

В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок,
А. Н. Лебедев

Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск, 659305, Трофимова, 27,
e-mail: vnh@bti.secna.ru

Исследование эффективности ультразвуковой сушки

Получена 30.06.2009, опубликована 13.07.2009

В статье описывается установка для ультразвуковой сушки, обладающая улучшенными техническими характеристиками, достигнутыми за счет применения созданных излучателей и сушильной камеры специальной формы. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтвердивших высокую эффективность созданной установки при сушке капиллярно пористых материалов. Показывается, что максимальная эффективность сушки достигается при осуществлении ультразвукового воздействия совместно с подачей нагретого (не более 40°C) сушильного агента. При этом обеспечивается сокращение времени сушки и снижение энергозатрат на 20%.

Ключевые слова: сушка, ультразвук, колебательная система, сушильная камера, переработка сельскохозяйственной продукции.

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее распространение для сушки различных материалов в настоящее время получили конвективные (тепловые) сушилки, характеризующиеся высоким энергопотреблением, большим процентом брака за счет перегрева или неравномерного высушивания и продолжительным временем процесса сушки.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является реализация процесса сушки за счет энергетического воздействия ультразвуковыми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности. Такое воздействие не приводит к нагреву высушиваемого материала. Благодаря этому УЗ сушка является единственно возможным способом сушки термочувствительных, термолабильных и легко окисляющихся продуктов. Кроме того, обработка сырья УЗ колебаниями благоприятно сказывается на потребительских свойствах продукта (например, сохраняет вкусовые качества продукции, увеличивает срок хранения и всхожесть семян и др.) [1...3]. Однако, в последнее время, некоторые исследователи [4] приводят результаты экспериментов, свидетельствующие о неэффективности сушки УЗ колебаниями в бесконтактном режиме (без прямого контакта излучателя с высушиваемым материалом). Причина этого, по мнению авторов статьи, заключается в несовершенстве конструкций используемых излучателей и отсутствии специализированных сушильных камер, обеспечивающих резонансное усиление УЗ колебаний.

1. РАЗРАБОТАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

Для реализации процесса сушки с применением УЗ колебаний была спроектирована и создана малогабаритная ультразвуковая сушильная установка с камерой специальной формы и УЗ колебательной системы с дисковым излучателем [5...7]. Разработанное оборудование позволяет осуществлять процесс сушки при температуре сушильного агента, в качестве которого выступает нагретый воздух, не более 40 °С.

Форма сушильной камеры обеспечивает резонансное усиление и равномерное распределение УЗ колебаний, излучаемых обеими сторонами диска, по всей поверхности высушиваемого материала, расположенного на поддонах [8]. Направления распространения УЗ колебаний и воздушных потоков в камере показаны на рис. 1.

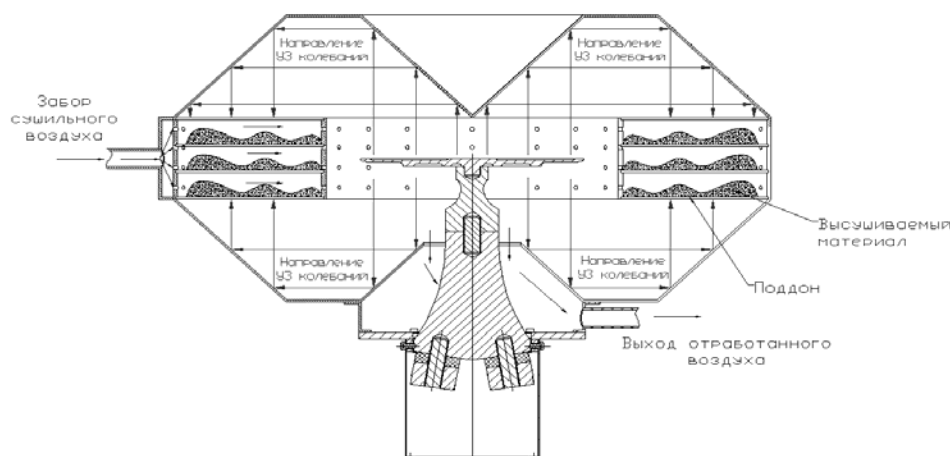
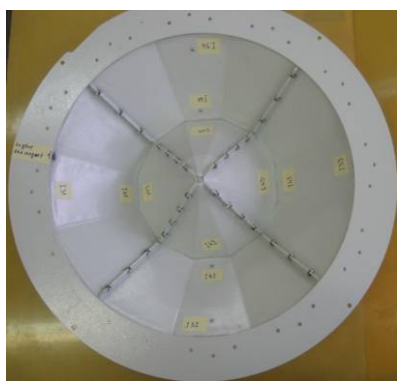


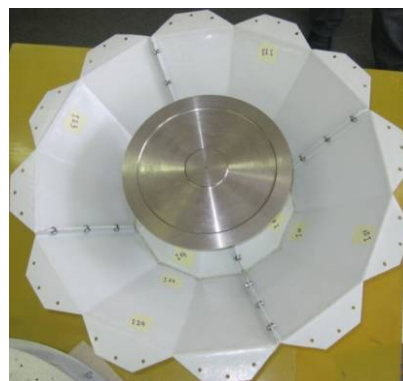
Рис. 1. Структурная схема ультразвуковой сушильной установки

Созданная установка состоит из излучателя ультразвуковых колебаний в виде изгибно-колеблющегося диска, соединенного с пьезоэлектрическим преобразователем. Размеры и форма преобразователя и диска выбраны из условия обеспечения заданной частоты и направленности излучения. Пьезоэлектрический преобразователь питается от генератора электрических колебаний УЗ частоты (на рис. 1 не показан).

Корпус сушилки состоит из верхнего и нижнего отражателей, показанных вместе с излучателем на рис. 2. Верхний отражатель (крышка) выполнен съемным, и предназначен для загрузки высушиваемого материала.



а)



б)

Рис. 2. Верхний (а) и нижний (б) отражатели сушильной камеры

В корпусе сушилки размещен контейнер для высушиваемого материала, состоящий из трех кольцеобразных поддонов, внешний вид которых показан на рис. 3. Поддоны располагаются горизонтально, на расстоянии по вертикали друг от друга 30 мм.



Рис. 3. Внешний вид поддонов для размещения высушиваемого материала (а) и их размещение в объеме сушильной камеры (б)

Внешний вид сушильной установки в сборе с системой управления и генератором электрических колебаний ультразвуковой частоты представлен на рис. 4.

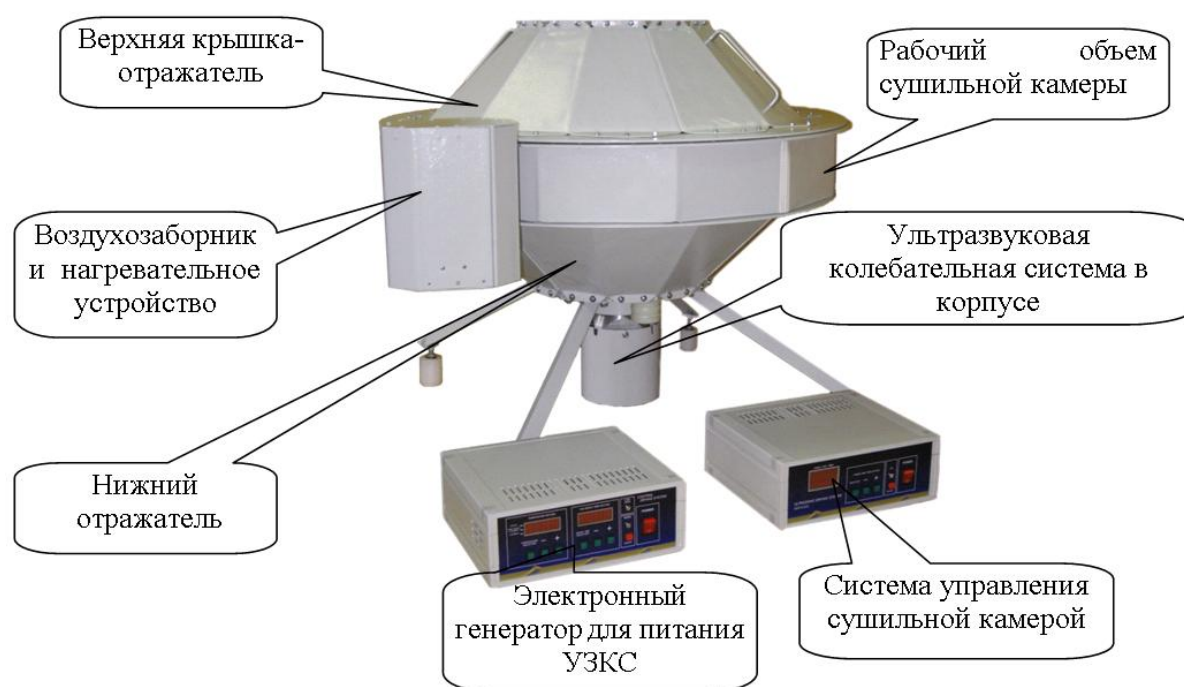


Рис. 4. Внешний вид сушильной установки

Для подтверждения эффективности созданной сушильной установки был проведен ряд экспериментов. На начальном этапе исследовалось распределение уровня интенсивности ультразвукового излучения в объеме сушильной камеры. От величины и равномерности распределения интенсивности УЗ излучения зависят, соответственно, скорость и качество высушивания материала.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для определения уровня интенсивности ультразвуковых колебаний в разработанной сушильной камере были проведены два типа экспериментов:

- измерение уровня интенсивности колебаний без верхней крышки сушильной камеры на различном расстоянии от излучателя;
- измерение уровня интенсивности колебаний в замкнутом объеме с закрытой верхней крышкой. При этом, благодаря специально рассчитанным размерам сушильной камеры, должен обеспечиваться режим стоячей волны во всем объеме сушильной камеры.

Для измерений использовался специализированный шумомер [9], имеющий расширенный частотный (до 30 кГц) и амплитудный (до 153 дБ) диапазоны. На рис. 5 представлены графики распределения уровня интенсивности ультразвуковых колебаний по оси излучателя для первого случая.

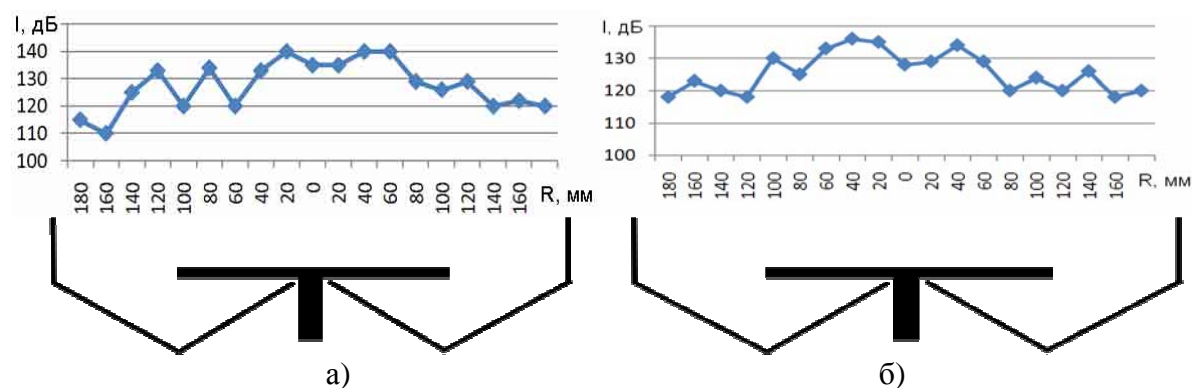


Рис. 5. Распределение уровня интенсивности звуковых колебаний над поверхностью дискового излучателя:

а – на расстоянии 250 мм от излучателя; б – на расстоянии 700 мм от излучателя

Из представленных зависимостей видно, что применение нижнего отражателя сушильной камеры позволяет, за счет использования отраженного излучения тыльной стороны диска, формировать область высокоинтенсивного звукового поля диаметром, двукратно превышающим диаметр дискового излучателя. Уровень интенсивности ультразвукового поля, формируемого за счет отраженных колебаний, приблизительно соответствует уровню интенсивности первичного звукового поля, излучаемого лицевой стороной диска.

Отклонения значений уровня интенсивности от среднего значения могут быть объяснены расположением нижнего отражателя в ближней зоне излучения тыльной стороны дискового излучателя, которая, как известно, характеризуется высокой степенью неоднородности звукового поля. Это факт подтверждается проведенными измерениями уровня интенсивности звукового поля на расстоянии 700 мм от поверхности дискового излучателя, которое можно рассматривать как область дальнего поля. Результаты измерений, представленные на рис. 5б, и свидетельствуют о меньших флуктуациях ультразвукового поля.

Картина существенно образом изменяется при измерении уровня интенсивности в закрытом объеме сушильной камеры (с установленным верхним отражателем-крышкой). Результаты измерений, полученные в этом случае, показаны на рис. 6.

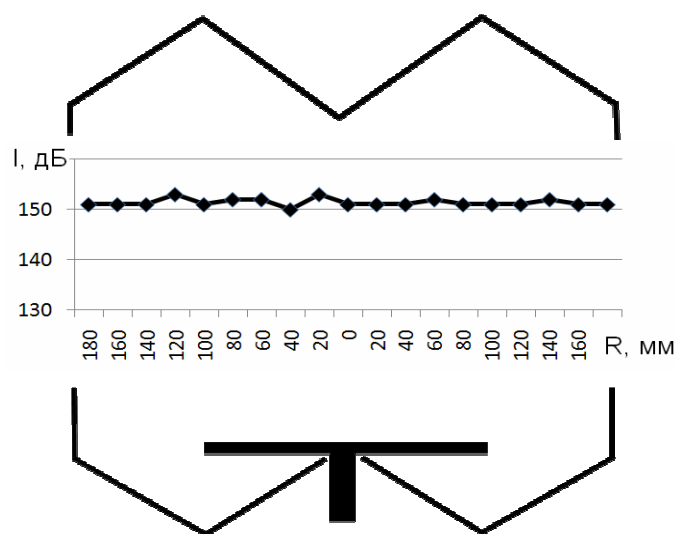


Рис. 6. Распределение уровня интенсивности звуковых колебаний в закрытом объеме сушильной камеры

Из представленных результатов следует, что в закрытом объеме сушильной камеры было получено практически однородное поле.

Таким образом, созданная сушильная камера обеспечивает во всем внутреннем объеме равномерное распределение УЗ колебаний с уровнем интенсивности в 150 дБ (обеспечивается за счет установления режима стоячей волны), что является достаточным для реализации процесса ультразвуковой сушки. Потребляемая электронным генератором электрическая мощность, при этом, не превышает 150 Вт.

Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанного дискового излучателя и оптимальность конструкции сушильной камеры.

Дальнейшие исследования были посвящены определению оптимальных режимов реализации процесса УЗ сушки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

Варьируемыми параметрами при проведении исследований являлись: скорость подачи сушильного агента в объем камеры, температура сушильного агента, тип (ткань, морковь, женьшень), форма и месторасположение высушиваемых образцов внутри сушильной камеры.

Эффективность процесса сушки 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 по следующему выражению:

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

где $m_{\text{тек}}$ — текущее значение массы образцов; $m_{\text{нач.общ}}$ — начальное значение массы образцов.

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

Скорость сушки определялась с использованием следующего выражения:

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

где $m_{\text{нач}}$ — масса образцов, измеренная непосредственно перед началом цикла сушки; $m_{\text{тек}}$ — масса образцов, измеренная после цикла сушки; $t_{\text{эсп}}$ — время цикла сушки.

Весь цикл экспериментов был разделен на три основных этапа:

1) определение степени интенсификации процесса сушки ультразвуковыми колебаниями;

2) определение равномерности высушивания материала в различных частях сушильной камеры;

3) определение эффективности сушки ультразвуковыми колебаниями различных материалов.

3.1. Степень интенсификации процесса сушки ультразвуковыми колебаниями

На начальной стадии экспериментов оценивался вклад в процесс сушки, вносимый ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. В качестве объекта сушки использовалась хлопчатобумажная ткань, в виде отдельных полос размерами 20×150 мм. Их общий начальный (влажный) вес составлял 3 кг.

На рис. 7, в виде гистограммы, представлены сравнительные результаты по скорости сушки, полученные с воздействием и без воздействия УЗ колебаний. Время проведения каждого эксперимента равнялось 30 мин. Скорость сушки, представленная на гистограмме, усреднена по всему времени проведения эксперимента.

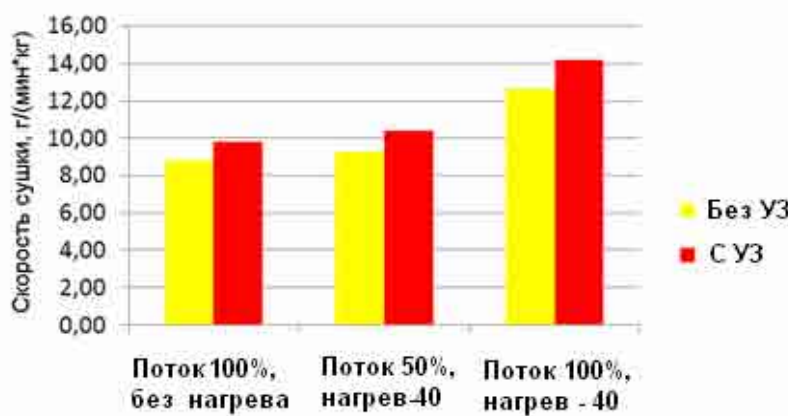


Рис. 7. Эффективность сушки ультразвуковыми колебаниями

Из гистограмм на рис. 7 следует, что воздействие ультразвуковыми колебаниями позволяет увеличить скорость ультразвуковой сушки от 2 до 6 г/мин на один кг массы высушиваемого образца при температуре 40 градусов Цельсия. При этом прирост скорости сушки и, следовательно, эффективность сушки ультразвуковыми колебаниями возрастает с увеличением температуры и скорости потока сушильного агента (от 0,25 м³/мин до 0,5 м³/мин).

Этот эффект можно объяснить следующим образом. При длительном воздействии (время эксперимента 30 мин.) нагретого воздуха, на высушиваемый материал, скорость удаления влаги с его поверхности превышает скорость ее подачи из внутренних слоев материала. Это приводит к образованию на поверхности материала, слоя с пониженным влагосодержанием, который препятствует дальнейшему эффективному удалению влаги.

При воздействии ультразвуковых колебаний, в высушиваемом материале возникает движение влаги из внутренних слоев материала к поверхностным, в достаточном количестве для ее эффективного удаления. Это препятствует образованию осушенного поверхностного слоя и значительно повышает эффективность сушки в целом.

Таким образом, приведенные результаты экспериментов показывают целесообразность применения ультразвуковых колебаний в сочетании с подачей нагретого сушильного агента.

3.2. Определение равномерности высушивания материала

При проведении этой серии экспериментов, эффективность сушки оценивалась отдельно для каждого из 6 секторов каждого поддона. Затем результаты усреднялись по всему поддону, и производилось сравнение результатов, полученных для каждого поддона. В качестве высушиваемого материала использовались образцы из предыдущих опытов. Время экспериментов – 30 мин.

На рис. 8 представлены гистограммы остаточной влажности тестовых образцов по секторам, для верхнего, среднего и нижнего поддонов соответственно.

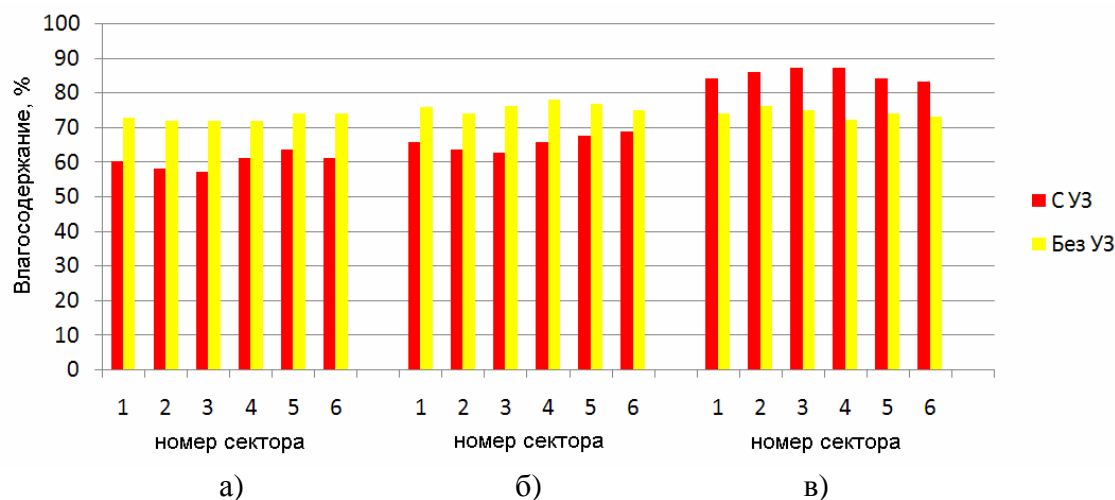


Рис. 8. Распределение остаточной влажности образцов по секторам поддонов
а – верхний поддон; б – средний поддон; в – нижний поддон

Из рис. 8 следует, что равномерность высушивания образцов по всем секторам приблизительно равная в пределах одного поддона. Величина остаточной влажности между секторами отличается не более чем на 1...3%, что свидетельствует о равномерном температурном и ультразвуковом поле внутри сушильной камеры.

На рис. 9а представлены результаты сравнения остаточной влажности усредненной по каждому из поддонов.

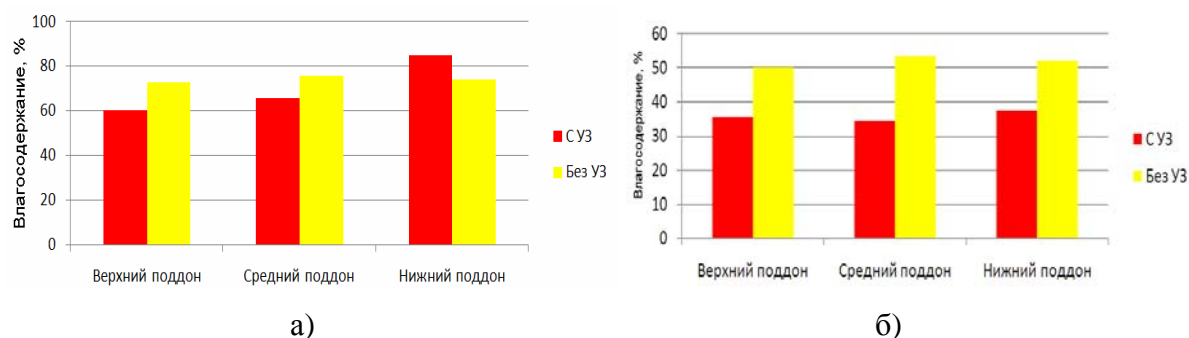


Рис. 9. Распределение остаточной влажности образцов по поддонам
а – сушка 30 мин; б – повторная сушка еще 30 мин

Повышенная остаточная влажность образцов на нижнем поддоне (рис. 9а), при сушке с УЗ колебаниями, может быть обусловлена высокой эффективностью УЗ колебаний приводящей, при значительном начальном влагосодержании образцов (более 160% по отношению к массе сухого материала), к распылению влаги с их поверхности. Распыленная влага не успевает удаляться системой подачи сушильного агента и оседает на материал, расположенный на нижнем поддоне.

Этот факт подтверждается повторной сушкой образцов с начальным влагосодержанием равным значению, полученному в предыдущем опыте. Результаты этого эксперимента, представленные на рис. 9б, демонстрируют высокую равномерность сушки материала в камере, при условии отсутствия кавитационного распыления влаги с его поверхности. Это позволяет проводить оценку эффективности УЗ сушки, как по образцам расположенным на одном из поддонов, или его части, так и по всей массе высушиваемого материала.

3.3. Определение эффективности сушки ультразвуковыми колебаниями различных материалов

Проведение заключительного этапа экспериментов было направлено на определение эффективности сушки ультразвуковыми колебаниями образцов различных продуктов, формы и размеров. В качестве экспериментальных образцов использовалась: морковь, нарезанная калиброванными дисками диаметром до 28 мм и толщиной 5 мм; морковь нарезанная брусками 35×5×3 мм; корень женьшеня цельный; корень женьшеня, нарезанный дисками толщиной 4...5 мм. Суммарный вес высушиваемых образцов каждого типа составлял 3 кг. Каждый тип образцов подвергался четырем комбинациям энергетического воздействия в сочетаниях, показанных в таблице 1.

Таблица 1. Схема эксперимента

	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
	Маркер —♦—	Маркер —■—	Маркер —×—	Маркер —▲—
Подача сушильного агента 0,5 м ³ /мин	+	+	+	+
Нагрев сушильного агента (40°C, 1000 Вт)	–	–	+	+
Ультразвуковое воздействие (150 Вт)	–	+	–	+

Внешний вид экспериментальных образцов до начала сушки показан на рис. 10.



а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Фото использовавшихся образцов:

а – морковь, нарезанная дисками; б – морковь, нарезанная брусками;
в – корень женьшеня; г – корень женьшеня, нарезанный дисками

На рис. 11 показана зависимость остаточного влагосодержания моркови от времени сушки.

Как и в случае с сушкой хлопчатобумажной ткани, приведенные результаты экспериментов показывают, что в обоих случаях, заметный эффект от воздействия УЗ колебаний проявляется только при подаче нагретого сушильного агента и может достигать 50 г влаги на 1 кг массы высушиваемого образца. При этом, эффект от ультразвукового воздействия увеличивается с течением времени. Это объясняется тем, что при сушке только нагретым воздухом, на всей поверхности моркови образуется слой с пониженным влагосодержанием, который препятствует эффективному удалению влаги с поверхности.

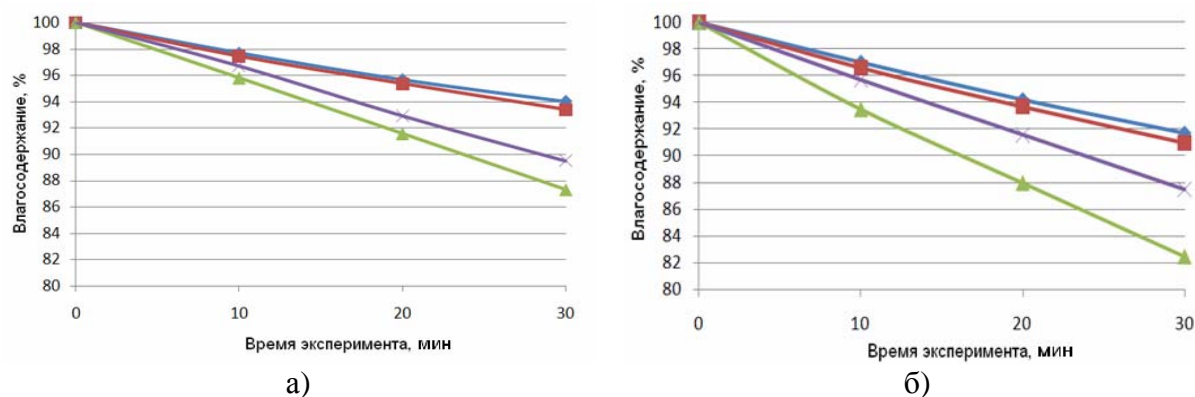


Рис. 11. Зависимость остаточного влагосодержания моркови от времени сушки:
а) – морковь, нарезанная дисками; б) – морковь, нарезанная брусками

С течением времени толщина этого слоя увеличивается, еще более уменьшая выход влаги. При воздействии УЗ колебаний, этого не происходит. 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, которая затем удаляется при помощи сушильного агента.

При этом, эффект от применения УЗ колебаний более значительный в случае, показанном на рис. 11б, соответствующем большей суммарной поверхности массопереноса.

На рис. 12 приведен характер изменения остаточного влагосодержания образцов женьшеня от времени сушки.

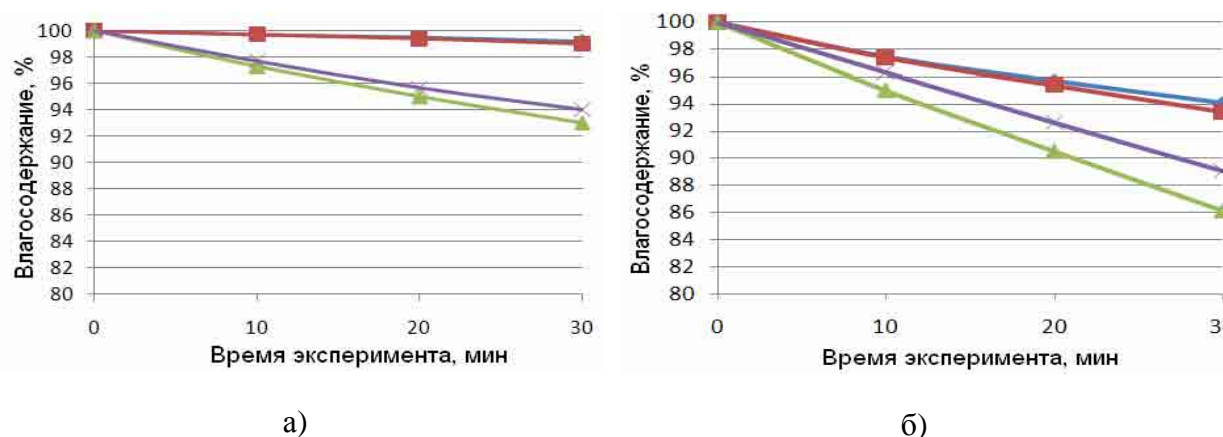


Рис. 12. Зависимость остаточного влагосодержания женьшеня от времени сушки
а – корень женьшеня, цельный; б – корень женьшеня, нарезанный дисками

Графики на рис. 11а 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 агента. 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. 11.б, напротив, показывают весьма значительный вклад, вносимый ультразвуковыми колебаниями в эффективность сушки, который может достигать до 29 грамм на килограмм массы образца.

Приведенные результаты экспериментов позволяют утверждать, что основным движущим фактором ультразвуковой сушки является развивающийся в звуковом поле эффект перемещения влаги по капиллярам к поверхности.

Для обобщения полученных результатов, и сравнения эффективности ультразвуковой сушки различных образцов, на рис. 13 приведена гистограмма остаточного влагосодержания всех рассмотренных образцов.

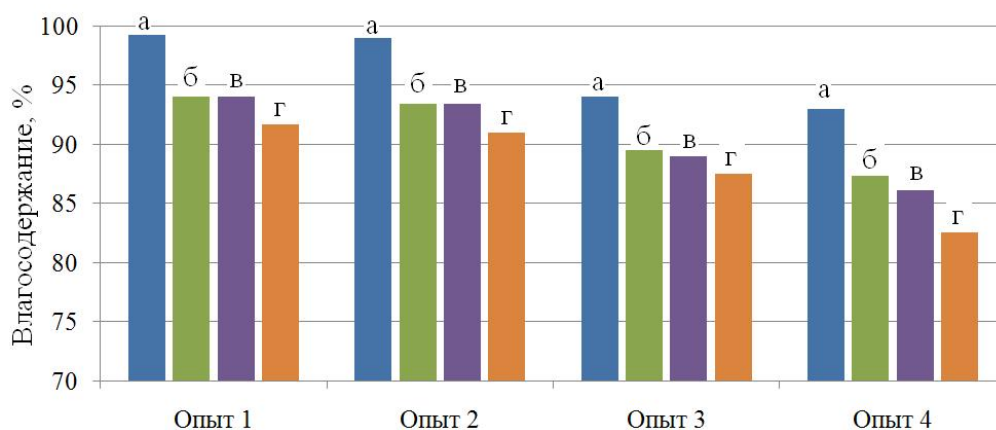


Рис. 13. Гистограмма скорости сушки различных образцов:

1 – корень женьшеня; 2 – морковь, нарезанная дисками;

3 – корень женьшеня, нарезанный дисками; 4 – морковь, нарезанная брусками

Таким образом, в результате проведенных исследований была показана эффективность ультразвуковой сушки в предложенной сушилке и определены условия обеспечения максимальной скорости процесса, без нагрева материала до температур, превышающих 40 градусов Цельсия.

4. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

На основании полученных результатов была проведена оценка энергетической эффективности ультразвуковой сушки. Оценка проводилась по потребляемой из электрической сети мощности. Были приняты следующие исходные данные: электрическая мощность, потребляемая ультразвуковым генератором – 150 Вт, мощность, потребляемая электрическим нагревателем сушильного агента – 1000 Вт, время цикла сушки – 30 мин, затраты на подачу сушильного агента не учитывались.

Расчет эффективности процесса проводился согласно следующему выражению:

$$\xi = \frac{P \cdot t}{m}, \quad (3)$$

где P – потребляемая электрическая мощность; t – время цикла сушки; m – масса удаленной влаги.

Полученные результаты приведены в таблице 2. В таблице приняты обозначения столбцов, соответствующие следующим типам высушиваемых образцов: 1 – хлопчатобумажная ткань; 2 – морковь, нарезанная дисками; 3 – морковь, нарезанная брусками; 4 – корень женьшеня цельный; 5 – корень женьшеня, нарезанный дисками.

Таблица 2. Сравнение энергетической эффективности

Вид воздействия	Кол-во удаленной влаги, г.					Энергетическая эффективность, Вт мин / г				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Подача нагретого сушильного агента	750	315	375	180	330	40	95	80	167	90
Подача нагретого сушильного агента и УЗ воздействие	1050	381	525	210	417	33	90	66	164	83
УЗ воздействие	300	66	150	30	87	15	68	30	150	51

Таким образом, приведенные в таблице 2 данные свидетельствуют о высокой эффективности применения ультразвуковых колебаний для сушки различных продуктов, обеспечивающей в некоторых случаях снижение энергозатрат на 20%, при сохранении времени сушки и уменьшении конечного влагосодержания продукта. Приведенные значения энергетической эффективности, также свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования излучателей УЗ колебаний для увеличения мощности создаваемых колебаний. Согласно полученным данным, это позволит еще более увеличить скорость и снизить энергозатраты на процесс сушки.

В целом, разработанная ультразвуковая сушильная установка обладает техническими характеристиками, приведенными в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики УЗ сушильной установки

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Максимальная загрузка сушильной камеры	кг	3
Мощность, потребляемая УЗ генератором	Вт	150
Мощность, потребляемая нагревателем (ТЭН)	Вт	1000
Размеры сушильной камеры, диаметр, высота	мм	850×600
Максимальная температура нагрева сушильного агента	°С	40
Расход сушильного агента	м ³ /мин	0,5
Частота УЗ колебаний	кГц	24

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований создана конструкция ультразвуковой сушильной установки, обеспечивающей эффективную сушку термолабильных материалов и продуктов при температуре сушильного агента не более 40°C 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 сушильного агента, без потери в качестве и скорости сушки. Последнее особенно важно для производств, где нагрев высушиваемого продукта недопустим или нежелателен.

Высокая эффективность процесса сушки обеспечена за счет применения в конструкции сушильной установки дискового излучателя, формирующего УЗ поле с уровнем интенсивности не менее 130 дБ, и резонансного объема сушильной камеры, обеспечивающего усиление уровня интенсивности до 150 дБ.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Розенберг Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1969. – 689 с.
2. S. de la Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V. M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, J. A. Gallego-Juarez. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, Elsevier USA, 2006, 44, p. 523–527.
3. Глазнев В. Н. Устройство для сушки капиллярно-пористых сыпучих материалов. Патент РФ № 2095707.
4. E. Riera-Franco de Sarabia, J. A. Gallego-Juarez, G. Rodríguez-Corral, V. M. Acosta-Aparicio, E. Andrés-Gallegos. Application of high-power ultrasound for drying vegetables. 19th International Congress on Acoustic, Madrid, Spain, 2007.
5. В.Н. Хмёлев, А.В. Шалунов и др. Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности. Барнаул: АлтГТУ, 2007. 416 с.
6. A. N. Lebedev; A. V. Shalunov; S. S. Khmelev; N. V. Kuchin; A. V. Shalunova. Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media. International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008. Novosibirsk: NSTU, 2008.
7. V. N. Khmelev, S. V. Levin, S. N. Tsyganok, A. N. Lebedev. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems. International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2007, p. 293–298.
8. Choo Kwang Moon, V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, Lee Hyo-Jai, A. N. Lebedev, M. V. Khmelev. Compact Ultrasonic Dryer for Capillary-porous and Loose Materials. Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2008, p. 295–299.
9. V. N. Khmelev, D. V. Genne, A. A. Bahirev, I. I. Savin The Meter of the Level High-Intensity Ultrasonic Pressure. International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2006, p. 232–233.