

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Хмелёв<sup>1</sup>, А.В. Шалунов<sup>1</sup>, С.С. Зорин<sup>2</sup>, Р.Н. Голых<sup>1</sup>, В.А. Нестеров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», г. Бийск

<sup>2</sup>ООО «Бочкаревский пивоваренный завод»

Статья посвящена практическому исследованию ультразвуковой интенсификации процесса сушки древесных опилок. Подробно рассмотрены общие закономерности кинетики сушки и определены основные технологические параметры, влияющие на эффективность применения ультразвукового воздействия в процессе сушки.

*Ключевые слова* – сушка, опилки, ультразвук, интенсификация, взвешенный слой.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности (опилки, стружка и т.д.) является весьма актуальной в связи с их большими объемами. Кроме того, существует возможность извлечения прибыли при переработке отходов в готовые изделия, например, топливные брикеты. Основным фактором, препятствующим широкому внедрению переработки древесных опилок, является необходимость снижения их влажности до значений не более 10% масс за счет сушки. К сожалению, используемые в настоящее время способы сушки опилок (конвективный, инфракрасный и т.д.) имеют общие недостатки: высокое энергопотребление (более 20 МДж тепловой энергии на 1 тонну высушиваемых опилок), высокая вероятность термического разложения древесины, а так же опасность взрыва древесной пыли при температуре более 150°C.

Приведенные недостатки обусловлены не низким уровнем проработанности конструктивных решений, а присутствием принципиальных ограничений в высокотемпературном воздействии, положенном в основу используемых сушилок.

Очевидно, что снижение требуемой для сушки температуры возможно за счёт интенсификации процесса испарения на границе «газ-жидкость» и ускорения миграции влаги из капилляров древесных опилок на поверхность [1-5].

Один из перспективных способов интенсификации процесса испарения на границе «газ-жидкость» и ускорения миграции влаги из внутренних слоёв ткани на поверхность – воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями [6-12].

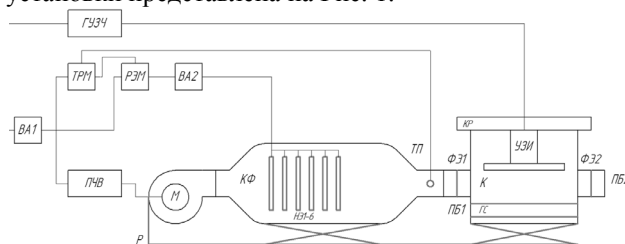
В рамках настоящего исследования решаются следующие основные задачи:

1) экспериментальное определение принципиальной возможности ускорения процесса сушки опилок, наложением УЗ колебаний;

2) определение режимов и условий реализации процесса сушки опилок с наложением УЗ полей.

## АНАЛИЗ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ ОПИЛОК В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Для подтверждения принципиальной возможности УЗ интенсификации процесса сушки и выявления общих закономерностей кинетики сушки были проведены эксперименты в неподвижном слое. Эксперименты по УЗ сушке в неподвижном слое, осуществлялись в малом объеме, размером 500x300x300 мм. Разработанная конструктивная схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1.



ВА1, ВА2 – выключатели автоматические; ГС – горизонтальная сетка (ограничивает выход опилок за пределы камеры);

ГУЗЧ – генератор ультразвуковой частоты; К – камера; КР – крышка; КФ – калорифер; М – электродвигатель (вместе с ПЧВ генерирует поток сушильного агента); НЭ1-6 – оребренные электронагреватели для газовых сред трубчатого типа (по 1,1 кВт); ПБ1, ПБ2 – патрубки; ПЧВ – преобразователь частоты векторный; Р – рама; РЭМ – реле электромагнитное; ТП – терморезистор хромель-копель; ТРМ – измеритель-регулятор одноканальный; УЗИ – ультразвуковой излучатель; ФЭ1, ФЭ2 – фильтровальные элементы; все элементы корпуса теплоизолированы базальтовой ватой и нетканым материалом

**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования эффективности сушки в неподвижном слое

Эксперименты проводились в камере К цилиндрической формы (высота 300 мм, диаметр 380 мм), в полости которой размещен рабочий инструмент ультразвукового излучателя УЗИ. При этом излучатель закреплен на металлической крышке (диаметр 550 мм), препятствующей выходу воздушного потока. Электрический сигнал для питания УЗИ вырабатывался генератором ГУЗЧ.

Поток сушильного агента создавался вентилято-

ром центробежного типа, частота вращения электродвигателя которого регулировалась посредством векторного преобразователя частоты ОВЕН. Сушильный агент подавался в экспериментальную камеру К через полость калорифера КФ, где осуществлялся его нагрев до заданной температуры.

Для создания ультразвуковых колебаний был разработан и изготовлен специализированный ультразвуковой дисковый излучатель (Рис. 2), позволяющий создать уровень звукового давления в сушильной камере 140...150 дБ (рабочая частота 22 кГц) [13-17]. Представленный УЗ излучатель для газовых сред применяется в различных областях промышленности [18-32].

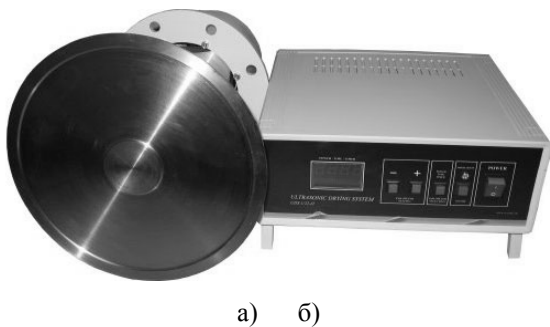


Рис. 2. Ультразвуковой технологический аппарат для интенсификации процесса ультразвуковой сушки: а) дисковый излучатель; б) электронный генератор

Использование изгибных колебаний диска обеспечивает увеличение выхода энергии (более 65%) в газовую среду, а излучение с поверхности участков различной толщины обеспечивает когерентность излучаемых УЗ волн [17].

Для определения характеристик ультразвукового поля в объёме сушильной камеры производились измерения уровня звукового давления в разных её точках. Согласно результатам проведённых измерений, уровень звукового давления во всей зоне сушки составляет не менее 140 дБ, что является достаточным для интенсификации процесса испарения влаги с поверхности опилок. Таким образом, созданный УЗ излучатель является пригодным для интенсификации процесса сушки в изготовленной экспериментальной установке.

Измерения эффективности процесса низкотемпературной сушки древесных опилок с наложением акустических полей ультразвуковой частоты проводились сериями из трех опытов.

При проведении экспериментов воздействие на высушиваемый материал ультразвуковыми колебаниями осуществлялось двумя способами: бесконтактно через воздух и контактно, при непосредственном воздействии излучателя на высушиваемый слой опилок.

Масса порции опилок для исследований была принята равной 200 г. При этом обеспечивался небольшой поток воздуха скоростью 3 м/с, не допускающий

витания сыпучей фракции.

При этом в пределах каждой серии выполнялась следующая последовательность действий:

1) проводилась очистка камеры от остатков древесных опилок и пыли (при необходимости);

2) устанавливались требуемые для опыта значение температуры и расход сушильного агента;

3) после установления требуемой температуры (20°С) в экспериментальную камеру загружалась опытная порция влажных древесных опилок. Требуемый вес опилок отмерялся на аналитических электронных весах MW-II.

4) в предварительно закрытую камеру подавался поток сушильного агента, одновременно с его подачей включался таймер равный 10 мин, определяющий время экспозиции. При необходимости, одновременно с нагревом и подачей сушильного агента включался излучатель ультразвуковых колебаний;

5) по истечении времени проведения эксперимента содержимое сушильной камеры извлекалось для повторного взвешивания.

б) определялось остаточное влагосодержание опилок по выражению:

$$W = \frac{M_{CP} - M_{C.M.}}{M_{C.M.}} \times 100,$$

где  $M_{C.M.}$  – вес сухой массы опилок в порции,  $M_{CP}$  – средний вес сухих опилок после сушки в соответствующем опыте.

В результате проведения экспериментов было установлено, что применение ультразвукового воздействия обеспечивает повышение эффективности процесса сушки древесных опилок до 4%. Что подтверждается данными, представленными в Табл. 1. Однако скорость удаления влаги не превышает 13 г за 10 мин для порции опилок массой 200 г. Это объясняется малым проникновением ультразвуковых колебаний в слой высушиваемых опилок. В результате, интенсификация процесса сушки происходит только в самом верхнем слое опилок, непосредственно граничащих с газовой средой.

Табл. 1. Усредненные экспериментальные данные сушки в неподвижном слое

Условия эксперимента		Вес после сушки, г	Влагосодержание, %	Прирост эффективности при УЗ воздействии
Расстояние до диска, мм	Наличие УЗ (да/нет)			
300,0	нет	187,7	261,0	1,03
300,0	да	184,3	254,4	
0,0	нет	198,0	280,8	1,04
0,0	да	192,5	270,2	

Указанной скорости недостаточно для обеспечения производительности сушки, требуемой для промышленных установок (как правило, не менее 1 т/ч).

Для определения возможности дальнейшего повышения эффективности сушки были проведены эксперименты при непосредственном контакте опилок с ультразвуковым излучателем. Такой способ обеспечивает введение большей акустической энергии в слой опилок.

На основании полученных результатов было установлено, что при непосредственном контакте опилок с УЗИ эффективность процесса увеличивается лишь на 30% (при УЗ воздействии за 10 мин удаляется 17 г влаги по сравнению с сушкой без УЗ воздействия).

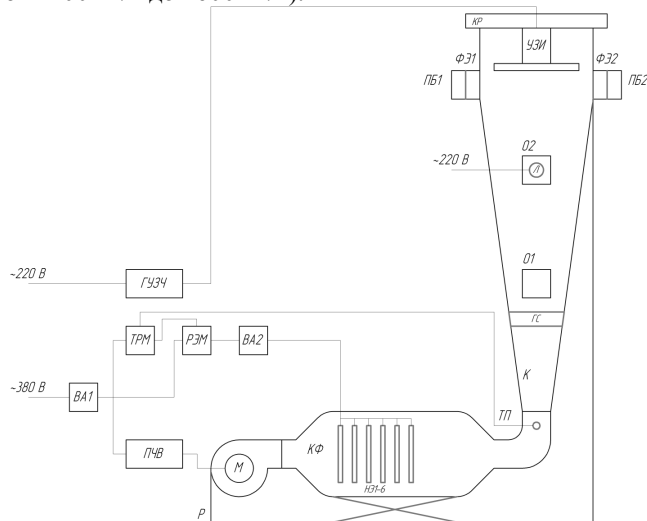
Однако полученного значения скорости удаления влаги также недостаточно для обеспечения промышленной производительности сушки не менее 1 т/ч.

Полученные результаты объясняются недостаточной поверхностью взаимодействия опилок с сушильным агентом (воздухом) при сушке в неподвижном слое. Поэтому необходимо увеличить площадь взаимодействия опилок и сушильного агента.

Многokратного увеличения поверхности взаимодействия опилок и сушильного агента можно достичь путём создания взвешенного слоя. Результаты экспериментов по сушке во взвешенном слое описаны далее.

### АНАЛИЗ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ ОПИЛОК ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ

Для проведения исследования эффективности процесса низкотемпературной сушки древесных опилок во взвешенном слое при наложении акустических полей ультразвуковой частоты лабораторный стенд был модифицирован (Рис. 3 и 4). Рассмотренная выше методика измерений дополнена инициацией процесса витания опилок потоком сушильного агента (расход от 1100 м<sup>3</sup>/ч до 1600 м<sup>3</sup>/ч).



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 – патрубki; ПЧВ – преобразователь частоты векторный; Р – рама; РЭМ – реле электромеxаническое; ТРМ – измерительный регулятор одноканальный; УЗИ – ультразвуковой излучатель; ФЭ1, ФЭ2 – фильтровальные элементы

Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

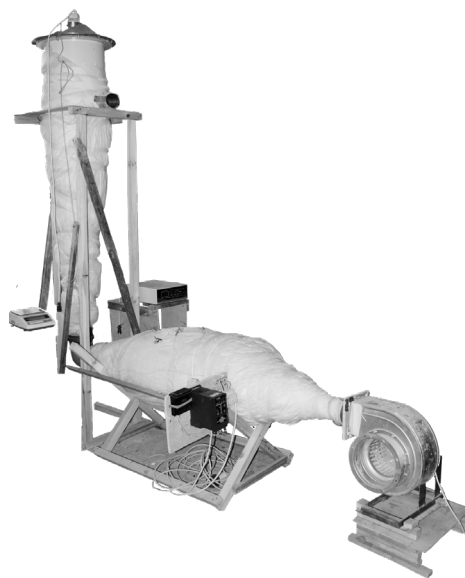


Рис. 4. Фото экспериментального стенда

Эксперименты проводились в камере с конусообразным основанием (высота 1550 мм, диаметр входного отверстия 160 мм, выходного отверстия 380 мм), служащим проставкой между выходным патрубком калорифера и цилиндром, в котором размещен УЗИ (в этом стенде используется тот же самый УЗИ и ГУЗЧ, что и в первой установке). Для визуального наблюдения за протекающим процессом предусмотрены два стеклянных окна (размер 70X70 мм), расположенных друг над другом на высоте 700 мм и 1200 мм от уровня отверстия для подачи сушильного агента. Горизонтально расположенная поперек камеры мелкоячеистая металлическая сетка ГС препятствовала попаданию древесных опилок в калорифер.

Все опыты проводились сериями при времени экспозиции, равном 5, 10 и 15 минутам и расстоянии между УЗИ и мелкоячеистой металлической сеткой ГС, равном 300 и 900 мм. Между собой данные серии так же отличались тремя условиями:

- 1) температура сушильного агента (20°C, 40°C или 60°C) на входе в испытательную камеру;
- 2) поток сушильного агента 1100 м<sup>3</sup>/ч или 1600 м<sup>3</sup>/ч (соответственно 6,5 м/с или 7,8 м/с);
- 3) наличие или отсутствие акустического поля ультразвуковой частоты;
- 4) навеска высушиваемых опилок – 500 г.

Полученные результаты представлены таблице 2.

Табл. 2. Усредненные экспериментальные данные сушки во

взвешенном слое				Условия эксперимента	Вес после сушки, г	Влагодержание, %	Прирост эффективности при УЗ воздействии
Наличие УЗ (да/нет)	Экспозиция, мин	Т колорифера, оС	Поток сушильного агента, м <sup>3</sup> /ч				
нет	5,0	40,0	1100,0	381,1	193,2	1,07	
да	5,0	40,0	1100,0	364,3	180,2		
нет	10,0	40,0	1100,0	319,3	145,6	1,12	
да	10,0	40,0	1100,0	298,7	129,8		
нет	15,0	40,0	1100,0	251,7	93,6	1,09	
да	15,0	40,0	1100,0	242,1	86,2		
нет	10,0	20,0	1100,0	440,8	239,1	1,02	
да	10,0	20,0	1100,0	436,1	235,5		
нет	10,0	20,0	1600,0	371,7	185,9	1,14	
да	10,0	20,0	1600,0	342,5	163,5		
нет	10,0	40,0	1600,0	259,6	99,7	1,30	
да	10,0	40,0	1600,0	230,0	76,9		
нет	10,0	60,0	1600,0	174,1	33,9	2,04	
да	10,0	60,0	1600,0	151,6	16,6		

При сравнении результатов измерения между собой четко прослеживается, что при прочих равных условиях в сравнении с предыдущими опытами наличие витания древесных опилок оказывает значительное влияние на эффективность процесса сушки в лучшую сторону.

При сравнении полученных результатов наблюдается вполне ожидаемое положительное влияние роста температуры колорифера на интенсивность сушки древесных опилок. Разница в потере массы при переходе с одного температурного режима на другой составляет 80-100 г.

Исходя из динамики потери веса экспериментальных порций опилок (500 г) в процессе сушки, очевидно, что при дальнейшем повышении температуры сушильного агента при времени экспозиции, превышающем 10 минут, эффективность снижается. Это явление обусловлено слишком быстрым высыханием опилок, что нивелирует влияние рассматриваемого критерия на интенсивность сушки, как при наличии ультразвукового воздействия, так и без него. Это приводит к резкому уменьшению разницы в весе отдельных порций после процесса сушки и, в конечном итоге, к снижению объективности полученных экспериментальных данных.

Сравнение различных режимов, различающихся только наличием или отсутствием ультразвукового воздействия, в пределах одинаковой температуры и потока сушильного агента показывает, что наложение акустических полей ультразвуковой частоты значительно повышает интенсивность сушки.

Так при температуре сушильного агента, равной 40°С, наложение акустического поля приводит к увеличению скорости удаления влаги на 30%. При этом скорость удаления влаги достигла 350 г за 10 мин, что в 20 раз превышает скорость удаления влаги по сравнению с сушкой в неподвижном слое (Табл. I).

Таким образом, способ сушки во взвешенном слое является наиболее эффективным, и его следует считать более целесообразным для практического применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность ультразвуковой интенсификации процесса сушки опилок. Выявлены режимы и условия, обеспечивающие протекание процесса с наибольшей эффективностью. При этом были получены следующие основные результаты:

1) разработан и изготовлен экспериментальный стенд для исследования эффективности ультразвуковой сушки древесных опилок;

2) установлено, что наиболее эффективными условиями протекания процесса является УЗ сушка во взвешенном слое (скорость удаления влаги до 20 раз превышает скорость в неподвижном слое);

3) показана возможность повышения эффективности сушки древесных опилок УЗ колебаниями до 30% (по сравнению с сушкой опилок во взвешенном слое без применения УЗ воздействия);

4) доказано, что повышение эффективности сушки УЗ колебаниями происходит без повышения температуры высушиваемого материала и сушильного агента;

5) установлен температурный диапазон (от 20°С до 40°С) сушильного агента, при котором эффект от ультразвукового воздействия оказывается наиболее ощутимым;

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение ультразвукового воздействия является перспективным способом интенсификации процесса сушки для материалов с развитой поверхностью массо- и теплообмена (например, находящихся в дисперсном состоянии) при невысоких температурах сушильного агента (от 20°С до 40°С).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-424.2018.8, при поддержке РФФИ и Администрации Алтайского края в рамках научного проекта № 18-48-220009 р\_а.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. L. A. Carlier and L. P. van Hee., Microwave drying of lucerne and grass samples Authors, Journal of the Science of Food and Agricul-

ture, 1971.

2. Ch. Zhenyu et al. Microwave Drying of Wastewater Sewage Sludge, *Journal of Clean Energy Technologies*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 282-286.

3. G. Grdzlishvili and P. Hoffman, *Infrared drying of food products*, Czech Technical University in Prague, 2012, pp. 109-116.

4. C. F. Borgognoni et al., Freeze-drying microscopy in mathematical modeling of a biomaterial freeze-drying, *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 48, n. 2, apr./jun., 2012, pp. 203-209.

5. D. Piotrowski et al., Temperature changes during vacuum drying of defrosted and osmotically dehydrated strawberries, *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 2007, vol. 57, no. 2(A), pp. 141-146.

6. V.N. Khmelev, Lebedev A.N., Khmelev M.V., Shalunov A.V., Kwang M.C., Lee H.-J. Compact Ultrasonic Dryer for Capillary-porous and Loose Materials // 9th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2008: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2008. – pp. 295-299.

7. V.N. Khmelev and A.V. Shalunov, Development of Design Procedure of Liquid Media Dispenser for the Atomizing Drier, EDM'2009: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. - pp.269-273.

8. V.N. Khmelev, Shalunov A.V., Barsukov R.V., Abramenko D.S., Lebedev A.N. Studies of ultrasonic dehydration efficiency // *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, Vol.12., No.4, pp.247-354.

9. V.N. Khmelev, Galakhov A.N., Shalunov A.V., Khmelev M.V. Compact Ultrasonic Drier for Low-temperature Dehydration of Products in Food Industry //12th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2011: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2011. – pp.225-229.

10. V.N. Khmelev, Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Shavyrkina N.A. Studies of spray drying process of sour milk products with the application of ultrasonic vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. – pp. 246- 250.

11. Kosheleva M.K., Novikova T.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V. Ultrasonic drying of textile materials //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. – pp. 283–289.

12. T.A. Novikova and E.H. Shirokopoyas, Efficiency increase of drying process of the textile materials at the application of ultrasound, *Innovation development of light and textile industry*, 2017, p. 72-73.

13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Bobrova G.A. Study of the influence of secondary modes of vibrations on the uniformity of the distribution of working ring disk of ultrasonic disk radiators //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 290-293.

14. Khmelev V. N., Galakhov A. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 194-198.

15. Khmelev V.N., Galakhov A.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. C. 187-193.

16. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Golykh R.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp 224 – 228

17. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-Type radiators // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 251-256.

18. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V.

Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.

19. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – IEEE 2015. – P.181-186.

20. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S.. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – IEEE, 2014. – P. 233 – 239.

21. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Khmelev S.S., Shalunova K.V. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // *Archives of Acoustics*. – Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. – Vol. 40, No. 4. – P. 757-771.

22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics - 2017*, Volume 90, Issue 4, pp 831–844.

23. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A. Theoretical determination of treating modes providing the formation of high-disperse aerosol at two-stage ultrasonic atomization // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 233–237.

24. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Bazhin V.E. Efficiency Increase of Centrifugal Separation of Gas-dispersed Flow by the Application of Ultrasonic Vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. - P.269-274.

25. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Determination of the Modes and the Conditions of Ultrasonic Spraying Providing Specified Productivity and Dispersed Characteristics of the Aerosol // *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017. – Vol. 10. – No. 5. – P. 1409-1419.

26. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A., Genne D.V., Ilchenko E.V. Efficiency increase of the ultrasonic emitter designed for dust coagulation in ash collecting units //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 250-254.

27. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N., Kozhevnikov I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems//18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 294-297.

28. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2015. pp. 213-217.

29. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations // *American Journal of Engineering Research*. – Stamford (USA): Natural State Research, Inc., 2015. – Vol. 4, Issue 8. – p. 108–119.

30. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov, V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. The development of the agglomerator for efficiency increase of the separation of nanoscale particles // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – IEEE, 2013. – P. 171–175.

31. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Galakhov A.N.,

Golykh R.N., Shalunova K.V. Development of the construction of the apparatus for centrifugal acoustic collection of nanoscale aerosols // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 161–165.

32. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 264-268.

*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.secna.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.secna.ru.*

*Зорин Сергей Сергеевич – инженер-электроник отдела АСУТП и КИПиА, ООО «Бочкаревский пивоваренный завод», e-mail: sergezorin@gmail.com.*

*Гольх Роман Николаевич – доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», e-mail: grn@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», e-mail: nva@bti.secna.ru.*

# ULTRASOUND INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF DRYING DISPERSED MATERIALS

V.N. Khmelev<sup>1</sup>, A.V. Shalunov<sup>1</sup>, S.S. Zorin<sup>2</sup>, R.N. Golikh<sup>1</sup>, V.A. Nesterov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, Biysk*

<sup>2</sup>*Bochkarevsky Brewery LLC*

The article is devoted to the practical study of ultrasonic intensification of the drying process of sawdust. The general laws of kinetics of drying are considered in detail and the main technological parameters influencing the efficiency of application of ultrasonic influence in the drying process are determined.

*Index terms – drying, sawdust, ultrasound, intensification, weighted layer.*

## REFERENCES

1. L. A. Carlier and L. P. van Hee., Microwave drying of lucerne and grass samples Authors, Journal of the Science of Food and Agriculture, 1971.
2. Ch. Zhenyu et al. Microwave Drying of Wastewater Sewage Sludge, Journal of Clean Energy Technologies, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 282-286.
3. G. Grdzlishvili and P. Hoffman, Infrared drying of food products, Czech Technical University in Prague, 2012, pp. 109-116.
4. C. F. Borgognoni et al., Freeze-drying microscopy in mathematical modeling of a biomaterial freeze-drying, Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences, vol. 48, n. 2, apr./jun., 2012, pp. 203-209.
5. D. Piotrowski et al., Temperature changes during vacuum drying of defrosted and osmotically dehydrated strawberries, Pol. J. Food Nutr. Sci., 2007, vol. 57, no. 2(A), pp. 141-146.
6. V.N. Khmelev, Lebedev A.N., Khmelev M.V., Shalunov A.V., Kwang M.C., Lee H.-J. Compact Ultrasonic Dryer for Capillary-porous and Loose Materials // 9th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2008: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2008. – pp. 295-299.
7. V.N. Khmelev and A.V. Shalunov, Development of Design Procedure of Liquid Media Dispenser for the Atomizing Drier, EDM'2009: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. - pp.269-273.
8. V.N. Khmelev, Shalunov A.V., Barsukov R.V., Abramenko D.S., Lebedev A.N. Studies of ultrasonic dehydration efficiency // Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2011, Vol.12., No.4, pp.247-354.
9. V.N. Khmelev, Galakhov A.N., Shalunov A.V., Khmelev M.V. Compact Ultrasonic Drier for Low-temperature Dehydration of Products in Food Industry //12th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2011: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2011. – pp.225-229.
10. V.N. Khmelev, Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Shavyrkina N.A. Studies of spray drying process of sour milk products with the application of ultrasonic vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. – pp. 246- 250.
11. Kosheleva M.K., Novikova T.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Khmelev V.N., Shalunov A.V. Ultrasonic drying of textile materials //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. – pp. 283–289.
12. T.A. Novikova and E.H. Shirokopoyas, Efficiency increase of drying process of the textile materials at the application of ultrasound, Innovation development of light and textile industry, 2017, p. 72-73.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Bobrova G.A. Study of the influence of secondary modes of vibrations on the uniformity of the distribution of working ring disk of ultrasonic disk radiators //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 290-293.
14. Khmelev V. N., Galakhov A. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Designing of multi-frequency source of ultrasonic action with radiator in form of stair-step disc // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 194-198.
15. Khmelev V.N., Galakhov A.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N. Development of the rectangular ultrasonic radiator of the stair-step form // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. C. 187-193.
16. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Golykh R.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – Novosibirsk: NSTU, 2015. – pp 224 – 228
17. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. The measurements of acoustic power introduced into gas medium by the ultrasonic apparatuses with the disk-Type radiators // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 251-256.
18. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova K.V. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.
19. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – IEEE 2015. – P.181-186.
20. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S.. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – IEEE, 2014. – P. 233 – 239.
21. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Khmelev S.S., Shalunova K.V. Efficiency Increase of Wet Gas Cleaning from Dispersed Admixtures by the Application of Ultrasonic Fields // Archives of Acoustics. – Institute of Fundamental Technological Research PAN, Warszawa, 2016. – Vol. 40, No. 4. – P. 757-771.

22. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* - 2017, Volume 90, Issue 4, pp 831–844.
23. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A. Theoretical determination of treating modes providing the formation of high-disperse aerosol at two-stage ultrasonic atomization // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 233–237.
24. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Golykh R.N., Dorovskikh R.S., Bazhin V.E. Efficiency Increase of Centrifugal Separation of Gas-dispersed Flow by the Application of Ultrasonic Vibrations // 17th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. - 2016. - P.269-274.
25. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Shalunova A.V. Determination of the Modes and the Conditions of Ultrasonic Spraying Providing Specified Productivity and Dispersed Characteristics of the Aerosol // *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017. – Vol. 10. – No. 5. – P. 1409-1419.
26. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Nesterov V.A., Genne D.V., Ilchenko E.V. Efficiency increase of the ultrasonic emitter designed for dust coagulation in ash collecting units //18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 250-254.
27. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N., Kozhevnikov I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems//18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2017. pp. 294-297.
28. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Efficiency increase of the dust-extraction plant by high-intensity ultrasonic action // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2017: Conference Proceedings, Novosibirsk, RU, 2015. pp. 213-217.
29. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations // *Americal Journal of Engineering Research*. – Stamford (USA): Natural State Research, Inc., 2015. – Vol. 4, Issue 8. – p. 108–119.
30. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. The development of the agglomerator for efficiency increase of the separation of nanoscale particles // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – IEEE, 2013. – P. 171–175.
31. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Galakhov A.N., Golykh R.N., Shalunova K.V. Development of the construction of the apparatus for centrifugal acoustic collection of nanoscale aerosols // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 161–165.
32. Khmelev, V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Kozhevnikov I.S. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2016: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 264-268.

*Khmelev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Engineering, professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute, e-mail: vnh@bti.secna.ru.*

*Shalunov Andrey Viktorovich - Doctor of Engineering, professor, head of the char of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.*

*Zorin Sergey Sergeevich – Electronic Engineer, Automated Control and Automation Systems Department, Bochkarevsky Brewery LLC, e-mail: sergezorin@gmail.com.*

*Golykh Roman Nikolaevich – Ph. D., assotiate professor at the char of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, e-mail: grn@bti.secna.ru.*

*Nesterov Viktor Alexandrovich – Ph. D., assotiate professor at the char of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, e-mail: grn@bti.secna.ru.*