

Ультразвуковая Малогабаритная Сушилка

Владимир Н. Хмелёв¹, д.т.н., *Senior Member*, IEEE, Андрей В. Шалунов¹, к.т.н., Kwang Moon Choo², Андрей Н. Лебедев¹, *Student Member*, IEEE, Роман В. Барсуков¹, к.т.н., Сергей Н. Цыганок¹, к.т.н., Ксения В. Шалунова¹, *Student Member*, IEEE

¹Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

²Dooson co.,Ltd (Республика Корея)

Аннотация – В статье описывается устройство для ультразвуковой сушки, обладающее улучшенными техническими характеристиками, достигнутыми за счет применения сушильной камеры специальной формы. Приводятся результаты экспериментальных исследований, показавших высокую эффективность созданной сушильной установки при сушке капиллярно пористых материалов. Установлено что максимальная эффективность достигается при осуществлении ультразвукового воздействия совместно с подачей подогретого (не более 40°C) сушильного воздуха.

Ключевые слова – Сушка, ультразвук, интенсификация.

I. ВВЕДЕНИЕ

ИНТЕРЕС К ПРАКТИЧЕСКОЙ реализации сушки продуктов и материалов с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности существенно возрос в последние годы. Это объясняется, прежде всего, непрерывным ростом требований к снижению энергопотребления, повышению качества конечного продукта и увеличению скорости процесса сушки. К сожалению, удовлетворить современным требованиям при применении традиционных способов сушки (тепловой, СВЧ, вакуумной) не представляется возможным из-за принципиальных физических ограничений, присущих этим способам. Проблема обостряется при реализации процесса сушки термолabile лекарственных препаратов, пищевых продуктов, а также взрыво- и пожароопасных веществ, требующих реализации процесса без повышения температуры.

Акустическая (ультразвуковая сушка) и различные варианты ее реализации используется в практике более 40 лет [1...4]. К сожалению, она не получила широкого распространения из-за отсутствия эффективных источников ультразвуковых (УЗ) колебаний. Использувавшиеся до последнего времени газоструйные излучатели характеризуются низким КПД, необходимостью использования компрессоров сжатого воздуха, недолговечностью, низкой рабочей частотой и, как следствие, необходимостью применения дорогостоящих систем защиты персонала от акустического воздействия.

Эффективной альтернативой газоструйным излучателям являются, создаваемые в ряде акустических лабораторий мира, дисковые пьезоэлектрические излучатели (ультразвуковые колебательные системы) [5,6].

Лаборатория акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института успешно развивает не только направление, связанное с созданием излучателей нового типа [7], но и проводит исследования по эффективному использованию энергии таких излучателей в сушильных камерах специальной формы [8...10], обеспечивающих усиление УЗ колебаний на 10...20 дБ.

В настоящей работе описываются результаты экспериментального исследования эффективности процесса сушки различных продуктов с применением созданных излучателей и ультразвуковых сушильных камер.

II. СОЗДАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

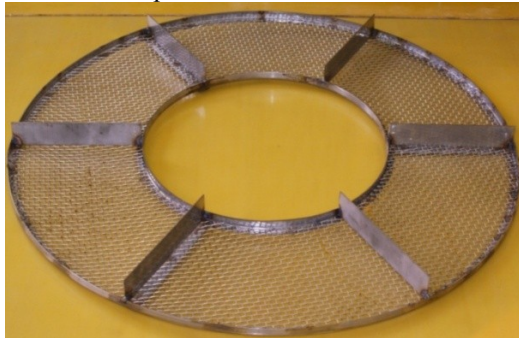
Для определения эффективности процесса сушки с применением УЗ колебаний была спроектирована и создана малогабаритная ультразвуковая сушилка с сушильной камерой специальной формы и УЗ колебательная система с дисковым излучателем. Внешний вид сушилки показан на Рис. 1.



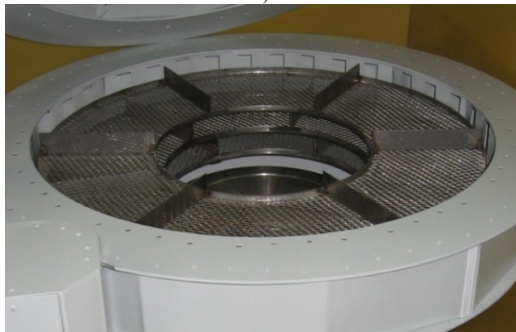
Рис. 1. Внешний вид ультразвуковой сушилки

Высушиваемый материал может располагаться на трех поддонах, расположенных в рабочем объеме сушильной камеры и выполненных в форме кольца, внутренний диаметр которого

равен диаметру дискового излучателя, а внешний превосходит его в два раза. Внешний вид поддонов для высушиваемого материала показан на Рис. 2.а. Поддоны располагаются горизонтально, на расстоянии 30 мм друг над другом по вертикали (см. Рис. 2.б). В сушилке предусмотрена возможность подачи подогретого воздуха (не более 40 °С), необходимого для удаления влаги из объема камеры.



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид поддонов для размещения высушиваемого материала (а) и их размещение в объеме сушильной камеры (б)

Форма сушильной камеры обеспечивает равномерное распределение ультразвуковых колебаний, излучаемых обеими сторонами диска, по всей поверхности высушиваемого материала, рас-

положенного на поддонах. Направления распространения ультразвуковых колебаний в объеме сушильной камеры показаны на Рис. 3.

УЗ сушилка обладает техническими характеристиками, приведенными в Табл. 1:

ТАБЛИЦА I
ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наименование параметра	ед. изм.	Значение
мощность, потребляемая генератором	кВт	3
мощность, потребляемая генератором	кВт	0,2
мощность нагревателя	кВт	1,0
размеры сушильной камеры, диаметр, высота	мм	850х600
максимальная температура нагрева сушильного воздуха	°С	40
частота УЗ колебаний	кГц	24
интенсивность формируемых УЗ колебаний	дБ,	150

III. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

Эффективность процесса сушки, обеспечиваемая разработанной сушилкой, определялась по: остаточному влагосодержанию образца и скорости его сушки (количество удаляемой влаги в граммах в секунду, отнесенное к массе образца). Начальное и текущее влагосодержание высушиваемых образцов определялось выражением (1):

$$\mu = \frac{m_{тек}}{m_{нач.общ}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: $m_{тек}$ – текущее значение массы образцов; $m_{нач.общ}$ – начальное значение массы образцов.

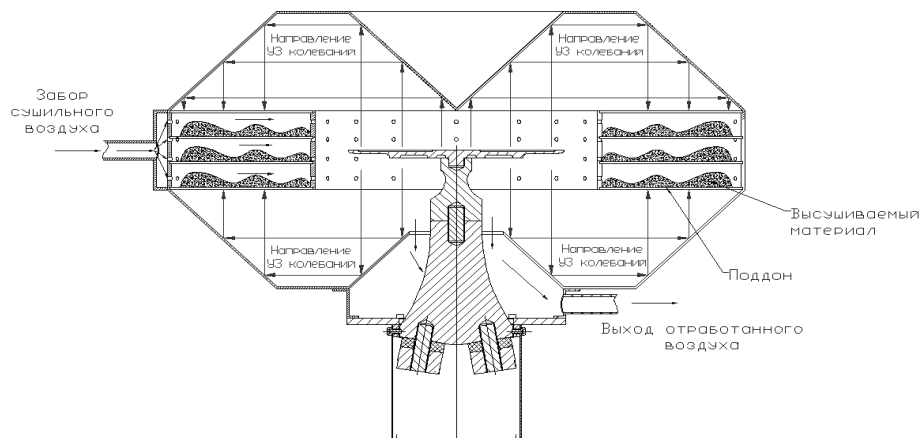


Рис. 3. Направление распространения ультразвуковых колебаний в объеме сушильной камеры

Измерение массы образцов осуществлялось взвешиванием, на лабораторных весах «MW-II», фирмы «CAS» с точностью до 0,1 г.

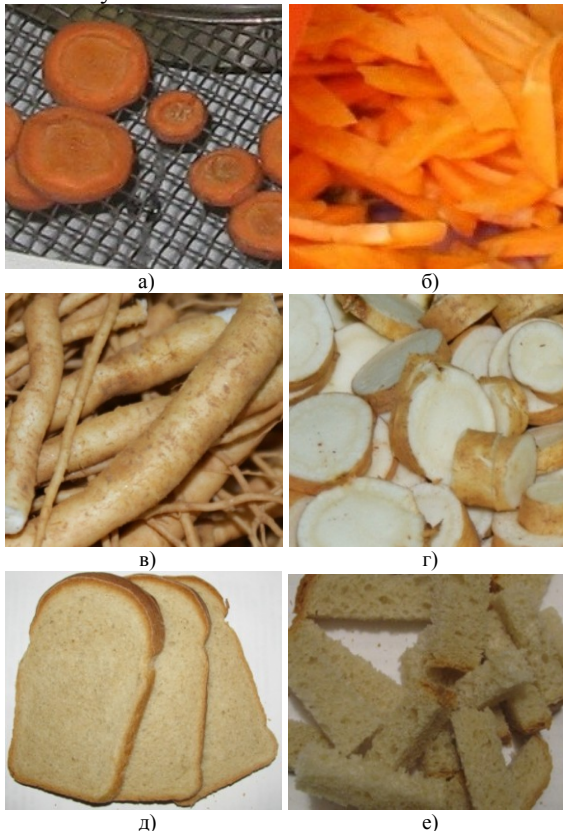
Скорость сушки определялась с использованием выражения (2):

$$\mu = \frac{m_{нач} - m_{тек}}{t_{экс} m_{нач.общ}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где: $m_{нач}$ – масса образцов, измеренная непосредственно перед началом цикла сушки; $m_{тек}$ – масса образцов, измеренная после цикла сушки; $t_{экс}$ – время цикла сушки.

II. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве экспериментальных образцов использовалась: морковь, нарезанная дисками толщиной 4...5 мм; морковь нарезанная брусками 35x5x3 мм; корень женьшеня целый; корень женьшеня, нарезанный дисками толщиной 4...5 мм; хлеб пластинами; хлеб брусками. Суммарный вес высушиваемых образцов каждого типа составлял 3 кг. Внешний вид образцов до начала сушки показан на Рис. 4.



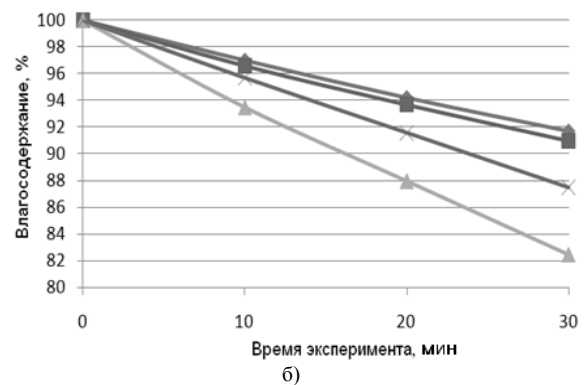
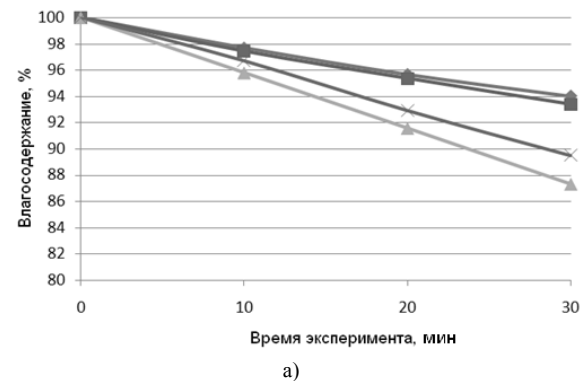
а – морковь нарезанная дисками; б – морковь нарезанная полосками; в – корень женьшеня; г – корень женьшеня, нарезанный дисками; д – хлеб пластинами; е – хлеб брусками
Рис. 4. Фото использовавшихся образцов

Образцы подвергались четырем комбинациям энергетического воздействия. (см. Табл. 2.)

ТАБЛИЦА II
СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

	Маркер			
	Опыт 1 ◆	Опыт 2 ■	Опыт 3 ×	Опыт 4 ▲
Продувка сушильного воздуха (100%)	+	+	+	+
Нагрев сушильного воздуха (40°C)	-	-	+	+
УЗ воздействие (100%)	-	+	-	+

На рисунке 5 показана полученная зависимость остаточного влагосодержания моркови от времени сушки.

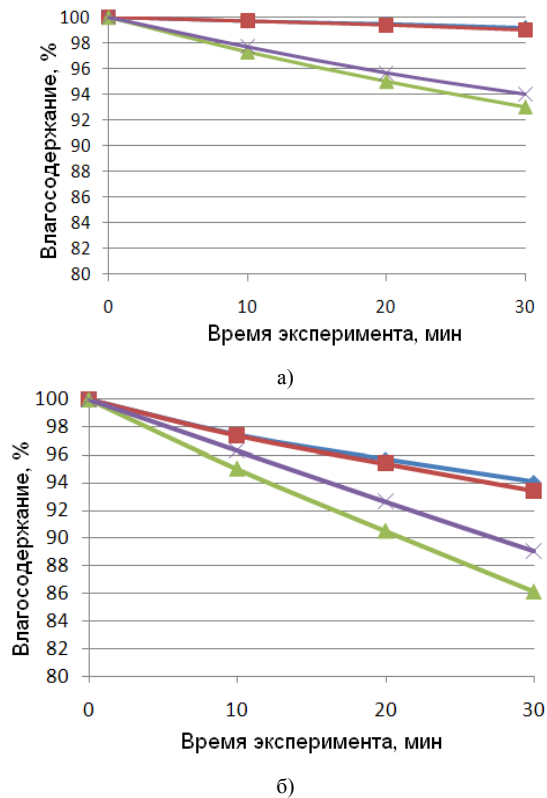


а – морковь нарезанная дисками; б – морковь нарезанная полосками;

Рис. 5. Зависимость остаточного влагосодержания моркови от времени сушки

Приведенные результаты экспериментов показывают, что в обоих случаях, заметный эффект от воздействия УЗ колебаний проявляется только при подаче нагретого сушильного воздуха и может достигать 50 г влаги на 1 кг массы высушиваемого образца. Это свидетельствует о том, что и при сушке объектов с капиллярно-пористой структурой, основным вкладом ультразвуковых колебаний в процесс сушки является перенос влаги из внутренних слоев высушиваемого материала на его поверхность.

Как и следовало ожидать, наибольшая эффективность ультразвуковой сушки реализуется в случае, показанном на Рис. 5.б, соответствующем максимальной площади поверхности массообмена. При этом, эффект от ультразвукового воздействия увеличивается с течением времени. Это объясняется следующим образом. При сушке только нагретым воздухом, на всей поверхности моркови образуется слой с пониженным влагосодержанием, который препятствует эффективному удалению влаги с поверхности. С течением времени толщина этого слоя увеличивается, еще более уменьшая выход влаги. При воздействии УЗ колебаний, этого не происходит. Так как суммарная поверхность массопереноса в случае показанном на Рис. 5.б значительная, то и эффект от применения УЗ колебаний также более заметен. На Рис. 6 приведен характер изменения остаточного влагосодержания образцов женьшеня от времени сушки.



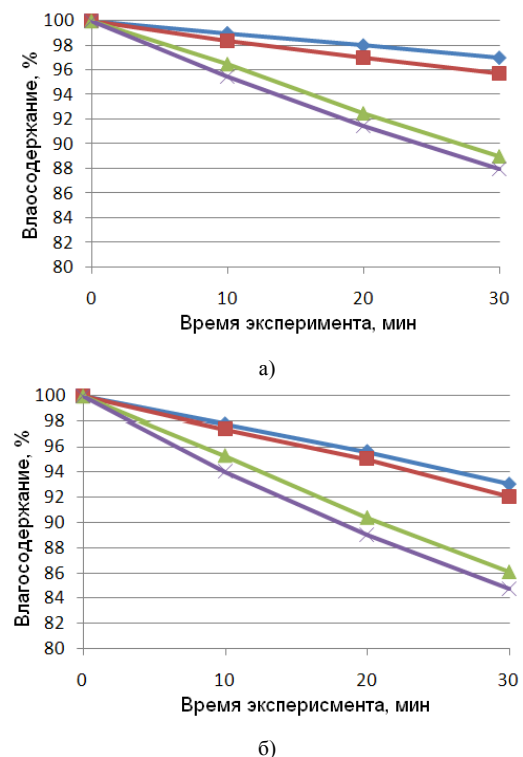
а – корень женьшеня цельный; б – корень женьшеня, нарезанный дисками
Рис. 6. Зависимость остаточного влагосодержания женьшеня от времени сушки

Графики на Рис. 6.а свидетельствуют о низкой эффективности сушки корня женьшеня цельного. Вклад в эффективность сушки, вносимый ультразвуковыми колебаниями, также оказывается весьма незначительным. Не наблюдается увеличение эффекта вносимого ультразвуковыми колебаниями и при нагреве сушильного воздуха. Полученные результаты могут быть

объяснены наличием на поверхности корней женьшеня защитной пленки – кожицы, которая препятствует активному испарению влаги с их поверхности, а также выходу влаги из внутренних слоев корней на поверхность под действием УЗ колебаний, сводя тем самым к минимуму эффект от применения ультразвука. Зависимости на Рис. 6.б, напротив, показывают весьма значительный вклад, вносимый ультразвуковыми колебаниями в эффективность сушки, который может достигать до 29 грамм на килограмм массы образца.

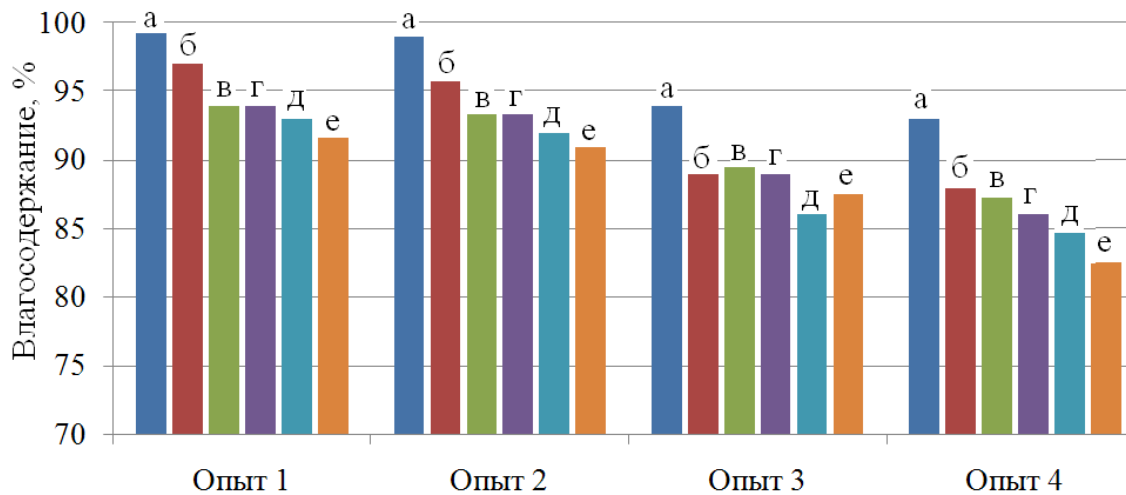
Таким образом, приведенные результаты экспериментов свидетельствуют, что основным движущим фактором ультразвуковой сушки является развивающийся в звуковом поле эффект перемещения влаги по капиллярам к поверхности.

На рисунке 7 приведены, зависимости изменения влажности образцов хлеба от времени сушки, полученные в последней серии экспериментов.



а – хлеб пластинами; б – хлеб брусками
Рис. 7. Зависимость остаточного влагосодержания хлеба от времени сушки

В целом зависимости соответствуют полученным при сушке моркови и женьшеня. Характер зависимостей также свидетельствует о наибольшей эффективности комбинированного режима сушки: продув, нагрев сушильного воздуха и воздействие УЗ колебаниями.



а – корень женьшеня; б – хлеб пластинами; в – морковь, нарезанная дисками; г – корень женьшеня, нарезанный дисками; д – хлеб брусками; е – морковь, нарезанная полосками

Рис. 8. Гистограмма скорости ушки различных образцов

Для обобщения полученных результатов, и сравнения эффективности ультразвуковой сушки различных образцов, на Рис. 8. приведена гистограмма остаточного влагосодержания всех рассмотренных образцов.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что предложенная конструкция ультразвуковой сушилки, является оптимальной с точки зрения обеспечения максимальной скорости сушки, без существенного нагрева материала.

Показано, что наибольшая эффективность УЗ воздействия реализуется в случае продува нагретого сушильного воздуха с одновременным воздействием ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. При этом высокая степень интенсификации процесса сушки ультразвуковыми колебаниями (приrost до 50 г на 1 кг высушиваемого материала) позволяет снизить температуру сушащего агента, без потери в качестве и скорости сушки. Последнее особенно важно для производств, где нагрев высушиваемого продукта недопустим или нежелателен.

Результаты проведенных экспериментов показывают перспективность и целесообразность создания комбинированных сушильных установок (ультразвуковые - конвекционные) с оптимальным соотношением доли тепловой и акустической энергии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук и их научных руководителей № МК-383.2008.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
- [2] Food drying process by power ultrasound [Text] / S. de la Fuente-Blanco *, E. Riera-Franco de Sarabia, V.M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, J.A. Gallego-Juarez // Ultrasonics, Elsevier USA, 2006, 44. – P. 523–527.
- [3] Application of high intensity air-borne ultrasound for debubbling liquid coating layers [Text] / I. Gonzalez a, J. Rodriguez a, I. Garmendia b, J.A. Gallego-Juarez // Ultrasonics, Elsevier USA, 2006, 44. – P. 529–532.
- [4] Патент РФ № 2095707.
- [5] Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов [и др.]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 416 с.
- [6] Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media [Text] / A.N. Lebedev; A.V. Shalunov; S.S. Khmelev; N.V. Kuchin; A.V. Shalunova //International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008.
- [7] High Power Ultrasonic Oscillatory Systems [Text] / V.N. Khmelev, S.V. Levin, S.N. Tsyganok, A.N. Lebedev //International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.293–298.
- [8] Compact Ultrasonic Dryer for Capillary-porous and Loose Materials [Text] / Choo Kwang Moon, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, Lee Hyo-Jai, A.N. Lebedev, M.V. Khmelev // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008. - P.295-299.
- [9] Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine [Текст] V.N. Khmelev [и др.] // International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2006: Workshop Proceedings. / NSTU. – Novosibirsk, 2006. – P. 140-146.
- [10] Система ультразвуковой сушки на основе пьезоэлектрического бесконтактного излучателя [Текст]

В.Н. Хмелёв, И.И. Савин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.Н. Лебедев, С.В. Левин, М.В. Хмелёв // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник /Под редакцией Г.В. Леонова, АлтГТУ, БТИ, 2005.



Владимир Н. Хмелёв (М'00, SM'04)— заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



Андрей В. Шалунов родился в г. Бийске, Россия, 1980. Кандидат технических наук. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – разработка программного обеспечения для ультразвуковых технологических аппаратов.



Kwang-Moon Choo Родился 15 июля 1959 года, в г. Пусан, Республика Корея. Ученая степень доктора наук Политехнического университета Кореи. Президент фирмы Dooson со. ltd. По совместительству профессор университета Dongguk в Сеуле.



Андрей Н. Лебедев (S'03) – инженер БТИ. В 2006 закончил БТИ по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Область научных интересов: разработка новых типов ультразвуковых колебательных систем.



Роман В. Барсуков, к.т.н., доцент, БТИ. Родился в 1975 году в г. Бийске. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является: разработка высоко мощных ультразвуковых генераторов.



Сергей Н. Цыганок родился в Новосибирске, Россия, 1975. Кандидат технических наук, доцент. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является разработка высокоэффективных пьезоэлектрических колебательных систем для ультразвуковых технологических аппаратов.



Ксения В. Шалунова (S'09) родилась в Бийске, Россия, 1986. Окончила факультет «Информационных технологий, автоматизации и управления» Бийского технологического института в 2008. Она является аспирантом первого года обучения кафедры «Методов, средств измерения и автоматизации». Областью ее научных интересов является изучение процессов и разработка оборудования для ультразвуковой коагуляции и осаждения аэрозолей различного происхождения.