

Компактная Ультразвуковая Сушилка Для Капиллярно-пористых и Сыпучих Материалов

Владимир Н. Хмелев¹, д.т.н., *Senior Member* IEEE, Андрей В. Шалунов¹, к.т.н., Kwang Moon Choо², Андрей Н. Лебедев¹, *Student Member*, IEEE, Максим В. Хмелев¹, *Student Member*, IEEE
¹Бийский технологический институт (филиал)

ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

²Dooson co.,Ltd (Республика Корея)

Аннотация – В статье описывается устройство для ультразвуковой сушки обладающее улучшенными техническими характеристиками, полученными за счет применения сушильной камеры специальной формы.

Ключевые слова – ультразвук, ультразвуковая сушка, сушилка, капиллярно-пористые, сыпучие материалы, дисковый излучатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

СУШКА – ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ СТАДИЯ большинства технологических процессов, связанных с получением конечного продукта для его длительного хранения. Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из материалов или продуктов является самой продолжительной и самой затратной стадией переработки сырья.

В настоящее время для сушки большинства продуктов пищевого и фармацевтического назначения используют конвективный способ, заключающийся в том, что сухой воздух прогревается с использованием встроенного нагревательного элемента, нагретый воздух с помощью вентилятора направляется в барабан сушилки, проходит через высушиваемый материал, увлажняется, затем вне пределов барабана охлаждается с помощью холодной воды или воздуха. Процесс длится столько времени, сколько нужно для высухания материала [1].

Современная сушка в технологическом оформлении используемых сушилок характеризуется следующими недостатками[2]:

- процесс чрезвычайно энергоемок и длителен;
- сушилки не могут быть малогабаритными, так как это уменьшает воздушный объем в барабане, что с одной стороны ограничивает скорость процесса, а с другой увеличивает себестоимость;
- для качественной сушки необходимо уменьшать загрузку;

– высокая температура приводит к пересыханию и порчи высушиваемых материалов. Для исключения этого момента необходимо снабжать сушилку «умной» и дорогой электронной системой контроля температуры высушиваемого материала, что значительно увеличивает стоимость сушилки.

Приведенные недостатки объясняются не низким уровнем проработанности конструктивных решений, а недостатками положенного в основу метода – конвективной сушки.

Перспективным вариантом замены или дополнения конвективного способа сушки является сушка в акустических полях высокой интенсивности, что связано со следующими достоинствами метода:

- высокая интенсивность процесса;
- возможность обеспечения качественной и эффективной сушки при низких температурах, или принципиально без повышения температуры (исключение разрушения структуры, сохранения всхожести зерна и т.п.);
- возможность разработки самонастраивающихся ультразвуковых генераторов, что не требует пользовательского контроля над работой системы.

Вышеперечисленные достоинства объясняют большой интерес к технологии ультразвуковой сушки. Однако попытки практической реализации процесса ультразвуковой сушки сталкиваются с рядом технологических сложностей:

- необходимость создания акустических колебаний в воздушной среде с интенсивностями более 140 дБ;
- необходимость создания сушильной камеры, обеспечивающей равномерное воздействие акустических колебаний по всему высушиваемому материалу.

Таким образом, устранение вышеперечисленных сложностей технологического характера и создание промышленных образцов ультразвуковой сушки является актуальной задачей.

II. СУЩЕСТВУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

Существующие в настоящее время ультразвуковые сушильные установки имеют в своей основе общую конструктивную схему [3].

Для генерации акустических колебаний в них используются различные типы аэродинамических излучателей, а сушильная камера выполняется, как правило, в виде протяженного канала-звукопровода. Форма поперечного сечения канала может быть любой, однако наиболее распространение получила прямоугольная форма благодаря наибольшей простоте расчета распространения в ней акустических волн.

На одном торце сушильной камеры располагается излучатель ультразвуковых колебаний, на противоположном (тыльном) – звукоотражающий или звукопоглощающий материал. В случае применения на тыльном торце звукопоглощающего материала в сушильной камере реализуется режим бегущей волны и до 80% акустической энергии поглощается в звукопоглотителе и не участвует в процессе сушки, т.е. реализуется наименее эффективный режим ультразвуковой сушки.

Подобным устройствам также свойственен целый ряд недостатков:

1) использование в качестве источника звука газоструйного излучателя, в свою очередь, обладающего следующими недостатками:

- а) низкий КПД, не превышающий 20%;
- б) быстрый износ механических узлов;
- в) невозможность работы на высоких частотах (более 20 кГц) и, как следствие, необходимость защиты обслуживающего персонала от акустического излучения (наиболее часто используется частота от 150 до 500 Гц);

г) необходимость подвода сжатого воздуха высокого давления, для чего необходимо использование компрессора;

д) большие массогабаритные характеристики, исключающие возможность создания малогабаритной сушилки;

е) невозможность осуществления «деликатной» сушки, вызванная необходимостью подачи в сушильную камеру больших объемов воздуха для работы газоструйного излучателя;

2) неоптимальная форма сушильной камеры, выполненная в виде протяженного канала, приводящая к низкой эффективности использования акустической энергии и отсутствию фокусирования акустических колебаний на высушиваемом материале.

Как видно основные недостатки существующих ультразвуковых сушилок обусловлены использованием в качестве источника ультразвуковых колебаний газоструйного излучателя и су-

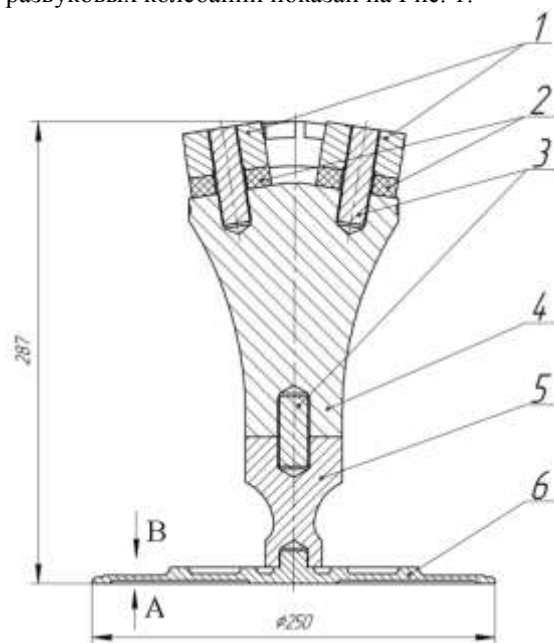
шильной камерой неоптимальных размеров и формы.

Указывающиеся в статьях описывающих подобные конструкции [4,5] повышение эффективности процесса сушки получено только благодаря принципиально высокой эффективности акустического воздействия. Уже само наложение акустического поля на высушиваемый материал приводит к повышению эффективности и снижению энергоемкости сушки. Однако эффективность таких сушилок составляет единицы процентов от теоретически возможной для ультразвуковой сушки.

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для устранения указанных недостатков в разработанном оборудовании для ультразвуковой сушки в качестве источника ультразвуковых колебаний был применен излучатель выполненный в виде изгибно-колеблющегося диска, размеры и форма которого выбраны из условия обеспечения необходимых частоты и направленности излучения ультразвуковых колебаний. Излучатель соединен с пьезоэлектрическим преобразователем [6], питаемым электронным генератором ультразвуковой частоты (не показан).

Схематично разработанный излучатель ультразвуковых колебаний показан на Рис. 1.



1 – задние отражающие накладки, 2 – пьезоэлектрические элементы, 3 – стягивающие шпильки, 4 – преобразователь, 5 – концентратор, 6 – дисковый излучатель

Рис. 1. Схематичный вид УЗКС с двухполуволновым преобразователем

Излучающим элементом является лицевая (А) и тыльная (В) поверхность диска (поз. 6). Таким образом, диск излучает колебания в обе стороны. Изгибные колебания диска возбуждаются про-

дольными колебаниями, создаваемые пьезоэлектрическими элементами (поз. 2). Акустическая связь внутри УЗКС обеспечивается за счет того, что пьезоэлектрические элементы зажаты между преобразователем (поз. 4) и задней частотопонижающей накладкой (поз. 1) с силой, многократно превышающей величину знакопеременной силы, создаваемой пьезоэлектрическими элементами. Стягивающее усилие обеспечивается задними частотопонижающими накладками и шпильками (поз. 3).

Особенность созданного дискового излучателя, связанная с двусторонним излучением плоской (не расходящейся) ультразвуковой волны предъявляет определенные требования к сушильной камере. Сушильная камера должна обеспечивать:

- 1) возможность использования излучения тыльной стороны дискового излучателя;
- 2) возможность равномерного распределения акустических колебаний по высушиваемому материалу;
- 3) возможность работы в режиме стоячей волны, обеспечивающем наиболее полное использование энергии ультразвуковых колебаний;
- 4) предпочтительное наличие фокусировки ультразвуковых колебаний на высушиваемом материале.

На Рис. 2 показан наиболее простой вариант реализации сушильной камеры.

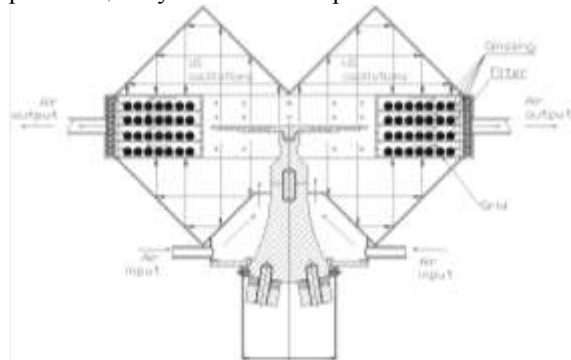


Рис. 2. Вариант исполнения сушильной камеры с равномерным распределением ультразвуковых колебаний по высушиваемому материалу

Корпус сушилки состоит из верхней и нижней секций. Верхняя секция выполнена съемной и предназначена для загрузки высушиваемого материала.

При использовании сушильной камеры этого типа, стенки сушильной камеры располагаются в ближней зоне дискового излучателя. В этой зоне излучение можно считать направленным преимущественно перпендикулярно поверхности дискового излучателя. Ультразвуковые волны за счет двукратного отражения и от стенок сушильной камеры (стенки представляют собой усеченный конус с наклоном образующей 45°) равно-

мерно распределяются по кольцеобразному контейнеру с высушиваемым материалом. Ширина контейнера должна быть равна радиусу дискового излучателя. Достоинствами сушильной камеры являются простота конструкции, использование излучения обеих сторон диска, равномерность воздействия ультразвуковыми колебаниями на высушиваемый материал и компактность сушилки.

На Рис.3 схематично показана более эффективная сушильная камера, с дисковым излучателем 1, обеспечивающая фокусировку ультразвуковых колебаний на высушиваемом материале. Для повышения эффективности сушки система снабжена устройствами подачи 3 и отвода 2 сушильного воздуха.

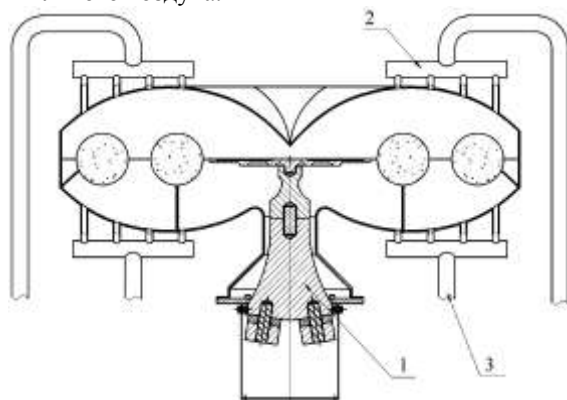


Рис. 3. Вариант исполнения сушильной камеры с фокусировкой ультразвуковых колебаний на высушиваемом материале

Корпус сушилки также состоит из верхней 4 и нижней 5 секций (см. Рис. 4). Верхняя секция выполнена съемной и предназначена для загрузки высушиваемого материала. Внутренняя поверхность корпуса сушилки образована вращением вокруг акустической оси изгибающегося диска двух пересекающихся осесимметричных парабол имеющих общий фокус.

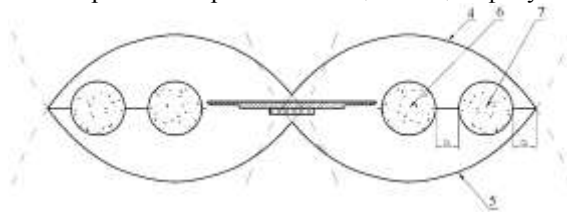


Рис. 4. Схематичное изображение сушильной камеры

В корпусе сушилки расположен контейнер для высушиваемого материала, состоящий из двух тороидальных секций, расположенных в горизонтальной плоскости, причем одна из тороидальных секций контейнера 6 находится в области общего фокуса парабол, а вторая 7 расположена на равном расстоянии a от боковой стенки сушильной камеры и первой секции. При этом желательно, чтобы габаритные размеры сушилки выбирались из условия обеспечения минимума расстояния a .

Для осуществления процесса сушки обе тороидальные секции контейнера заполняют высушиваемым материалом. Затем контейнер с высушиваемым материалом помещают в корпус сушилки и осуществляют воздействие ультразвуковыми колебаниями до момента удаления необходимого количества влаги. При генерировании изгибно-колеблющимся диском плоской волны распределение ультразвуковых колебаний внутри сушильной камеры примет вид, показанный на Рис. 5 стрелками.

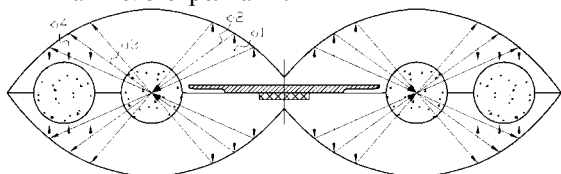


Рис. 5. Распределение ультразвуковых колебаний внутри сушильной камеры

При выборе расстояния $b_1+b_2+b_3+b_4$ кратным длине волны ультразвуковых колебаний в воздушной среде будет обеспечиваться режим стоячей волны, который является самым энергетически выгодным режимом ультразвукового воздействия. Благодаря выполнению внутренней поверхности корпуса сушилки в виде параболы расстояние $b_1+b_2+b_3+b_4$ будет равным для каждой точки поверхности изгибно-колеблющегося диска и контейнера с высушиваемым материалом. В результате будет обеспечена равномерность высушивания материала по всему объему.

Разработанная сушильная камера позволяет реализовать следующие режимы сушки: конвекционно-ультразвуковую, вакуумно-ультразвуковую и сушку с попеременным изменением давления в сушильной камере. Разработанная сушильная камера имеет следующие технические характеристики:

- интенсивность формируемых акустических колебаний, не менее 140 дБ;
- частота колебаний генерируемых изгибно-колеблющимся дисковым излучателем 22 кГц;
- максимальная амплитуда (размах амплитуды) колебаний дискового излучателя 100 мкм;
- диаметр излучающего диска колебательной системы – не более 250 мм;
- материал дискового излучателя и концентратора – титановый сплав;
- диаметр сушильной камеры 750 мм;
- материал сушильной камеры – металл;
- интенсивность акустических колебаний в сушильной камере (при интенсивности излучения 140 дБ) – не менее 150 дБ;
- максимальная загрузка сушильной камеры 15 кг.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для определения эффективности созданной конструкции сушильной камеры были проведены экспериментальные исследования, при которых использовался дисковый излучатель с потребляемой электрической мощностью 200 Вт. Температура в сушильной камере поддерживалась на уровне 23 – 26°C., влажность 50 – 65 %. Дополнительная подача и отвод сушильного воздуха не использовались, т.е. для подтверждения эффективности использовался самый нерациональный способ сушки.

Были проведены две серии экспериментов. Время сушки принималось равным 160 минутам. В первой серии экспериментов в качестве высушиваемого материала использовался размоченный в воде желатин. Результаты сушки приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА II
РЕЗУЛЬТАТЫ СУШКИ ЖЕЛАТИНА

Время, мин	Масса, г	Скорость, г/мин	Влагосодержание, %
10	4709		172,04
20	4413	29,6	154,94
30	4125	28,8	138,30
40	3843	28,2	122,01
50	3670	17,3	112,02
60	3386	28,4	95,61
70	3192	19,4	84,40
80	3027	16,5	74,87
90	2868	15,9	65,68
100	2732	13,6	57,83
110	2614	11,8	51,01
120	2513	10,1	45,18
130	2428	8,5	40,27
140	2349	7,9	35,70
150	2277	7,2	31,54
160	2221	5,6	28,31

Таким образом, после 160 минут сушки желатина его конечное влагосодержание составило 28,31%, при этом энергозатраты составили приблизительно 0,6 кВт. При использовании ультразвуковой сушилки с газоструйным преобразователем для высушивания такого же количества желатина, потребовалось 230 минут при энергозатратах в 2,3 кВт.

Во второй серии экспериментов осуществлялся процесс сушки моркови. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА II
РЕЗУЛЬТАТЫ СУШКИ МОРКОВИ

Время, мин	Масса, г	Влажность, %	Скорость, г/мин
10	1509	601,43	
20	1464	579,74	4,5
30	1425	561,53	3,8
40	1388	543,89	3,7
50	1349	525,34	3,9
60	1310	506,75	3,9
70	1274	489,78	3,6
80	1239	472,61	3,6
90	1205	456,35	3,4
100	1168	439,04	3,6
110	1137	424,20	3,1
120	1105	409,03	3,2
130	1075	395,20	2,9
140	1047	381,88	2,8
150	1023	370,33	2,4
160	996	357,06	2,8

После сушки моркови ее влагосодержание уменьшилось приблизительно в два раза, при этом энергозатраты составили 0,6 кВт. При использовании ультразвуковой сушилки с газоструйным преобразователем для высушивания такого же количества желатина, потребовалось 300 минут при энергозатратах в 3 кВт.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ было разработано устройство для ультразвуковой сушки, в котором задача повышения эффективности ультразвукового воздействия и увеличения скорости сушки решается за счет:

1) создания сушильной камеры специальной формы, обеспечивающей формирование оптимального акустического поля, фокусирования ультразвуковых колебаний в высушиваемом сырье и формирование режима стоячей волны, что позволяет обеспечить наиболее полное использование энергии ультразвуковых колебаний;

2) использования в качестве источника ультразвуковых колебаний пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы с излучателем в виде изгибно-колеблющегося диска, позволяющего формировать равномерно ультразвуковое излучение на большой площади.

Приведенные экспериментальные исследования показывают эффективность разработанного оборудования для ультразвуковой сушки и перспективность его применения в качестве про-

мышленных и малогабаритных коммерческих сушильных установок.

Мелкосерийное производство разработанного устройства для ультразвуковой сушки планируется начать в 2009 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
- [3] Патент РФ № 2095707.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.