

Акустическая сушка

Геннадий В. Леонов, Владимир Н. Хмелев, Андрей Н. Заборовский

Бийский технологический институт

Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия

Аннотация – В статье рассмотрены основные особенности процесса сушки в условиях воздействия акустическими полями высокой интенсивности. Предложен эффективный способ сушки капиллярно-пористых тел и устройство для его осуществления.

The summary - In clause the basic features of process of drying in conditions of influence by acoustic fields of high intensity are considered. The effective way of drying of capillary - porous bodies and device for its realization is offered.

Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из материала, с одной стороны, является одним из ключевых этапов различных химико-технологических процессов, с другой стороны, одной из самых затратных стадий обработки. Качество и скорость реализации процесса сушки в значительной степени определяют качество и себестоимость конечного продукта.

Традиционные способы сушки чрезвычайно энергоемки и крайне не эффективны. Сушилки основаны на повышении температуры материала. Конструктивно они громоздки, дороги, территориально удалены от производителя. Сушка, с их использованием, приводит к высокому проценту брака за счет перегрева или неравномерного высушивания продукта (приводит к потерям в процессе хранения, снижению всхожести семян, уменьшению биологической активности фармацевтических препаратов и потере качества древесины т.п.).

Создать малогабаритные, мобильные сушилки, основывающиеся на традиционных способах (тепловой, конвекционный, СВЧ, вакуумный) сушки, не представляется возможным из-за ряда принципиальных недостатков, присущих каждому из этих способов.

Сушка в ультразвуковом (акустическом) поле происходит без существенного прогрева материала. Именно поэтому это единственный способ, пригодный для сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов [1]. Обработка материала акустическими колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах высушиваемого материала (например, увеличивает всхожесть семян и др. [2]).

Акустический способ сушки отличается от обычных методов и по скорости протекания. Например, при сушке ферментов (разрушающихся при температуре в 40 °С) в акустическом поле скорость сушки в сравнении с вакуумным методом повышается в 3-4 раза [2].

Практическое использование установок в нашей стране и ряде зарубежных стран (США, Финляндия) позволяют подтвердить, что наиболее эффективным способом сушки без повышения температуры, изменения биологической активности веществ и с сохранением товарного вида продукта (лекарственных трав, ферментов, сычужных и других экстрактов, плодов и ягод) является акустическая (ультразвуковая) сушка.

Однако акустический способ сушки до настоящего времени не получил широкого распространения и имеющиеся отечественные и зарубежные сушилки, в основном, используются как лабораторные или полупромышленные.

Отсутствие высокоэффективных конструкций акустических сушилок в нашей стране и за рубежом требует проведения целенаправленных исследований оптимальных условий и режимов сушки, создания рациональных конструктивных схем сушильных

объемов, разработки эффективных источников ультразвуковой (УЗ) энергии, поиска путей повышения эффективности УЗ воздействия на капиллярно-пористые материалы.

Механизмы ультразвуковой сушки очень сложны. Но очевидно, действующими факторами являются [1]:

1. Уменьшение вязкости жидкости под действием УЗ способствующее ускоренному перемещению влаги по капиллярам из глубины тела на поверхность.
2. Выдавливание влаги из капилляров кавитационными пузырьками газа, возникающими и колеблющимися в жидкости, под действием УЗ колебаний.
3. Радиационное давление, направленное в капиллярах из жидкости в газ, перемещает столбик жидкости капилляра, перемещая его к поверхности.

Рассматривая движущие силы процесса можно сформулировать основные требования к реализации акустической сушки.

1. Необходимость превышения нижней границы интенсивности акустических колебаний (порядка 135- 145 Дб), поскольку только при этом акустическая сушка становится эффективной.
2. Необходимость увеличения интенсивности колебаний более 135- 145 Дб, поскольку при этом пропорционально увеличению интенсивности увеличивается эффективность сушки.
3. Возможность работы в широком диапазоне рабочих частот, поскольку отсутствует зависимость скорости сушки от частоты в диапазоне от 2 до 25 кГц.
4. Необходимость обеспечения акустического воздействия на ограниченные объемы материалов, т.к. сушка наиболее эффективна для тонких слоев (порядка 2-20 см).

В соответствии с перечисленными принципами можно сформулировать основные требования к аппаратному оформлению процесса: необходимо обеспечить максимально возможную интенсивность воздействия колебаний в сушильной зоне; необходимо либо организовать перемешивание высушиваемого материала, либо обеспечить одновременное воздействие с нескольких сторон. Форсирование мощности излучателя способствует интенсификации процесса, однако КПД газоструйных излучателей невысок и дополнительная мощность оборачивается значительными энергозатратами, снижая экономическую эффективность процесса.

На основе выработанных требований была предложена и разработана конструктивная схема, схематично представленная на рис.1 [3].

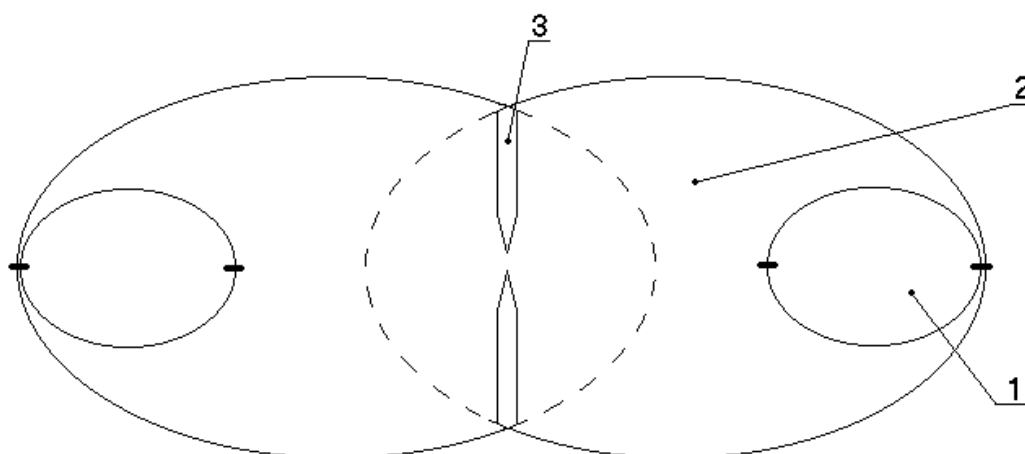


Рисунок 1 - Схема сушильной установки

Сущность предлагаемого технического решения, схематично представленного на рис.1, заключается в том, что технологический объем в форме тороида 1 с высушиваемым материалом помещают в больший по размерам объем 2, представляющий собой объемную фигуру, имеющую в сечении два одинаковых эллипса. Источник ультразвука 3

располагают в общем для двух эллипсов фокусе, материал для сушки размещают в области вторых фокусов.

Использование сушильной камеры подобной формы позволяет с одной стороны сконцентрировать акустическое воздействие за счет многократных отражений от внутренней поверхности объема 2 на высушиваемом материале, с другой стороны исключить необходимость перемешивания высушиваемого материала в силу того, что объект сушки находится в зоне облучения акустическими колебаниями со всех сторон.

В качестве источника колебаний используется газоструйный преобразователь Гартмановского типа, схематично показанный на рисунке 2.

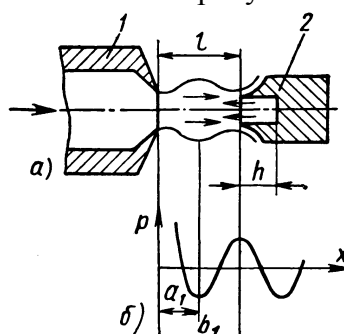


Рисунок 2 - Схема излучателя Гартмана

Принцип действия излучателя заключается в следующем. При продувании через сопло 1 (рис. 2) воздуха с избыточным давлением происходит его сверхзвуковое истечение, и давление в потоке становится периодически распределенным в пространстве. На рисунке координаты a_1 и b_1 соответствуют началу и концу первой области неустойчивости. Если в таком потоке напротив сопла расположить резонатор 2, то происходит генерация звука. Существуют две гипотезы объяснения механизма звукообразования: релаксационная гипотеза, согласно которой в основе генерации звука лежат колебания скачка уплотнений, и резонансная, по которой механизм генерации заключается в возникновении автоколебательного процесса при торможении струи. Существует большое число конструктивных разновидностей генераторов Гартмана. Анализ различных конструкций позволил сформулировать следующие достоинства генераторов Гартмана:

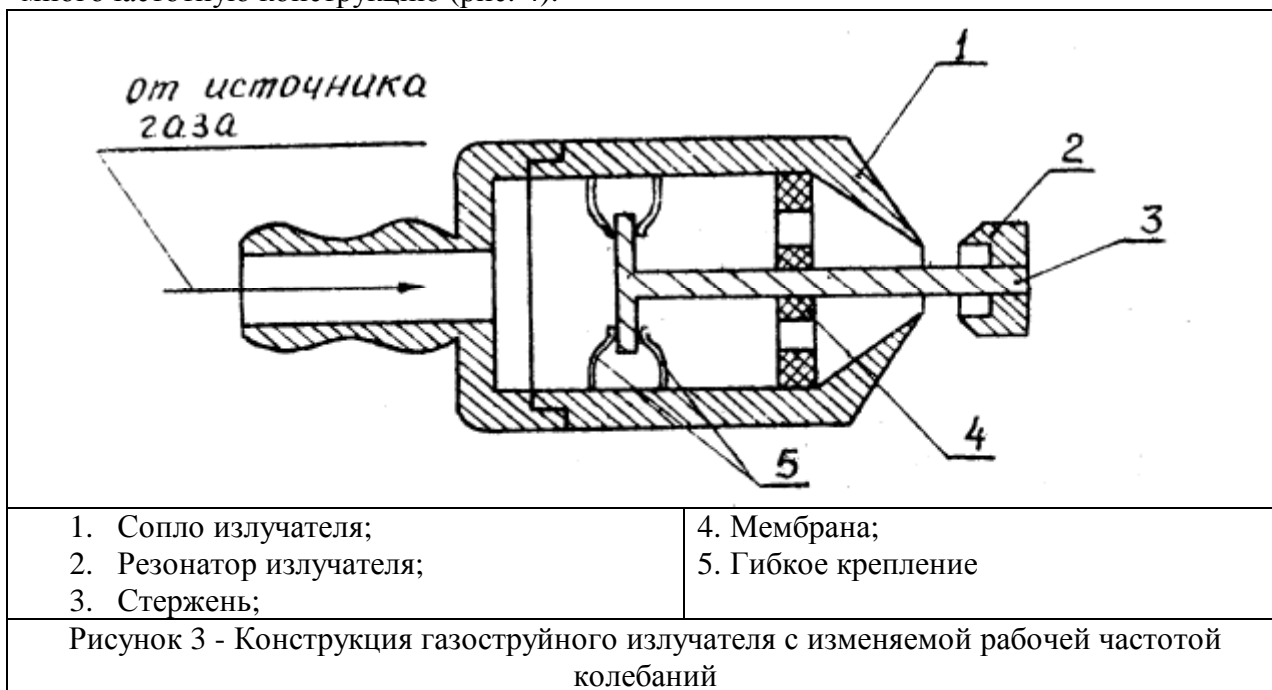
- простота конструкции;
- отсутствие механических вращающихся деталей;
- достаточно высокий КПД (более 25%);
- возможность создания широкополосных колебаний;

Последний пункт связан с тем, что сушильная камера – это резонансный объем, имеющий свою собственную частоту колебаний $f_{рез}$. Таким образом, для того чтобы обеспечить максимально эффективное воздействие необходимо, чтобы акустическая система генерировала колебания с той же частотой $f_{рез}$. Однако различный объем загрузки высушиваемого материала, возможное изменение его положения приводит к тому, что собственная частота колебаний будет изменяться в пределах диапазона $f_{рез} + \Delta F$. Из чего следует, что для гарантированного «попадания» в резонансный диапазон в любой момент времени, необходимо создавать колебания с достаточно широким спектром частот.

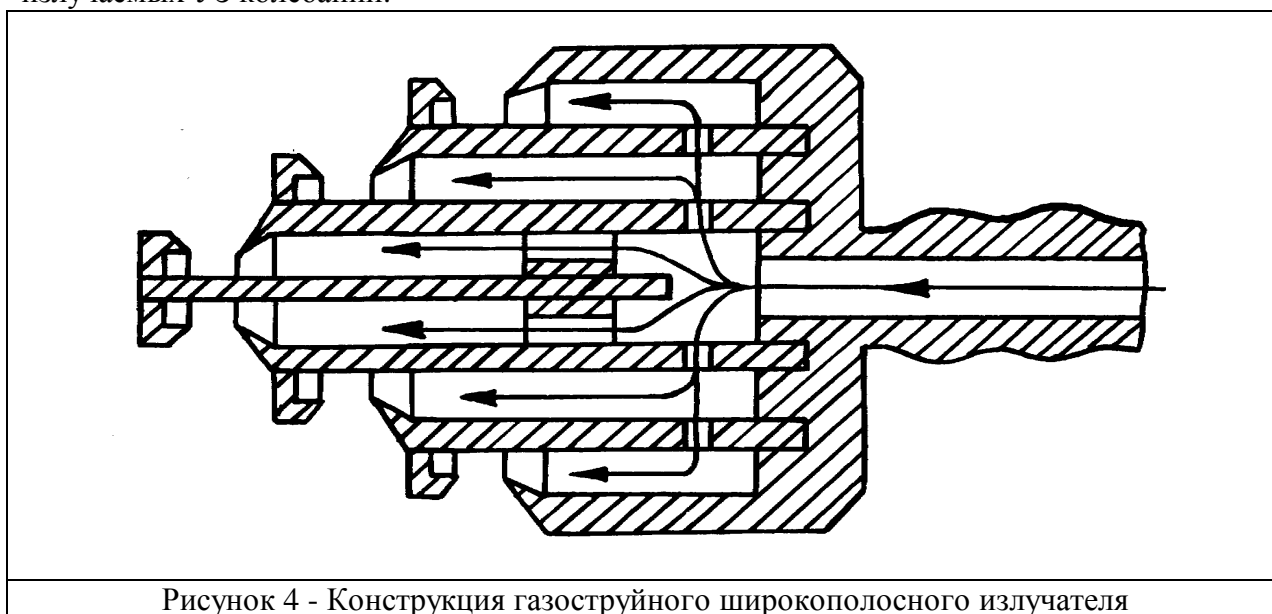
Реализация такого режима сушки возможна с использованием двух типов статических газоструйных излучателей [2]:

- газоструйный излучатель с изменяемой частотной характеристикой за счет изменения расстояния от сопла до резонатора (рис. 3);
- газоструйный широкополосный излучатель, представляющий собой

многочастотную конструкцию (рис. 4).



В первом случае основным конструктивным отличием (рис. 3) является то, что стержень (3) с резонатором (2) зафиксирован не жестко, а с использованием гибких конструкций (5), что приводит к постоянному изменению расстояния от стакана излучателя (1) до резонатора (2) и, соответственно, к постоянному изменению частоты излучаемых УЗ колебаний.



Во втором случае, для создания колебаний используется конструкция с несколькими соплами и резонаторами, рассчитанными на работу с собственной частотой в некотором диапазоне (рис. 4). В итоге, при одновременной работе нескольких сопел с индивидуальными резонансными частотами, излучения от них накладываются друг на друга, и получается широкополосные колебания.

Практическая реализация предложенной конструктивной схемы сможет снять многие вопросы и решить проблему насыщения рынка малогабаритными мобильными акустическими сушилками.

Исследование существующих способов повышения эффективности акустической сушилки позволило предложить в дополнение к акустическому воздействию использовать метод «вакуумного удара» [4].

Поэтому, было предложено в анализируемой сушилке, акустическое воздействие чередовать с вакуумными импульсами, заключающимися в резком снижении давления в объеме с высушиваемым материалом.

Проведенные исследования позволили установить, что резкое снижение давления вокруг материала приводит к возникновению дополнительной движущей силы сушки - нерелаксируемому градиенту общего давления. В результате падения давления происходит бурное парообразование по всему объему высушиваемого материала, и формирующийся молярный поток выносит из материала вместе с паром и часть влаги в жидкой фазе. Таким образом, механизм сушки оказывается аналогичным механическому обезвоживанию посредством прессования или центрифугирования. Использование вакуумных ударов обеспечивает как интенсификацию процесса, так и значительную экономию энергии. Действительно, так как значительная часть жидкости удаляется из материала в жидкой фазе без испарения, то не тратится энергия на фазовое превращение.

Технически резкий перепад давления организуется следующим образом. С использованием вакуумного насоса понижается до заданного значения давление в большем объеме 2. Затем объем 1 разгерметизируют и давления в объемах 1 и 2 выравнивается в течение короткого интервала времени и в связи с тем, что объем 2 значительно превышает объем 1, высушиваемый материал подвергается резкому перепаду давления.

Связь между первоначальными давлениями в объемах и в суммарном объеме может быть найдено из уравнений Менделеева - Клапейрона, записанных для объемов и определяется следующей зависимостью:

$$P_{12} = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{V_1 + V_2}; \quad \text{где:}$$

P_{12} - суммарное для объемов 1 и 2 остаточное давление;

P_1 - давление в объеме 1;

P_2 - давление в объеме 2;

V_1 - объем 1;

V_2 - объем 2.

Таким образом, достижение требуемого остаточного давления может обеспечиваться либо регулировкой глубины вакуумирования в объеме 1 (P_1), либо

варьированием отношения объемов камер 1 и 2, так как $P_{12} \sim \frac{V_2}{V_1}$.

Основные параметрические показатели сброса давления (начальное давление, остаточное давление, продолжительность сброса) могут широко варьироваться в зависимости от физико-химических свойств объекта сушки.

Регулируя процесс парообразования удается добиться и структурного видоизменения высушиваемого капиллярно-пористого тела, и частичного или полного разрушения. В случае необходимости или допустимости структурных видоизменений, параметры сушки необходимо выбирать именно так. Структурные изменения сводятся к укрупнению и приданию правильной геометрической формы порам и капиллярам, присутствующим в объекте.

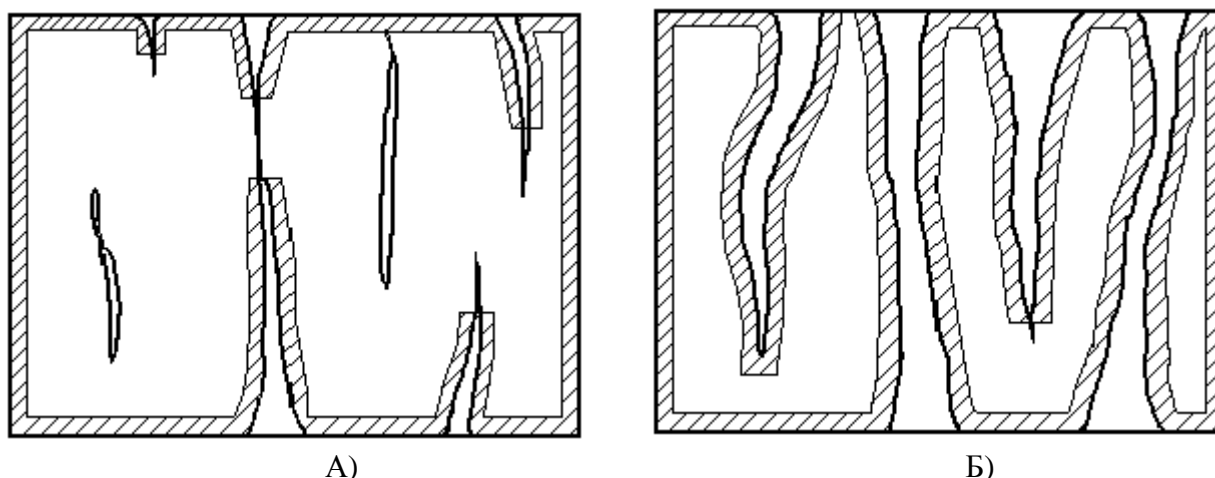


Рисунок 5 - Структура капиллярно-пористого тела до (А) и после (Б) сброса давления

На рис. 5 схематично показана структура капиллярно-пористого материала до сброса давления (А) и после (Б). Заштрихованная область – зона проникновения ультразвуковых колебаний в материал. Указанные изменения благоприятно сказываются на товарных характеристиках высушиваемого материала. Применительно к пищевым продуктам - приводят к улучшению вкусовых качеств (например, хруст для чипсов и др.), применительно к строительным материалам - уменьшают коэффициент теплопроводности.

Структурные изменения материалов значительно интенсифицирует процесс сушки на этапе акустического воздействия. Интенсификация происходит за счет увеличения площади поверхности воздействия ультразвуковых волн.

Предложенная сушилка капиллярно - пористых материалов позволит обеспечить повышение производительности, сокращение длительности процесса сушки, снижение энергоемкости, повышение экономичности и улучшение потребительских качеств высушиваемого объекта.

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить высокую эффективность разработанных технических решений и приступить к проектированию практической конструкции акустической сушилки.

Список использованных источников:

1. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. М., «Наука», 1970
2. Хмелев В.Н., Попова О.В. "Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве". Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 1997
3. Хмелев В.Н., Заборовский А.Н. «Способ сушки капиллярно-пористых материалов». Патент РФ № 2224649
4. Хмелев В.Н., Заборовский А.Н. Акустическая сушка. <http://u-sonic.ru/drying/drying.shtml>.