Это свидетельствует о том, что при контактном ультразвуковом воздействии создаются более благоприятные условия для введения ультразвуковых колебаний в высушиваемый материал. Ультразвуковые колебания способствуют увеличению скорости диффузии влаги на поверхность высушиваемого материала, с одновременным ускорением ее удаления с поверхности материала. Именно этим объясняется значительное (в 3 раза) увеличение эффекта от применения ультразвукового воздействия при увеличении температуры сушильного агента с 20 °C до 90 °C.

Вывод для опилок эффективность ультразвуковой интенсификации процесса сушки оказалась ниже чем для хлопковой ткани и пробкового материала. Это связано с более плотной структурой материала (как самого дерева внутри опилки, так и самого слоя опилок). Поверхность материала и пор взаимодействующих с ультразвуковыми колебаниями в данном случае оказывается недостаточной для интенсификации сушки ультразвуком. Поэтому надо

увеличить поверхность взаимодействия, например, путем перевода материала в дисперсное состояние во взвешенном слое.

Значительно большего эффекта от ультразвукового воздействия можно добиться, осуществляя сушку в дисперсном состоянии (рисунок 10).

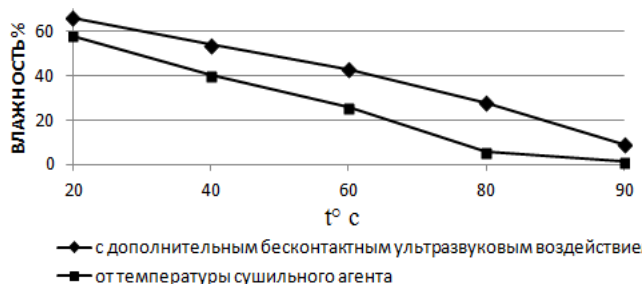


Рис. 10. Зависимости влажности опилок при сушке во взвешенном слое

Скорость сушительного агента во всех экспериментах по сушке во взвешенном слое была постоянной и равной 10 м/с, время проведения каждого эксперимента 10 мин. Как следует из представленных зависимостей, наложение ультразвуковых колебаний на взвешенный слой обеспечивает уменьшение влажности высушиваемого материала, недостижимое при других видах ультразвукового воздействия. Ультразвуковые колебания обеспечивают уменьшение влажности опилок не менее чем на 8% уже при 20 °С. При 80 °С ультразвуковое воздействие снижает остаточную влажность опилок на 22%, при этом масса влаги, дополнительно испаренной за счет воздействия ультразвуковых колебаний, возрастает на 41%. С учетом того, что электрическая мощность, потребляемая калорифером, при нагреве сушительного агента до 80 °С составляла 5,1 кВт, то ультразвуковое воздействие (250 Вт) при увеличении электрической мощности на 5% обеспечило 41% увеличение массы испаряемой влаги. Это делает применение ультразвукового воздействия весьма перспективным для сушки дисперсных материалов. При температуре сушительного агента 90 °С эффект от ультразвукового воздействия снижается (кривая 2). Это обусловлено тем, что влага из высушиваемых опилок практически полностью испарилась (остаточная влажность не превышает 2%), а, следовательно, снизилась скорость сушки и ее прирост за счет ультразвукового воздействия. При сушке без ультразвукового воздействия при 90 °С остаточная влажность составляет 8%. Таким образом, ультразвуковое воздействие позволяет уменьшить время сушки или при равном времени сушки уменьшить температуру сушительного агента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был разработан экспериментальный стенд для проведения исследования процесса ультразвуковой сушки. Все запланированные испытания стенда для реализации процесса низкотемпературной сушки древесных опилок наложением акустических полей ультразвуковой частоты проведены в полном объеме.

Были решены следующие поставленные задачи:

– определена структура экспериментального стенда, которая включает в себя: сушильную камеру, нагреватель, сушительный агент, ультразвуковой излучатель;

– проведенные экспериментальные исследования процесса сушки неподвижных материалов позволили установить, что ультразвуковые колебания позволяют уменьшить время сушки: для хлопчатобумажной ткани ультразвук ускоряет процесс до 23%, для пробкового материала до 30%. При этом увеличение температуры высушиваемого материала с 30 °С до 50 °С приводит к увеличению интенсификации процесса за счет ультразвуковых колебаний с 17% до 23% для хлопчатобумажной ткани и с 24% до 30% для пробкового материала;

– проведенные экспериментальные исследования процесса ультразвуковой сушки дисперсных материалов (на примере древесных опилок) показали, что процесс целесообразно осуществлять во взвешенном слое, при котором УЗ колебания обеспечивают ускорение процесса на 24% (по сравнению: с 2,5% при бесконтактном и 9% контактным ультразвуковым воздействием на уплотненный слой).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Молчанов, Г.И. Ультразвук в фармации // - Москва, Изд-во Медицина, 1980.
2. Аюпян, В.Б., Ершов, Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами // Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии. – Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
3. Хмелев, В.Н., Сливин, А.Н., Барсуков, Р.В., Цыганок, С.Н., Шалунов, А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности // Алт. гос. техн. Ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 2010.
4. Хмелев, В.Н., Попова, О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. // Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1997.
5. Хмелев, В.Н., Леонов, Г.В., Барсуков, Р.В., Цыганок, С.Н., Шалунов, А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. // Алт. гос. техн. Ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 2007.
6. Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Цыганок С.Н., Титов Г.А. Ультразвуковая сушка березового шпона // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 188–192.
7. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А., Доровских, Р.С., Шалунова, А.В. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов

в газовых средах // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы международной научной конференции. – Витебск, Беларусь: УОВГТУ, 2016. – С. 43-45.

8. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 2. Мощные ультразвуковые поля // Академия наук СССР, акустический институт. – Москва: Изд-во Наука, 1968.

9. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А., Зорин С.С. Ультразвуковая интенсификация процесса сушка дисперсных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 1 (25). С. 208-215.

10. Майер, В.В. Простые опыты с ультразвуком // Главная редакция физико-математической литературы. – Москва: Изд-во Наука, 1978.

11. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А. Применение ультразвуковых колебаний для распыления жидкостей // Ультразвук: Проблемы, разработки, Материалы докладов Международной научной конференции (Уфа, Россия, 25-29 сентября 2017 года). – Уфа: РИЦБашГУ, 2017. – С. 80-82.

12. Хмелев, В.Н., Кошелева, М.К., Доровских, Р.С., Голых, Р.Н., Шалунов, А.В., Новикова, Т.А., Нестеров, В.А. Ультразвуковая сушка текстильных материалов // Химическая технология. – 2018. – № 4. – С. 178-185.

13. Хмелев, В.Н., Попова, О.В., Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: монография // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 1997.

14. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Нестеров, В.А. Измерение акустической мощности, вводимой в газовую среду ультразвуковым излучателем // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2017): материалы XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2017. – С. 253-259.

15. Хмелев, В.Н., Цыганок, С.Н., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А. Реализация результатов лабораторных исследований в промышленных масштабах // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2018): межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. – С. 224-228.

16. Хмелев, В.Н., Цыганок С.Н., Нестеров, В.А. Повышение эффективности работы ультразвуковых колебательных систем для кавитационной обработки жидкостей // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2018): межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. – С. 229-233.

17. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Нестеров, В.А. Повышение равномерности амплитуд колебаний анизотропных ультразвуковых дисковых излучателей для газовых сред // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных

исследованиях (ИАМП-2018): межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2018. – С. 284-290.

18. Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Абраменко Д.С. Измерительный прибор параметров ультразвуковой вибрационной системы // В сборнике: 2010 11-я Ежегодная международная конференция и семинар по микро / нанотехнологиям и электронным устройствам, Материалы EDM2010. спонсоры: Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ). 2010. С. 373-375.

19. Рыжова С.Ф., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Барсуков А.Р. Измеритель импедансных характеристик ультразвуковых колебательных систем // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. № 4 (24). С. 153-157

20. Минаков В.Д., Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Лопатин Р.А., Генне Д.В., Нестеров В.А. Стенд для исследования прочностных свойств полимерных композиционных материалов, модифицированных ультразвуковым кавитационным воздействием на сырьевые компоненты. В сборнике: Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2018. С. 89-92.

21. Разработка прототипа ультразвукового устройства для сверления взвешенного грунта Ильченко Е.В., Генне Д.В., Данилов П.Д., Толстов А.А., Пивоваров А.В., Тманаев И.А. Южно-Сибирский научный вестник. 2018. № 4 (24). С. 316-321.

Хмелев Владимир Николаевич – заместитель директора по научной работе БТИ, д.т.н., профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», e-mail: vnh@bti.sectna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – заведующий кафедрой МСИА БТИ АлтГТУ, д.т.н., профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», e-mail: shalunov@bti.sectna.ru.

Нестеров Виктор Александрович – доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», e-mail: nva@bti.sectna.ru.

Неверов Андрей Валерьевич – студент группы МИСТ-91, кафедра МСИА Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: N.A.V.96@mail.ru.

RESEARCH OF THE PROCESS OF ULTRASONIC DRYING

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, A.V. Neverov

Biysk Technological Institute (branch) Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", Biysk

Annotation. The article describes the installation for ultrasonic drying, which has improved technical characteristics achieved through the use of created emitters and a drying chamber of a special form. The results of experimental studies that confirm the high efficiency of the created installation for drying capillary-porous materials are presented. It is shown that the maximum drying efficiency is achieved by ultrasonic exposure together with the supply of a heated (not more than 40 °C) drying agent.

Key words: drying, ultrasound, oscillatory system, drying chamber.

REFERENCES

1. Molchanov, G.I. Ultrasound in pharmacy // - Moscow, Publishing House of Medicine, 1980.
2. Hakobyan, VB, Ershov, Yu.A. Fundamentals of the interaction of ultrasound with biological objects // Ultrasound in medicine, veterinary medicine and experimental biology. - Moscow, Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2005.
3. Khmelev V.N., Slivin A.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. The use of high frequency ultrasound in industry // Alt. state tech. Un-t, BTL. –Biysk: Publishing house Alt. Gos. tech. University, 2010.
4. Khmelev, V.N., Popova, O.V. Multifunctional ultrasonic devices and their use in small production, agriculture and household. // Barnaul: AltSTU Publishing House, 1997.
5. Khmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. Ultrasonic multifunctional and specialized devices for the intensification of technological processes in industry, agriculture and households. // Alt. state tech. Un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. Gos. tech. University, 2007.
6. Khmelev V.N., Khmelev S.S., Tsyganok S.N., Titov G.A. Ultrasonic drying of birch veneer // South Siberian Scientific Bulletin. - 2012. - No. 1. - S. 188-192.
7. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. The use of high-frequency ultrasonic vibrations for the intensification of processes in gaseous media // Technical acoustics: developments, problems, prospects: materials of an international scientific conference. - Vitebsk, Belarus: UOVGTU, 2016. -- S. 43-45.
8. Rosenberg, L.D. Physics and technology of powerful ultrasound. Book 2. Powerful ultrasonic fields // USSR Academy of Sciences, Acoustic Institute. - Moscow: Publishing House of Science, 1968.
9. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Nesterov V.A., Zorin S.S. Ultrasonic intensification of the drying process of dispersed materials // South Siberian Scientific Bulletin. 2019.No 1 (25). S. 208-215.
10. Mayer, V.V. Simple experiments with ultrasound // Main edition of the physical and mathematical literature. - Moscow: Publishing House of Science, 1978.
11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golikh R.N., Nesterov V.A. The use of ultrasonic vibrations for spraying liquids // Ultrasound: Problems, Development, Materials of reports of scientific conferences (Ufa, Russia, September 25-29, 2017). - Ufa: RITSBashGU, 2017. -- S. 80-82.
12. Khmelev V.N., Kosheleva M.K., Dorovskikh R.S., Golikh R.N., Shalunov A.V., Novikova T.A., Nesterov V.A. Ultrasonic drying of textile materials // Chemical technology. - 2018. - No. 4. - S. 178-185.
13. Khmelev, VN, Popova, OV, Multifunctional ultrasound devices and their use in small production, agriculture and household: monograph // Alt. state tech. Un-t, BTL. –Biysk: Publishing house Alt. Gos. tech. University, 1997.
14. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. Measurement of acoustic power introduced into a gas medium using an ultrasonic emitter // Measurements, Automation and Modeling in Industrial and Scientific Research (IAMP - 2017): materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference of undergraduate and graduate students and young scientists with the participation of MS. Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2017. -- S. 253-259.
15. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Golikh R.N., Nesterov V.A. Implementation of the results of laboratory research on an industrial scale // IAMP-2018: inter-university collection / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 224-228.
16. Khmelev, V.N., Tsyganok S.N., Nesterov, V.A. Improving the performance of ultrasonic vibrational systems for cavitation treatment of liquids // Measurements, Automation and Modeling in Industry and Scientific Research (IAMP-2018): Interuniversity digest / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 229-233.
17. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. Improving the uniformity of the amplitude of oscillations of anisotropic ultrasonic disk emitters for gaseous media // Measurements, Automation and Modeling in Industry and Scientific Research (IAMP-2018): Interuniversity digest / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 284-290.
18. Barsukov R.V., Ilchenko E.V., Abramenko D.S. The measuring instrument of the parameters of the ultrasonic vibration system // In the collection: 2010 11th Annual International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnology and Electronic Devices, Materials EDM'2010. sponsors: Russian Foundation for Basic Research (RFBR). 2010.S. 373-375.
19. Ryzhova S.F., Barsukov R.V., Ilchenko E.V., Genne D.V., Abramenko D.S., Barsukov A.R. The meter of impedance characteristics of ultrasonic oscillatory systems// South Siberian Scientific Bulletin. 2018.No 4 (24). S. 153-157
20. Minakov V.D., Golikh R.N., Khmelev V.N., Lopatin R.A., Genne D.V., Nesterov V.A. A stand for studying the strength properties of polymer composite materials modified by ultrasonic cavitation for raw materials. In the collection: Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists with international participation. 2018.S. 89-92.
21. Development of a prototype ultrasonic device for drilling extraterrestrial soil Ilchenko E.V., Genne D.V., Danilov P.D., Tolstov A.A., Pivovarov A.V., Manaev I.A. South Siberian Scientific Bulletin. 2018.No 4 (24). S. 316-321.

Khmelev Vladimir Nikolaevich - Deputy Director for Research, BTL, Doctor of Technical Sciences, Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Shalunov Andrei Viktorovich - Head of the Department of Information Technologies and Mechanics, Altai State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunova ", e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Nesterov Victor Aleksandrovich - Associate Professor of the Department of Information Technologies and Mechanics, Altai State Technical University, Biological Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunova ", e-mail: nva@bti.secna.ru.

Neverov Andrey Valerievich - student of the group MIST-91, Department of MSIA Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I. I. Polzunov, e-mail: N.A.V.96@mail.ru.