

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ (УЛЬТРАЗВУКОВОЙ) СУШКИ ВЕЩЕСТВ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, П.П. Тертишников

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

В статье показаны исследования процесса сушки веществ под воздействием высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний. В ней описываются преимущества ультразвуковой сушки веществ и возможности ее практической реализации. В результате работы предложена и разработана ультразвуковая сушилка, пригодная для практической реализации ультразвуковой сушки веществ.

Ключевые слова – Ультразвуковая сушилка, сушеный горох, излучатель, полимерные гранулы, агент сушки

ВВЕДЕНИЕ

Сушка твердых, сыпучих и других материалов является наиболее востребованным технологическим процессом, поскольку определяет качество конечного продукта, обеспечивает его длительное хранение и восстановление.

Процесс сушки заключается в удалении влаги из материала. Обычно это осуществляется за счет нагревания. В большинстве случаев в качестве теплоносителя используется воздух, нагреваемый до высоких температур.

К сожалению, при сушке многих химических продуктов, биологических объектов, удобрений, нельзя проводить сушку при повышенных температурах, т.к. вещества либо разлагаются, либо теряют свои полезные, бактерицидные свойства.

Поэтому, в последние годы широкое развитие получает технология акустической (ультразвуковой) сушки. Ультразвуковое воздействие высокой интенсивности позволяет интенсифицировать оба периода процесса сушки.

К сожалению, отсутствие теоретических и экспериментальных исследований процесса акустической сушки не позволили до настоящего времени создать промышленное и полупромышленное оборудование.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа посвящена исследованиям, способным частично восполнить отсутствие специального оборудования для акустической сушки.

Для получения практических результатов и рекомендаций по промышленному применению акустической сушки была поставлена задача осуществить серию экспериментов с применением поставленной Заказчиком сушильной камеры, созданного ультразвукового оборудования и

дополнительного вспомогательного оборудования для исследования процесса акустической (ультразвуковой) сушки различных веществ, на примере сушеного гороха и полимерных гранул.

Конечной целью исследований является выявление оптимальных режимов и условий режимов сушки в модернизированной при помощи ультразвукового оборудования сушильной установки на основе анализ сравнительных зависимостей результатов экспериментов сушки веществ теплом и сушки с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности при одновременном тепловом воздействии.

Когда нельзя допускать превышения температуры при сушке, сушку осуществляют под воздействием ультразвуковых колебаний. Первые результаты были получены еще в 1955 г. П. Грегушем (Венгрия). На частоте 25 кГц он получил 10-кратное ускорение сушки мокрого хлопкового волокна. Позже им было получено ультразвуковое ускорение сушки древесины [1-9].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Процесс сушки состоит из двух основных периодов. Первый заключается в испарении влаги с поверхности материала и диффузии пара в окружающее пространство. Испарение влаги приводит к тому, что в материала создается градиент влажности, в результате чего влага из внутренних слоев начинает перемещаться на поверхность. Это и есть второй период.

Ультразвуковое воздействие высокой интенсивности позволяет интенсифицировать оба периода процесса сушки.

В течение первого периода сушки колебания позволяют уменьшить толщину гидродинамического пограничного слоя. В акустическом поле

гидродинамический пограничный слой может быть существенно меньше диффузионного. Это значит, что колебания проникают внутрь диффузионного слоя, турбулизируют его, тем самым ускоряют процесс испарения [10-14]. Наряду с уменьшением толщины пограничного слоя ультразвуковой метод сушки обладает еще одним важным преимуществом – колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности во втором периоде сушки. Другими действующими факторами ультразвукового воздействия являются: уменьшение вязкости жидкости под действие колебаний, что способствует переносу влаги из глубинных слоев к поверхности; выдавливание влаги из материала кавитационными пузырьками, возникающими в жидкости под действием колебаний; радиационное давление, выдавливающее жидкость из материала и др. Все рассматриваемые действующие факторы представлены на (рис.1).



Рис. 1. Действующие факторы ультразвуковой сушки

Меньшие энергетические затраты акустической сушки, по сравнению с конвективной, объясняются тем, что жидкость с поверхности удаляется не только за счет испарения (что требует значительных энергетических затрат на осуществление фазового перехода), но и за счет ультразвукового распыления в виде аэрозоля (без фазового перехода), который возникает в результате высокоинтенсивных упругих колебаний ультразвуковой частоты.

Поэтому акустическая сушка при сопоставимой мощности энергетического воздействия протекает в несколько раз быстрее по сравнению с конвективной сушкой.

Сушка в ультразвуковом поле происходит без нагрева материала. Именно поэтому это единственный способ сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов [15-26].

Специально разработанный стенд для проведения исследований состоял из:

- Стандартной тепловой сушилки;
- Ультразвукового технологического аппарата УЗАГС 0,2/22-О «Соловей»

Для измерений использовалось следующее оборудование:

- Устройство контроля влажности воздуха на базе стандартного измерителя марки ДНТ11;
- Весы лабораторные для измерения веса продукта марки Масса-К ПВ-6;
- Контроль температуры в объеме сушильной камеры осуществлялся с помощью термометра сопротивления;

Сушка осуществлялась при уставке температуры 105°C.

Перед проведением экспериментов были измерены характеристики распределения уровня звукового давления в пустом объеме сушильной камеры.

Уровень звукового давления измерялся с помощью измерителя шума и вибраций Ассистент СИУ 30. На (рис. 2) схематично представлены точки и результаты контроля уровня звукового давления вдоль оси камеры.

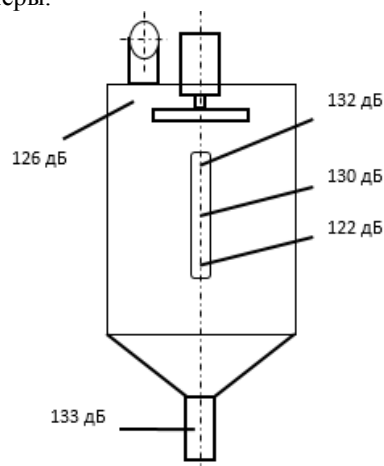


Рис. 2. Точки контроля уровня звукового давления

Устройство сушилки представлено на рис. 3.



- 1 - труба выхода воздуха; 2 - вентилятор;
- 3 - блок управления; 4 - труба горячего воздуха;
- 5 - сепаратор; 6 -разделитель воздуха;
- 7 - сушильная камера

Рис. 3. Устройство сушильной установки

Все экспериментальные исследования проводились в специально отведенном помещении, в котором влажность воздуха была в пределах 20-22%.

Для контроля влажности подаваемого в сушилку воздуха в ходе эксперимента был разработан гигрометр на основе датчика ДНТ11. В табл. 2 будут приведены его основные технические характеристики.

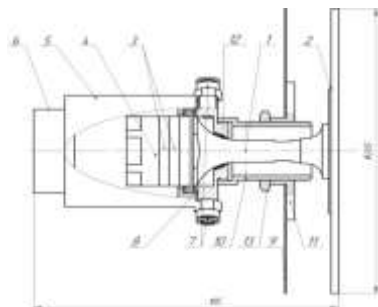
Таблица 2 - основные технические характеристики гигрометра

Параметры		ДНТ 11
Питание	мин.	3В
	макс.	5,5В
Потребляемый ток	мин.	0,1мА
	макс.	2,5мА
Измерение влажности	мин.	20%
	макс.	80-95%
	точность.	5%
Измерение температура	мин.	0°C
	макс.	+50°C
	точность.	±2
Частота измерений	-	1Гц

Для создания ультразвукового воздействия предложен и разработан пьезоэлектрический излучатель, конструкция которого представлена на рис. 4.

Он представляет собой излучатель в виде плоского диска, соединенного с электроакустическим преобразователем.

Технические характеристики изготовленного ультразвукового фокусирующего излучателя приведены в таб. 3.



- 1 – излучающая накладка –концентратор;
 2 – ультразвуковой дисковый излучатель;
 3 – пьезокерамические кольца (50x20x6);
 4 – отражающая накладка; 5 – корпус;
 6 – вентилятор; 7 – штуцеры для ОЖ;
 8 – фланец пьезоэлектрического преобразователя (охлаждающая рубашка);
 9 – пластина крышки сушильной установки;
 10 – регулировочная трубка;
 11 – фланец пластины; 12 – уплотнительные кольца;
 13 – контргайка

Рис. 4. Конструкция ультразвукового дискового излучателя
 Таблица 3 - Технические характеристики фокусирующего ультразвукового излучателя

Наименование параметра	Значение
Размер излучателя, мм	Ø190
Максимальный уровень звукового давления (1 м), дБ	140
Частота колебаний, кГц	22±0,5
Потребляемая мощность, ВА, не менее	200

Для охлаждения пьезопреобразователя использована система воздушного и жидкостного охлаждения.

Для питания излучателя разработан электронный блок – генератор, обеспечивающий стабилизацию амплитуды, поддержания соответствия частоты питающего напряжения собственной резонансной частоты излучателя.

Созданный стенд далее был использован для исследования процесса сушки.

Целью проводимого исследования является подтверждение эффективности ультразвукового воздействия в процессе сушки для увеличения скорости сушки и возможно других показателей.

С помощью загрузочно-разгрузочного устройства сушильной установки ее объем заполняют высушиваемым материалом. Затем осуществляют воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности до момента удаления необходимого количества влаги из материала. Во-первых, они позволяют уменьшить толщину гидродинамического пограничного слоя. Во-вторых, они проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности. Во время сушки с помощью ультразвуковых колебаний внутри сушильной камеры создается конвекция, за счет того, что в объем сушильной установки происходит забор воздуха из окружающего пространства поз.2, рис.2, затем он нагревается в поз.4, рис.4 до определенной температуры, после чего отработанный воздух удаляется из поз.1, рис.2.

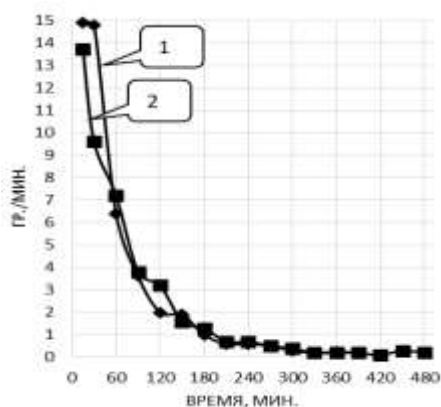
Для оценки возможностей и эффективности представленной сушилки и созданного ультразвукового оборудования были проведены эксперименты по сушке гороха. Для исследований было взято 3980 гр. сухого гороха, которые были замочены в 1 литре воды. Процесс замачивания в воде длился 24 часа. Для исключения потери влаги во внешнюю среду емкость с водой и горох был загерметизирован стретч-пленкой в течении всех 24 часов.

После проведенных экспериментов и получения всех необходимых данных для сравнения двух

способов сушки, были составлены сравнительные графики, на которых видно, какой способ сушки быстрее.

Далее будут приведены сравнительные графики двух способов сушки, а именно сушки теплом и сушки теплом с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности, как изменялась скорость сушки и как изменялась масса в этих двух способах сушки.

На рис. 5 представлено сравнение скоростей во время сушки.

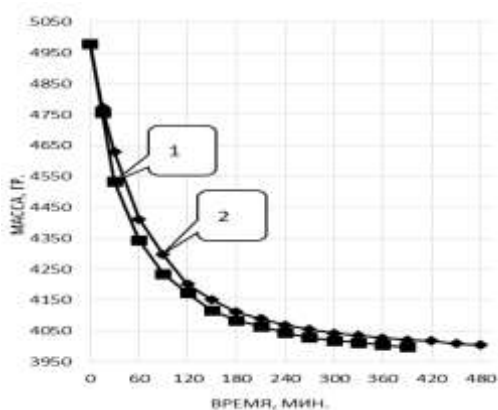


1 - Сушка с УЗ; 2 - Сушка без УЗ

Рис. 5. Сравнительные изменения скоростей сушки

При сушке гороха с помощью ультразвукового воздействия скорость самой сушки была на 1гр./мин. быстрее, чем сушка гороха без ультразвукового воздействия. В первые 30 минут сушки с ультразвуковыми колебаниями, скорость была максимальной и превышала скорости сушки без ультразвукового воздействия. После чего скорость сушки с ультразвуковым воздействием упала и стала идти медленнее, чем сушка без него. Это объясняется тем, что в первые 30 минут при сушке с ультразвуковым воздействием было изначально удалено большее количество влаги.

Рис. 6 показывает сравнение сушки мокрого гороха по массе.



1 - Сушка с УЗ; 2 - Сушка без УЗ

Рис. 6. Сравнительные изменения массы

По сравнительному графику изменения масс видно, что благодаря ультразвуковому воздействию высокой интенсивности во время сушки, удалось сократить само время сушки на полтора часа.

Таким образом, при сушке гороха с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности удалось добиться аналогичной массы при сушке без ультразвукового воздействия на 20% быстрее.

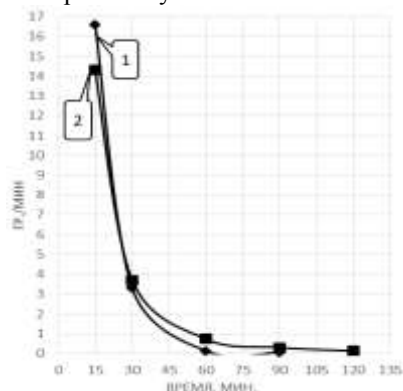
Дальнейшие эксперименты были проведены на представленных Заказчиком образцах полимерных гранул и проведены при малой загрузке сушильной установки для определения эффективности сушки. Масса одной гранулы составляет порядка 16 мг.

Для проведения данного эксперимента было взято 5185 г. сухих полимерных гранул, которые были замочены в 1 литре воды, после чего гранулы в воде настаивались 24 часа, а после этого полимерные гранулы были перемешаны для равномерного распределения влаги по их поверхности. На поверхности гранул осталось 305 гр. воды, остальные 695 гр. воды были удалены.

После проведенных экспериментов и получения всех необходимых данных для сравнения двух способов сушки полимерных гранул, были составлены сравнительные графики, на которых видно, какой способ сушки быстрее.

Далее будут приведены сравнительные графики двух способов сушки, а именно сушки теплом и сушки теплом с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности, как изменялась скорость сушки и как изменялась масса полимерных гранул в этих двух способах сушки.

Рис. 7 показывает сравнительную зависимость изменения скоростей сушки.



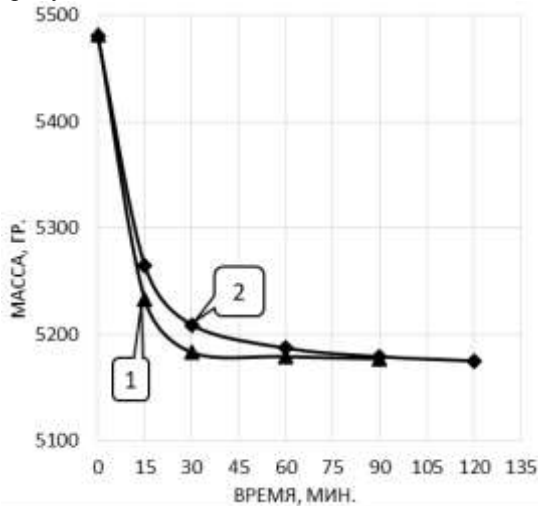
1 - Сушка с УЗ; 2 - Сушка без УЗ

Рис. 7. Сравнительные изменения скоростей сушки

При сушке полимерных гранул с помощью ультразвуковых колебаний скорость сушки была на 1,5 гр./мин. выше, чем при сушке без ультразвукового воздействия. Максимальная скорость сушки при помощи акустического воздействия достигается в первые 15 минут и превышает скорость сушки без него, после чего скорость резко падает: это

обуславливается тем, что за первые 15 минут сушки было удалено большое количество влаги.

Рис. 8 показывает сравнение сушки полимерных гранул по массе.



1 - Сушка с УЗ; 2 - Сушка без УЗ

Рис. 8. Сравнительные кривые изменения масс полимерных гранул

По сравнительному графику изменения масс видно, что благодаря УЗ-воздействию во время сушки, удалось сократить само время сушки на полчаса.

Таким образом, при сушке полимерных гранул с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности удалось добиться аналогичной массы при сушке без ультразвукового воздействия на 25% быстрее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить высокую эффективность ультразвукового воздействия во время сушки материалов. Из исследования, проведенного на специализированном оборудовании, по применению ультразвуковых колебаний высокой мощности для сушки различных видов веществ можно сделать следующие выводы:

— Сушка при помощи ультразвукового воздействия в купе с тепловым идет примерно на 20-25% быстрее по сравнению с сушкой без ультразвукового воздействия.

— Применение мощного ультразвукового воздействия в прямом контакте с высушиваемыми объектами, оказалось очень эффективной процедурой обезвоживания экспериментальных образцов.

— Процедура сушки с помощью ультразвукового воздействия высокой интенсивности полезна для обезвоживания овощей в качестве метода консервирования пищевых продуктов без ущерба для их основных характеристик и качества.

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., Педдер, В.В., Нестеров, В.А. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвуковой экстракции жидкой фазы из капиллярно-пористой системы и создание средств для её реализации // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. – Бийск: АлтГТУ, 2015. – С. 7–11.
8. 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.
9. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 2. Мощные ультразвуковые поля // Академия наук СССР, акустический институт. – Москва: Изд-во Наука, 1968.
10. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А., Зорин С.С. Ультразвуковая интенсификация процесса сушки дисперсных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 1 (25). С. 208-215.
11. Майер, В.В. Простые опыты с ультразвуком // Главная редакция физико-математической литературы. – Москва: Изд-во Наука, 1978.
12. 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.
13. 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.
14. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 3. Физические основы ультразвуковой технологии// Академия наук СССР, акустический институт. – Москва: Изд-во Наука, 1970.
15. 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.
16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Нестеров, А.А., Нестеров, В.А. Ультразвуковые дисковые излучатели при высоких температурах // 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. 212-218.

21. Хмелев, В.Н., Шалунов, А.В., Зорин, С.С., Голых, Р.Н., Нестеров, В.А. Ультразвуковая интенсификация процесса сушки дисперсных материалов // 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. 148-155.

22. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 1. Источники мощного ультразвука // Академия наук СССР, акустический институт. – Москва: Изд-во Наука, 1967.

23. Павлов, С.А., Голубкович, А.В. Исследование процесса ультразвуковой сушки зерна // Труды международной научно-технической конференции Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2012. Т. 2. С. 154-157.

24. Кожухов, В.А., Себин, А.В., Ушкалов, В.Ю. Сушка зерна в виброкипящем слое с использованием ультразвуковой и СВЧ энергии // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития материалы международной научно-практической конференции. Красноярский государственный аграрный университет. 2017. С. 83-87.

25. Корныльев, М.Г., Ковальногов, В.Н., Карпухина, Т.В. Математическое моделирование процесса конвективной сушки в ультразвуковом поле // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова. 2016. С. 342-345.

26. Марущак, А.С., Жерносек, С.В., Ольшанский, В.И. Перспективы применения акустических колебаний ультразвукового диапазона в процессе сушки текстильных материалов // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности материалы докладов международной научно-технической конференции, посвященной Году науки. Витебский государственный технологический университет. 2017. С. 63-66.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., профессор, заведующий каф. МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ

ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.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», тел (3854) 432570 e-mail: nva@bti.secna.ru.

Тертишников Павел Павлович - студент группы ПС-81, кафедра МСИА Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +79237558922, e-mail: terishnikov.paw@yandex.ru

STAND FOR RESEARCH OF ACOUSTIC (ULTRASONIC) DRYING OF SUBSTANCES

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, P.P. Tertishnikov

Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU

Abstract – The article shows the study of the process of drying substances under the influence of high-intensity ultrasonic vibrations. It describes the advantages of ultrasonic drying of substances and the possibility of its practical implementation. As a result of work the ultrasonic dryer suitable for practical realization of ultrasonic drying of substances is offered and developed

Index terms: Ultrasonic drying, dried peas, emitter, polymer granules, drying agent

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-intensity 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 ultrasound devices and their application in small industrial, agricultural and household conditions. // 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., Pedder, V.V., Nesterov, V.A. Identification of optimal conditions and conditions for ultrasonic extraction of a liquid phase from a capillary-porous system and creation of means for its implementation // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of undergraduate, graduate students and young scientists with international participation. - Biysk: AltSTU, 2015. -S. 7–11.
8. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golikh, R.N., Nesterov, V.A., Dorovskikh, R.S., Shalunova, A.V. The use of high-intensity 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.
9. 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.
10. 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.
11. Mayer, V.V. Simple experiments with ultrasound // Main edition of the physical and mathematical literature. - Moscow: Publishing House of Science, 1978.
12. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Golikh, R.N., Nesterov, V.A. The use of ultrasonic vibrations for spraying liquids // Ultrasound: Problems, Developments, Materials of reports of the International Scientific Conference (Ufa, Russia, September 25-29, 2017). - Ufa: RITSBashGU, 2017. -- S. 80-82.
13. Khmelev, V.N., Kosheleva, M.K., Dorovsky, 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.
14. Rosenberg, L.D. Physics and technology of powerful ultrasound. Book 3. Physical foundations of ultrasound technology // USSR Academy of Sciences, Acoustic Institute. - Moscow: Publishing House of Science, 1970.
15. Khmelev, V.N., Popova, O.V., Multifunctional ultrasound devices and their use in small-scale production, agriculture and household: monograph // Alt. state tech. Un-t, BTL. –Biysk: Publishing house Alt. Gos. tech. University, 1997.
16. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. Measurement of acoustic power introduced into the gas medium by an ultrasonic emitter // Measurements, Automation and Modeling in Industry and Scientific Research (IAMP – 2017): materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference of undergraduate and graduate students and young scientists with international participation. Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2017. -- S. 253-259.
17. Khmelev, V.N., Tsyganok, S.N., Naked, R.N., Nesterov, V.A. Implementation of laboratory research results on an industrial scale // Measurements, automation and modeling in industry and scientific research (IAMP-2018): interuniversity collection / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 224-228.
18. 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.
19. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, V.A. Improving the uniformity of vibration amplitudes 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.
20. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Nesterov, A.A., Nesterov, V.A. Ultrasonic disk emitters at high temperatures // Measurements, automation and modeling in industry and scientific research (IAMP-2018): interuniversity collection / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 212-218.
21. Khmelev, V.N., Shalunov, A.V., Zorin, S.S., Golikh, R.N., Nesterov, V.A. Ultrasonic intensification of the drying process of dispersed materials // Measurements, automation and modeling in industry and scientific research (IAMP-2018): interuniversity collection / Alt. state tech. un-t, BTL. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2018. -- S. 148-155.

22. Rosenberg, L.D. Physics and technology of powerful ultrasound. Book 1. Sources of powerful ultrasound // Academy of Sciences of the USSR, Acoustic Institute. - Moscow: Publishing House of Science, 1967.

23. Pavlov, S.A., Golubkovich, A.V. Investigation of the process of ultrasonic drying of grain // Transactions of the International Scientific and Technical Conference Energy Supply and Energy Saving in Agriculture. 2012.Vol. 2.P. 154-157.

24. Kozhukhov, V.A., Sebin, A.V., Ushkalov, V.Yu. Drying grain in a boiling layer using ultrasonic and microwave energy // Science and Education: Experience, Problems, Development Prospects materials of an international scientific and practical conference. Krasnoyarsk State Agrarian University. 2017.S. 83-87.

25. Kornilyev, MG, Kovalnov, V.N., Karpukhina, T.V. Mathematical modeling of the convective drying process in an ultrasonic field // PROBLEMS OF HEAT AND MASS EXCHANGE AND HYDRODYNAMICS IN POWER ENGINEERING Materials of the X school-seminar of young scientists and specialists of the academician of the Russian Academy of Sciences V.E. Alemasov. 2016.S. 342-345.

26. Marushchak, A.S., Zhernosek, S.V., Olshansky, V.I. Prospects for the use of ultrasonic acoustic vibrations in the drying process of textile materials // INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE TEXTILE AND EASY INDUSTRY Materials of reports of the international scientific and technical conference dedicated to the Year of Science. Vitebsk State Technological University. 2017.S. 63-66.

Vladimir Nikolayevich Khmelev - Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute (Branch) ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432581 e-mail: vnk@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. MSIA, Biysk Technological Institute (branch) of ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Nesterov Victor Alexandrovich - associate Professor of the Department MSIA BTI AltSTU, Ph. D., Biysk Institute of technology (branch) fgbou VO "Altai state technical University. I. I. Polzunova", tel (3854) 432570 e-mail: nva@bti.secna.ru.

Tertishnikov Pavel Pavlovich-student of PS-81 group, Department of MSIA of Biysk technological Institute (branch) of Altai state technical University. I. I. Polzunova", tel.: +79237558922, e-mail: tertishnikov.paw@yandex.ru