

Исследование Процесса Распылительной Сушки Кисломолочных Продуктов с Применением Ультразвуковых Колебаний

Владимир Н. Хмелев, *Senior Member*, IEEE, Андрей В. Шалунов, Роман Н. Голых,
Роман С. Доровских, Виктор А. Нестеров, Надежда А. Шавыркина

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

ООО «Центр Ультразвуковых Технологий», Бийск, Россия

Аннотация – В статье рассмотрен подход к реализации низкотемпературной распылительной сушки кисломолочных продуктов, заключающийся в применении ультразвукового (УЗ) воздействия для распыления сырья, а также при взаимодействии сформированных распылением капель с потоком сушильного агента (воздуха). Показано, что УЗ воздействие как на стадии распыления, так и на стадии взаимодействия капель с потоком сушильного агента, не обеспечивает выживаемость микроорганизмов. Ультразвуковое распыление сырья в сушильную камеру приводит к сокращению численности бактерий более чем в 10 раз из-за кавитационных явлений. Воздействие УЗ колебаниями при испарении влаги с поверхности капель, сформированных распылением, сокращает численность бактерий до 180 раз. Согласно полученным результатам, УЗ воздействие неприменимо для распылительной сушки кисломолочных продуктов, но может быть рекомендовано для сушки термолабильных растительных экстрактов и лекарственных препаратов с целью удаления контаминирующих микроорганизмов.

Ключевые слова – Ультразвуковая сушка, кисломолочный продукт, ультразвуковое распыление, молочнокислые бактерии, бифидобактерии.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сухие кисломолочные продукты занимают особое место в молочной промышленности. В настоящее время существенно расширяется их ассортимент и качественно изменяется подход к продуктам питания данной группы, а также существенно расширяется сфера их применения [1]. Сухие кисломолочные продукты являются основой для создания группы мультисимбиопробиотиков – биологически активных добавок, совмещающих пробиотические свойства микроорганизмов, работающих в симбиозе и включающих пребиотические компоненты [2].

Один из возможных способов получения таких продуктов – распылительная сушка [2-3]. Минимальная потеря продуктом полезных свойств – важнейшее преимущество распылительной сушки перед другими (тепловая, СВЧ, вакуумная сушка). Это преимущество обусловлено возможностью использования пониженных температурных режимов процесса (температура продукта не превышает 60°C) за счёт формируемой распылением огромной поверхности контакта сырья (до 200 м²/кг) с сушильным агентом (воздухом). Такой способ сушки успешно реализуется в ряде отечественных и зарубежных промышленных распылительных сушилок [4-6].

Однако большинство современных распылительных сушилок не пригодно для сушки кисломолочных продуктов и других бактериальных суспензий. Это вызвано жёсткими

ограничениями по температуре продукта (как правило, не более 40...45°C), обусловленными необходимостью сохранить жизнеспособность микроорганизмов в процессе сушки. Попытки практической реализации сушки при указанных невысоких температурах в рамках существующих конструкций распылительных сушилок приводят к недопустимому снижению производительности процесса, которое усугубляется уносом мелкой фракции готового продукта (менее 10 мкм), трудно улавливаемой циклонами.

При этом высокая востребованность сухих кисломолочных продуктов определяет актуальность модернизации существующих способов, а также поиска новых технологичных методов сушки и разработки их аппаратного оформления. Один из возможных путей повышения эффективности низкотемпературной распылительной сушки кисломолочных продуктов – применение ультразвукового (УЗ) воздействия при распылении сырья и при взаимодействии сформированных распылением капель с потоком сушильного агента.

УЗ распыление позволяет сформировать более однородный факел распыла (по сравнению с пневматическим распылением) [7-15], что исключает унос продукта из-за низкого содержания мелкой фракции (частиц размером менее 10 мкм). Применение УЗ колебаний на стадии взаимодействия капель с сушильным агентом интенсифицирует процесс испарения влаги (за счёт увеличения коэффициента диффузии) [16-20], что дает возможность снизить температуру сушки до величины, не влияющей на выживаемость бактерий.

Вместе с тем, очевидно, что УЗ воздействие будет оказывать влияние на жизнеспособность микроорганизмов в процессе сушки. Поскольку численность живых микроорганизмов – важнейшая характеристика сухих кисломолочных продуктов, цель исследований – определение влияния ультразвука на сохранность бактерий при распылительной сушке.

I. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований, подвергнувшегося распылительной сушке с применением ультразвука, использовался кисломолочный продукт, предназначенный для питания детей раннего возраста – «Бифилин Д лакто», производимый ОАО «Модест», Россия, Алтайский край, г. Барнаул согласно ТУ 9222-460-00419785-09 [21]. Количество бифидобактерий (*Bifidobacterium adolescentis*, штамм МС-42) в продукте составило 79,5·10⁶ КОЕ/г, молочнокислых бактерий (*Lactobacillus acidophilus*, *Streptococcus thermophilus*) –

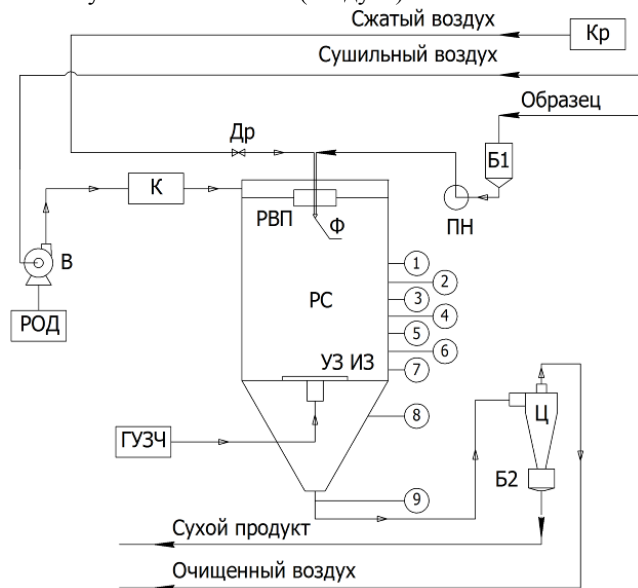
$41 \cdot 10^7$ КОЕ/г. Массовая доля влаги в продукте составила 89,76 %.

Возможность применения ультразвуковых колебаний для распылительной сушки кисломолочных продуктов определялась на специально разработанной экспериментальной установке, технологическая схема которой приведена на рис. 1.

Экспериментальная установка состоит из сушильной камеры (вертикальный цилиндр размерами $\text{Ø}600 \times 2000$ мм с коническим днищем), систем подготовки и подачи воздуха и исходного сырья в зону сушки, отвода и разделения смеси высушенного продукта с отработанным сушильным агентом, а также ультразвукового распылителя и ультразвукового излучателя, предназначенного для повышения эффективности процесса сушки. Созданная установка обеспечивает сушку с производительностью до 4,4 л/ч (по сырью) при расходе воздуха не более $340 \text{ м}^3/\text{ч}$ (в пересчёте на нормальные условия). Во всех экспериментах температура сушильного агента на входе была одинаковой и составляла 78°C . Температура воздуха на выходе – не более 40°C .

Ультразвуковое воздействие осуществлялось в ходе протекания каждой из двух основных стадий процесса:

- распыления жидкости;
- взаимодействие сформированных распылением капель с потоком сушильного агента (воздуха).



Ф – УЗ распылитель или форсунка; Б1 – бункер влажного материала; Б2 – бункер высушенного материала; РС – распылительная сушилка; К – калорифер; Ц – циклон; В – вентилятор; Др – дроссель; ПН – перистальтический насос; РВП – распределитель воздушных потоков; Кр – компрессор; РОД – регулятор оборотов двигателя; ГУЗЧ – генератор ультразвуковой частоты; УЗ ИЗ – ультразвуковой излучатель
Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки для исследования процесса распылительной сушки с применением УЗ воздействия.

Для определения влияния ультразвукового воздействия на жизнеспособность микроорганизмов на стадии распыления экспериментальные исследования проводились с использованием пневматического и ультразвукового распылителей (обозначение Ф на технологической схеме, см. рис. 1).



Рис. 2. Фото ультразвукового распылителя

В качестве пневматического распылителя использовался стандартно выпускающийся распылитель типа НУVST LVMP. Фото ультразвукового распылителя в комплекте с электронным генератором высокочастотных колебаний представлено на рис. 2 [12, 22]. Технические характеристики УЗ распылителя представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА I
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ

Параметр	Значение
Мощность, ВА, не более	100
Частота УЗ колебаний, кГц	60 ± 4.0
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220 ± 22
Амплитуда колебаний рабочего инструмента, мкм	20...30
Габаритные размеры: Электронный генератор, мм колебательная система, мм	$300 \times 300 \times 80$ $\text{Ø}70 \times 60$
Вязкость распыляемой жидкости, мПа·с	1...4
Средний размер распыляемых частиц, мкм	31
Производительность (по воде), мл/с, не более	1.2

Для определения влияния ультразвука на численность бактерий кисломолочный продукт распылялся в предварительно стерилизованные герметичные колбы объемом 200 мл.

Определение численности бактерий производилось глубинным методом с использованием двух питательных сред (производитель ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии», г. Оболенск, РФ): бифидум-среды по ТУ 9398-041-78095326-2008 и лактобакагара по ТУ 9398-104-7809532602010. Культивирование осуществлялось при температуре $37 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 60-72 ч.

Для определения влияния УЗ колебаний высокой интенсивности на жизнеспособность микроорганизмов в высыхающих каплях был использован УЗ излучатель с рабочим инструментом в виде изгибно-колеблющегося диска (обозначение УЗ ИЗ на технологической схеме, см. рис. 1) [23, 24], позволяющий создавать в объеме сушильной камеры акустическое поле с уровнем звукового давления более 140 дБ.

Фото аппарата (УЗ излучатель в комплекте с генератором электрических колебаний) для воздействия на газовые среды (капли распыленного кисломолочного продукта, находящиеся в среде сушильного агента) представлено на рис. 3, а его технические характеристики в таблице 2.

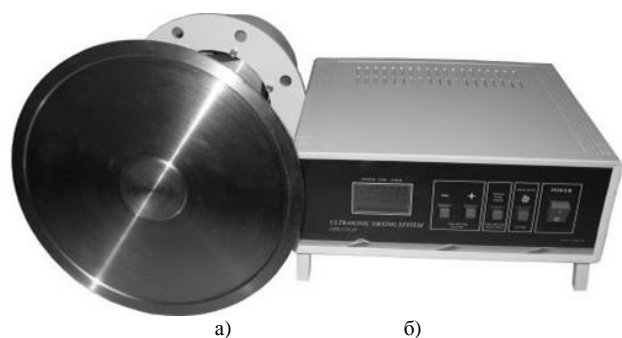


Рис. 3. Ультразвуковой технологический аппарат для воздействия на газовые среды: а) дисковый излучатель; б) электронный генератор

ТАБЛИЦА II
ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ

Параметр	Значение
Мощность, ВА, не более	140
Максимальный уровень звукового давления (в пределах 1 м от поверхности рабочего инструмента), дБ, не менее	150
Рабочая частота механических колебаний, кГц	22±1.65
Диаметр рабочего инструмента, мм, не более	320
Габаритные размеры, мм: электронный генератор колебательная система	300×300×130 Ø320×380

Для анализа численности бактерий после сушки с применением УЗ воздействия использовалась методика, аналогичная методике определения численности бактерий при распылении.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований численности бактерий в высушиваемом материале при ультразвуковом и пневматическом распылении, а также при УЗ воздействии на сформированную распылением воздушно-капельную взвесь.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты, позволяющие оценить влияние ультразвукового и пневматического способов распыления на численность бактерий, представлены в таблице 3.

Установлено, что ультразвуковое распыление приводит к сокращению численности молочнокислых бактерий более чем в 10 раз, бифидобактерий более чем в 20 раз. Причина этого заключается в том, что ультразвуковое воздействие, осуществляемое при распылении кисломолочного продукта, сопровождается возникновением кавитационных явлений, вызывающих образование микроударных волн с амплитудой давления до 100 МПа и локальными повышениями температуры в ядрах кавитационных пузырьков до 5000 К [25], приводящих к разрушению мембран бактерий [26-29].

ТАБЛИЦА III

ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИЙ ОТ СПОСОБА РАСПЫЛЕНИЯ КИСЛОМОЛОЧНОГО ПРОДУКТА

Вариант опыта	Количество молочнокислых бактерий, млн. КОЕ/мл	Количество бифидобактерий, млн. КОЕ/мл
Пневматическое распыление	530.0	91.0
Ультразвуковое распыление	47.5	3.9

Таким образом, УЗ способ распыления неприменим для сушки кисломолочных продуктов, поскольку не обеспечивает жизнеспособность молочнокислых и бифидобактерий. Вместе с тем полученные экспериментальные данные свидетельствуют об эффективном уничтожении микроорганизмов в результате УЗ распыления. Это свидетельствует о возможности его применения при распылительной сушке, в частности, растительных экстрактов и лекарственных препаратов. При этом УЗ распыление не только сформирует однородный факел распыла, но и обеспечит частичную стерилизацию продукта.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований влияния УЗ колебаний высокой интенсивности на жизнеспособность микроорганизмов в высыхающих каплях.

Экспериментальные исследования, направленные на определение выживаемости бактерий при сушке и ультразвуковым воздействием на капли распыленного кисломолочного продукта, находящиеся в среде сушильного агента, проводились с использованием дискового излучателя (см. рис. 3а). Создаваемый излучателем уровень звукового давления в сушильной камере составлял 140...151 дБ. Измеренные значения уровня звукового давления в различных точках сушильной камеры представлены в таблице 4. Нумерация точек в таблице 4 осуществлена в соответствии с технологической схемой, представленной на рис. 1.

Полученные результаты по численности бактерий после сушки с применением ультразвукового воздействия представлены в таблице 5. Поскольку контрольный образец (исходный продукт) представляет собой жидкую суспензию и массы сухих веществ в опытных и контрольном (высушенных с применением и без УЗ колебаний) образцах различаются, то полученные данные представлены в пересчете на 1 г сухого вещества согласно выражению (1):

$$N_0 = \frac{N}{\omega} \cdot 100\% \quad (1)$$

где ω – массовая доля сухого вещества в образце, %; N – количество бактерий в образце, млн. КОЕ/мл; N_0 – приведенное количество бактерий (в пересчете на 1 г сухого вещества), млн. КОЕ/мл.

ТАБЛИЦА IV
УРОВНИ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В РАЗНЫХ ТОЧКАХ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Номер точки	Уровень звукового давления, дБ
1 (1.4 м)	147
2 (1.2 м)	151
3 (1.0 м)	147
4 (0.8 м)	146
5 (0.6 м)	145
6 (0.4 м)	147
7 (0.2 м)	150
8 (0 м)	140

ТАБЛИЦА V

Численность бактерий при взаимодействии сырья с потоком воздуха в сушильной камере (в пересчёте на 1 г сухого вещества)

Вариант опыта	Количество молочнокислых бактерий, млн. КОЕ/мл	Количество бифидобактерий, млн. КОЕ/мл
Контрольный образец (исходный продукт)	1193.4	219.7
Продукт, высушенный с применением УЗ колебаний	48.9	1.2
Продукт, высушенный без применения УЗ колебаний	405.4	5.5

Как следует из представленных результатов, ультразвуковые колебания высокой интенсивности эффективны для уничтожения микроорганизмов и при воздействии на капли распыленного кисломолочного продукта, находящиеся в среде сушильного агента (в частности, численность молочнокислых бактерий сокращается более чем в 24 раза, бифидобактерий – более чем в 180 раз). По-видимому, это обусловлено тем, что при уровне звукового давления более 140 дБ в среде происходит деформация капель высушиваемого материала, приводящая к разрушению мембраны бактерий.

Согласно полученным результатам, УЗ воздействие неприменимо ни для распыления, ни для сушки кисломолочных продуктов. Однако воздействие УЗ колебаниями может быть рекомендовано для распылительной сушки термолабильных растительных экстрактов и лекарственных препаратов и на стадии испарения наряду с распылением. Это не только интенсифицирует процесс сушки, но и обеспечивает частичную стерилизацию продукта.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований показано, что УЗ воздействие при распылительной сушке кисломолочных продуктов, как на стадии распыления, так и на стадии взаимодействия капель с потоком сушильного агента, не обеспечивает выживаемость микроорганизмов.

В частности, установлено:

- Ультразвуковое распыление приводит к разрушению бактерий (число снижается более чем в 10 раз) в сравнении с пневматическим распылением;

- Поскольку ультразвуковое распыление обеспечивает формирование факела распыла с малым разбросом размеров капель относительно среднего значения (практически полностью отсутствует мелкодисперсная фракция размером менее 10 мкм, трудно улавливаемая циклонами), оно может быть использовано для формирования капель с одновременным снижением количества болезнетворных бактерий;

- Для обеспечения повышенной скорости массообмена в условиях низкой температуры сушильного агента рабочая частота распылителя должна быть не ниже 60 кГц (средний диаметр формируемых капель не более 35 мкм);

- 4. Ультразвуковое воздействие на воздушно-капельную взвесь при взаимодействии капель с сушильным агентом приводит к сокращению численности бактерий до 180 раз и более (при уровне звукового давления в объёме сушильной камеры 140...152 дБ на частоте 22 кГц).

Таким образом, ультразвуковое воздействие неприменимо для сушки кисломолочных продуктов (бактериальных суспензий) вплоть до стадии взаимодействия капель с нагретым воздухом. Поэтому один из возможных путей повышения эффективности распылительной сушки бактериальных суспензий – уменьшение размеров распыляемых капель (чтобы увеличить поверхность контакта фаз и использовать меньшие температуры для испарения влаги) и дальнейшая ультразвуковая коагуляция частиц сухого продукта с целью повышения эффективности его улавливания. Для определения выживаемости микроорганизмов при УЗ коагуляции сухого продукта необходимы дальнейшие исследования.

УЗ воздействие может быть рекомендовано для сушки термолабильных растительных экстрактов и лекарственных препаратов, требующих стерилизации продукта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МД-4753.2016.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 10382-85. Консервы молочные. Продукты кисломолочные сухие. Технические условия. М.: Стандартинформ. – 2008. – 6 с.
- [2] Максименко, Ю.А. Автоматизация технологических процессов при переработке сырья растительного происхождения / Ю.А. Максименко, Э.П. Дяченко, Ю.С. Феклунова, Э.Р. Теличкина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – №3. – С. 21–29.
- [3] Войновский А. А. Исследование влияния распылительной сушки на качественные характеристики биомассы *Rhodotorula Rubra* / А.А. Войновский // Материалы международной научно-практической конференции «Фармацевтические и медицинские технологии», 2011. – С. 483.
- [4] Fernandes, R.V.B. Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties / R.V.B. Fernandes, S.V. Borges, D.A. Botrel // Cienc. Tecnol. Aliment. – Campinal, 2013. – 33. – P. 171–178.
- [5] Aundhia, C.J. Spray Drying in the Pharmaceutical Industry – A Review / C.J. Aundhia, J.A. Raval, M.M. Patel, N.V. Shah, S.P. Chauhan, G.U. Sailor, A.R. Javia, R.A. Mahashwari // Indo American Journal of Pharmaceutical Research. – 2011. – P. 125–138.
- [6] Semyonov, R.Sh. Using ultrasonic vacuum spray dryer to produce highly viable dry probiotics / R.Sh. Semyonov // LWT – Food Science and Technology. – 2011. – V. 44(9). – P. 1844–1852.
- [7] Khmelev, V.N. Ultrasonic multifunctional and specialized apparatuses for the intensification of technological processes in industry, agriculture and housekeeping / V.N. Khmelev, G.V. Leonov, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov // Altay State Technical University, BTI. – Biysk: Altay State Technical University Publishing, 2007. – 400 p.
- [8] Khmelev, V.N. Revelation of optimum modes of ultrasonic influence for atomization of viscous liquids by mathematical modeling / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova, D.V. Genne // 13th International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 114–123.
- [9] Ramisetty, K.K. Investigations into ultrasound induced atomization / K.K. Ramisetty, A.B. Pandit, P.R. Gogate // Ultrasonics sonochemistry. – 2013. – V. 20(1). – P. 254–264.
- [10] Khmelev V.N. Development of the equipment for ultrasonic treatment of biological tissues with simultaneous spraying of medicines / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.V. Shalunov, V.V. Pedder, A.V. Pedder // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013: Conference proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – P.112-118.
- [11] Khmelev V.N. The investigation of modes of ultrasonic influence for atomization of liquids with specified dispersivity and productivity / V.N. Khmelev, A.V. Shalunova, D.V. Genne, R.N. Golykh // XIII International conference and seminar on micro / nanotechnologies and electron devices, EDM'2012: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P.188-194.
- [12] Khmelev V.N. Ultrasonic atomizers of nanomaterials / V.N. Khmelev, M.V. Khmelev, A.V. Shalunova // XII International conference and seminar of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2011: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.305-309.

- [13] Khmelev V.N. Compact ultrasonic drier for low-temperature dehydration of products in food industry / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, M.V. Khmelev // XII International conference and seminar of young specialists on micro / nanotechnologies and electron devices, EDM'2011: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.225-229.
- [14] Khmelev V.N. Development of equipment for fine-dispersed atomization of viscous liquids / V.N. Khmelev, D.V. Genne, A.V. Shalunova, S.S. Khmelev, V.G. Drovkov, Y.D. Skudaev // XI International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2010: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.350-353.
- [15] Khmelev V.N. Development of design procedure of liquid media dispenser for the atomizing drier / V.N. Khmelev, A.V. Shalunova // X International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2009: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.269-273.
- [16] Khmelev, V.N. Studies of ultrasonic dehydration efficiency / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, D.S. Abramenko, R.V. Barsukov, A.N. Lebedev // Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). – 2011. – V.12. – №4. – P. 247–354.
- [17] Khmelev V.N. Compact ultrasonic drier / V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, A.N. Lebedev, K.V. Shalunova, R.V. Barsukov // X International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2009: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.277-282.
- [18] Khmelev V.N. The compact ultrasonic dryer for capillary-porous and loose materials / V.N. Khmelev, K.M. Choo, A.V. Shalunov, H.J. Lee, A.N. Lebedev, M.V. Khmelev // IX International workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM'2008: Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.295-299.
- [19] Khmelev V.N. Ultrasonic drying in food industry / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, R.V. Barsukov // Vestnik of Altay Science. – Barnaul: AltGTU, 2012. – №1. – P. 143–144.
- [20] Gallego-Juarez, J.A. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices / J.A. Gallego-Juarez, E. Riera-Franco De Sarabia, G. Rodriguez-Corral, V.M. Acosta-Aparicio, A. Blanco // Drying Technology. – 2007. – 25(11). – P. 1893–1901.
- [21] ОАО «Модест». Каталог. Режим доступа: <http://www.модест22.рф/catalog>. Дата обращения: 06.10.2015.
- [22] Хмелев В.Н. Разработка и исследование высокочастотного ультразвукового распылителя жидкости [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – №4. – С. 212–215.
- [23] Lebedev A.N. Ultrasonic oscillating system for radiators of gas media / A.N. Lebedev, A.V. Shalunov, S.S. Khmelev, N.V. Kuchin, A.V. Shalunova // IX International workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM'2008: Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.267-271.
- [24] Khmelev V.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures / V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2015: Conference proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – P.224-228.
- [25] Khmelev, V.N. Modeling of formation of cavitation area in viscous liquids for the determination of optimum processed technological volume and modes of action / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, S.S. Khmelev, R.V. Barsukov, A.V. Shalunov // Vesti of High Institutions of Chernozyemya. – 2010. – № 4 (22). – P. 58–62.
- [26] Silva, M.P. Methods of destroying bacterial spores / M.P. Silva, C.A. Pereira, J.C. Junqueira, A.O.C. Jorge // Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education. – 2013. – Vol. 1. – P. 490–496.
- [27] Garcia, M.L. Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of *Bacillus subtilis* / M.L. Garcia, J. Burgos, B. Sanz, J.A. Ordoñez // J. Appl. Bacteriol. – 1989. – 67. – P. 619–628.
- [28] Scouten, A.J. Combined effects of chemical, heat and ultrasound treatments to kill *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on alfalfa seeds / A.J. Scouten, L.R. Beuchat // J. Appl. Microbiol. – 2002. – 92. – P. 668–674.
- [29] Skiba, E.A. Sterilization of Milk by Ultrasound / E.A. Skiba, V.N. Khmelev // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 308–310.