

РАЗРАБОТКА ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА УЛЬТРАЗВУКОВОГО АППАРАТА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ

В.Н. Хмелев, д.т.н., Роман В. Барсуков, к.т.н.
Д.С. Абраменко, Д.В. Генне

Бийский технологический институт (филиал)

*ГОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г.Бийск*

Аннотация – В статье изложены теоретические основы ультразвуковой сушки. Рассматривается возможность создания в закрытом объеме сушильной камеры ультразвукового поля с интенсивностью около 150 дБ при помощи дисковых излучателей. Описывается макет ультразвуковой сушилки для проведения экспериментов по сушке различных материалов, представлены результаты предварительных экспериментов по сушке желатина, гороха, х.б. ткани и моркови.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сушка – заключительная стадия большинства технологических процессов, связанных с получением конечного продукта для его длительного хранения и является самой продолжительной и самой затратной стадией переработки сырья.

Наибольшее распространение получила конвективная сушка, где процесс связан с подводом в сушильную камеру определенного количества тепла. Этот процесс неразрывно связан с повышением температуры высушиваемых материалов, что в некоторых случаях приводит к порче или к нежелательному изменению свойств высушиваемых материалов. Это, в первую очередь, относится к сушке фармацевтических материалов. При снижении температуры сушильного агента, время сушки значительно увеличивается.

Возможным 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.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию макетного образца ультразвукового аппарата для интенсификации процесса сушки, а также теоретическому анализу возможностей применения акустической сушки и выработки предложений для практической реализации малогабаритной системы акустической сушки.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

Классическая теория сушки основывается на том, что процесс состоит из двух основных этапов, обычно называемых первым периодом, или периодом постоянной скорости, и вторым периодом, или периодом падающей скорости сушки [1].

В первом периоде процесс характеризуется линейным изменением влагосодержания высушиваемого материала во времени. Процесс сушки в первом периоде эквивалентен испарению жидкости со свободной поверхности и определяется лишь внешними факторами, т.е. температурой, скоростью движения и влагосодержанием окружающего воздуха.

Процесс испарения влаги со свободной поверхности в изотермических условиях подчиняется закону Дальтона:

$$\frac{dm}{d\tau} = KS \frac{P_0 - P_\infty}{P_\delta},$$

где m - масса испарившейся жидкости; τ - время; K - коэффициент, учитывающий гидродинамические условия на поверхности; S - площадь поверхности испарения материала; P_0 - давление насыщенного пара на поверхности материала (при температуре поверхности); P_∞ - парциальное давление пара в окружающей среде; P_δ - барометрическое давление в окружающей среде.

По мере уменьшения влажности в материале наступает момент, когда скорость подачи влаги к поверхности оказывается недостаточной и скорость сушки начинает падать. Влажность, при которой падает скорость сушки, называется критической влажностью. Начиная с критической влажности, наступает второй период сушки.

Во втором периоде скорость сушки определяется скоростью перемещения жидкой и газообразной фаз внутри материала и зависит, глазным образом, от условий внутри материала.

Общий поток влаги внутри материала может быть выражен равенством:

$$\frac{dm}{d\tau} = a_m \rho_0 \nabla U - a_m^T \rho_0 \nabla T - K_p \nabla P,$$

где a_m - коэффициент диффузии влаги; ∇U - градиент влажности; a_m^T - коэффициент термодиффузии; ρ_0 - плотность сухого тела; ∇T - градиент температуры; K_p - коэффициент молярного переноса под действием градиента давления; ∇P - градиент давления.

Процесс сушки продолжается до тех пор, пока влажность материала не достигнет равновесного (при заданных условиях) значения, после чего процесс прекращается. Интенсифицирующее действие ультразвука возможно как на первой, так и на второй стадиях процесса сушки. К интенсифицирующим факторам, при акустическом воздействии на высушиваемый объект, относят: уменьшение толщины диффузионного пограничного слоя; уменьшение вязкости жидкости под действием УЗ, способствующее ускоренному перемещению влаги из глубины материала на поверхность; выдавливание влаги из материала кавитационными пузырьками газа, возникающими под действием УЗ колебаний и колеблющимися в жидкости; радиационное давление, выдавливающее жидкость из материала.

Для подтверждения эффективности ультразвуковой сушки и определения ее функциональных возможностей был проведен ряд соответствующих исследований. Поскольку наиболее распространение получили сушильные камеры барабанного типа [2], было принято решение все исследования проводить на базе конструкций, имитирующих рабочий объем сушилок подобного типа.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Очевидно, что распределение звукового давления в объеме сушильной камеры зависит от места расположения ультразвуковых излучателей. В связи с этим, на начальном этапе исследований было определено место оптимального размещения излучателей.

Для проведения экспериментов по исследованию процесса акустической сушки был изготовлен макет сушильной камеры, выполненной в виде цилиндра из многослойного картона, как показано на рисунке 1.а. Диаметр и длина камеры составила 830 мм.

Измерения звукового давления внутри камеры при различном расположении дисковых ультразвуковых излучателей, показали, что более равномерное распределе-

ние звукового давления внутри камеры наблюдается при таком расположении излучателей, как показано на рисунке 1.а.

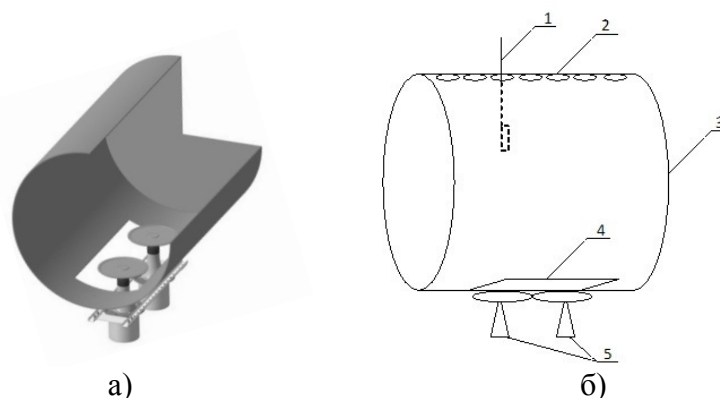


Рисунок 1 - Эскиз макета ультразвуковой сушильной камеры в разрезе (а), установка для измерения распределения звукового поля в закрытом цилиндрическом объеме (б)

В прямоугольное окно камеры, размером 280x500 мм, были установлены два дисковых излучателя [3]. Мощность каждого из ультразвуковых генераторов составила 200Вт. Рабочая частота 23000 Гц. Непосредственно перед проведением опытов, связанных с исследованием акустической сушки, были проведены измерения распределения звукового давления внутри камеры. В таблице представлено распределение звукового давления внутри сушильной камеры, в вертикальной плоскости, рассекающей цилиндрическую камеру вдоль ее оси вращения.

Таблица - Распределение интенсивности звукового давления в плоскости рабочей камеры (излучатели не закрыты сеткой) дБ

		Расположение точки измерений вдоль оси цилиндра, мм							Среднее
		100	200	300	400	500	600	700	
Высота микрофона над излучателями, мм	450	146	146	149	148	150	147	148	147,7
	350	148	144	148	150	147	148	150	147,9
	250	144	148	151	150	150	152	152	149,6
	150	142	150	150	152	151	152	150	149,6
	50	144	150	152	152	151	150	152	150,1
Среднее		144,8	147,6	150	150,4	149,8	149,8	150,4	

На рисунке 1.б. показана методика определения распределения интенсивности звукового поля внутри камеры, в сечении, рассекающим цилиндрическую камеру на две равные части вдоль ее оси вращения, где, где 1 – микрофон, перемещаемый вверх-вниз, 2 – отверстия для введения микрофона в разные точки озвучиваемого объема, 3 – полый цилиндрический объем, 4 – прямоугольное отверстие в нижней части цилиндра с установленной сеткой, 5 – два дисковых излучателя.

Измерения проводились на различной высоте погружения микрофона в камеру для всех отверстий 2. Микрофон перемещался вверх-вниз с шагом 100 мм, расстояние между отверстиями составляет так же 100 мм.

В результате измерений было получено распределений звукового поля в плоскости, рассекающей камеру вертикально вдоль ее оси на две равные половинки.

Из таблицы видно, что интенсивность звукового давления в сушильной камере в среднем составляет 149 дБ, что является достаточным для интенсификации процесса сушки[1].

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

При проведении экспериментов сушки в ультразвуковом поле, высушиваемый материал размещался на полимерной сетке, на расстоянии 250 мм от излучателей. Интенсивность излучения над поверхностью сетки составляла 150 дБ. Потребляемая мощность акустическими излучателями составила 2x200 Вт. Температура в сушильной камере 23 – 26°C. Влажность в камере 50 – 65 %. Дополнительный нагрев и обдув не использовались, т.е. для подтверждения эффективности акустической сушки реализовывался самый нерациональный способ сушки.

В ходе экспериментов сушке подвергались различные материалы: пластинки желатина, х.б. ткань, горох, ломтики свежей моркови.

1. Эксперимент №1. Сушка желатина

Для проведения эксперимента было взято 17,2 г сухого желатина. После замачивания, масса желатина составила 47,09 г. Размоченные образцы желатина были помещены в сушильную камеру. Кривые изменения влагосодержания и скорости сушки представлены на рисунке 2 а, б.

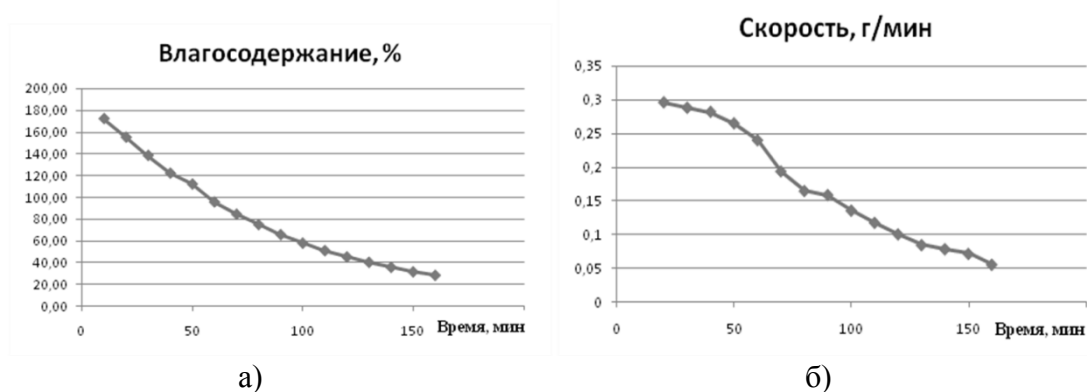


Рисунок 2 - Изменение влагосодержания (а) и скорость (б) сушки желатина

Из графиков видно, что в течение 160 минут ультразвуковой сушки, влагосодержание уменьшилось со 175 до 25%. Скорость сушки, как было показано на теоретических моделях, так же замедляется. Процесс сушки желатиновых пластинок имеет следующую особенность. По истечении некоторого времени, после начала процесса сушки, пластинка желатина покрывается сухой корочкой, что замедляет удаление влаги из внутреннего объема желатиновой пластинки. Уменьшение толщины высушиваемых пластинок, увеличивает скорость сушки.

2. Эксперимент №2. Сушка хлопчатобумажной ткани

Масса сухого образца: 100 г. Для сравнения были проведены эксперименты по сушке образца в естественных условиях и с помощью термической сушилки мощностью 1000 Вт, при температуре теплоносителя 60°C. Сравнительные графики изменения влагосодержания и скорости сушки при разных типах сушки представлены на рисунке 3 а,б.

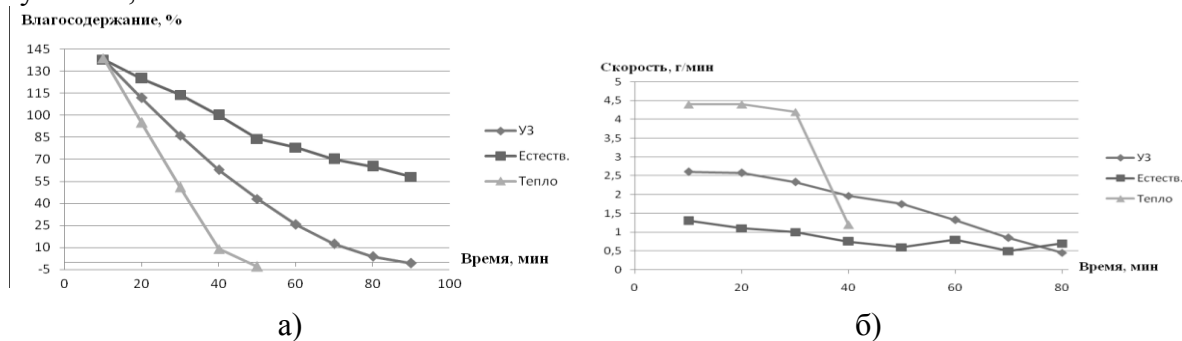


Рисунок 3 - Изменение влагосодержания (а) и скорость (б) сушки хлопчатобумажной ткани

По полученным данным было проведено сравнение эффективности ультразвуковой и тепловой сушки. Были приняты следующие исходные данные: КПД ультразвукового аппарата: 50 %, излучаемая акустическая мощность рассчитывалась по следующей формуле: $P_{ак} = P_{потреб.} \cdot \text{КПД} = 2 \cdot 200 \text{ Вт} \cdot 50\% = 200 \text{ Вт}$

Излучаемая мощность тепловой сушилки: 1000 Вт (паспортные данные). Время ультразвуковой сушки: 90 мин. Время тепловой сушки 50 мин. Количество удаленной влаги, при ультразвуковой сушке: 138,64 г; при тепловой: 142 г.

Расчет эффективности процесса проводился согласно следующему выражению:

$$\varepsilon = \frac{P \cdot t}{m} \quad (1)$$

где P – излучаемая мощность, t – общее время сушки, m – масса удаленной влаги.

Согласно выражению (1) показатель эффективности для ультразвуковой сушки составил: 129,83 Вт·мин/г, а для тепловой сушки: 352,11 Вт·мин/г. Таким образом, ультразвуковая сушка эффективнее тепловой в 2,7 раза.

Сравнительный график зависимости энергоемкости процесса ультразвуковой и тепловой сушки от времени, представлен на рисунке 4.

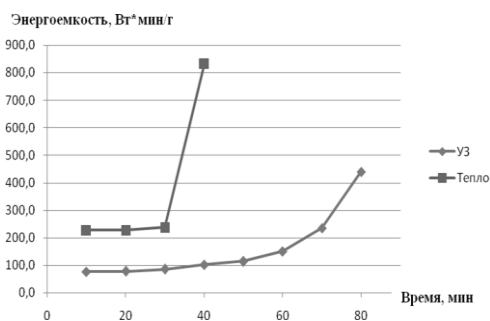


Рисунок 4 - Зависимости энергоемкости процесса акустической и тепловой сушки от времени

3. Эксперимент № 3. Сушка гороха

В ходе эксперимента было взято 105 грамм сухого гороха, который был предварительно замочен до 46%-й влажности. Графики изменения влагосодержания и скорости сушки представлены на рисунке 5а.б.

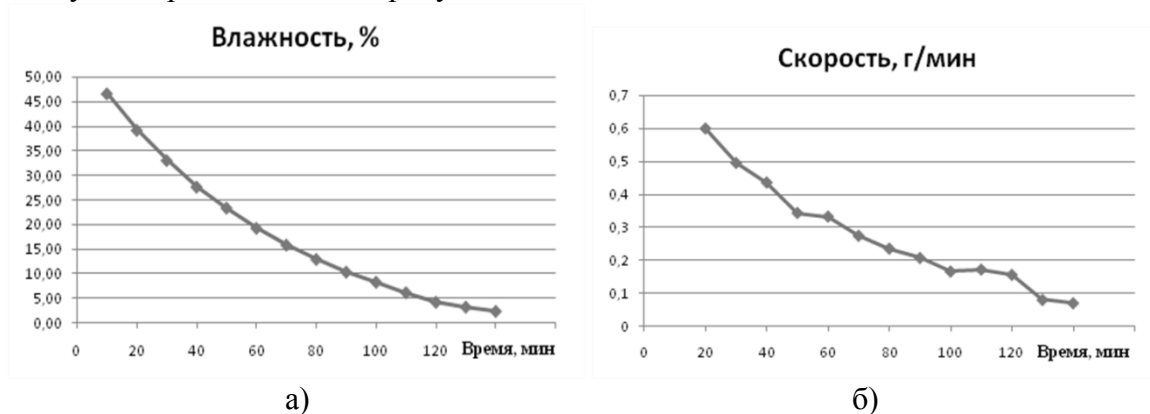


Рисунок 5 - Изменение влагосодержания (а) и скорость (б) сушки гороха

В процессе ультразвуковой сушки, которая проходила в течении 140 минут, влагосодержание гороха было снижено до 3 %.

4. Эксперимент №4 – Сушка моркови

Масса высушенной моркови составила 24,48 г. Для определения сухой массы продукта после проведения экспериментов морковь была помещена на 14 часов в термическую сушилку до полного высыхания. На рисунке 6а.б. представлены зависимость изменения влагосодержания и скорости сушки, при УЗ воздействии. Сырая морковь была разрезана на несколько пластинок, толщиной в среднем по 5 мм.

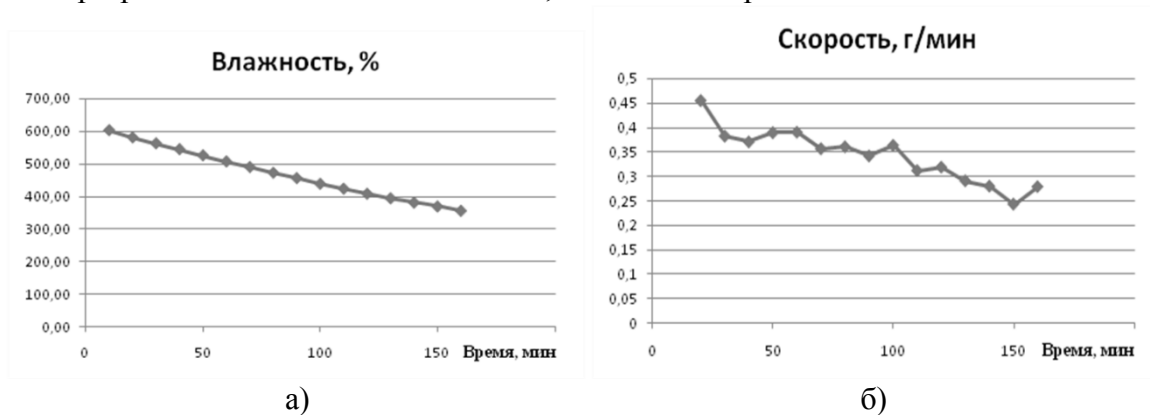


Рисунок 6 - Изменение влагосодержания (а) и скорость (б) сушки моркови

В ходе эксперимента влажность была снижена с 600 до 350%. Начальная скорость процесса сушки моркови в сравнении со скоростью сушки, например, гороха, немного меньше, однако, в виду большого влагосодержания, процесс сушки моркови более длительный. Однако немаловажное значение имеет поверхность массообмена.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, следует отметить следующее - применение ультразвуковых колебаний в процессе тепловой сушки позволяет интенсифицировать этот процесс и снизить температуру сушащего агента. Последнее особенно важно для производств, где нагрев высушиваемого продукта нежелателен и может привести к потере его свойств.

Необходимо использовать комбинированные сушилки (ультразвуковые - тепловые) с оптимальным соотношением доли тепловой и акустической энергии, поскольку применение чисто акустических сушилок приводит к их удорожанию.

Разработка ультразвуковых сушилок, рабочий объем которых является резонансным и согласованным с ультразвуковыми излучателями, позволяет без дополнительных энергозатрат повысить эффективность ультразвуковой сушки.

В заключении можно сформулировать следующие выводы:

- на основе анализа научно – технической и патентной литературы показана теоретическая возможность применения УЗ колебаний для интенсификации тепловой сушки;

- разработан и изготовлен макет акустической сушильной камеры цилиндрической формы с двумя излучателями дискового типа, мощностью 200 Вт каждый;

- экспериментальные исследования распределения звукового поля внутри камеры с помощью специально разработанного измерителя звукового давления позволили установить, что ультразвуковые излучатели формируют практически равномерное УЗ поле с интенсивностью 150 дБ;

- эффективность использования ультразвуковой сушки различная для разных высушиваемых материалов, что обусловлено структурой этих материалов и их индивидуальными особенностями;

- экспериментальные исследования работы акустической сушилки без использования дополнительных источников тепла при сушке различных материалов позволили подтвердить возможность применения УЗ колебаний для интенсификации процесса конвективной сушки, а так же подтвердить преимущества ультразвуковой сушки по скорости и энергозатратам в сравнении с тепловой сушкой;

- результаты лабораторных исследований эффективности применения ультразвука для интенсификации процесса сушки капиллярно-пористых материалов, являются хорошими предпосылками для создания серийно выпускаемых комбинированных (ультразвуковых - тепловых) сушилок для небольших производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
- [2] Khmelev, V.N. 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.
- [3] Ультразвуковой преобразователь для газовых сред [Текст]: пат. №2059239 Российская Федерация: МПК⁶ G01N29/24 / Хмелев В.Н., Кицанов А.С., Митин А.Г., Ларионенко Г.Г.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение «Алтай». – №93028405/28; заявл. 14.05.93; опубл. 27.04.96, Бюл. № 21. – 5 с.: ил.