

СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БЕСКОНТАКТНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

*В.Н. Хмельёв, И.И. Савин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.Н. Лебедев, С.В. Левин, М.В. Хмельёв
Бийский технологический институт АлтГТУ*

Статья посвящена системе ультразвуковой сушки белья в стиральных машинах барабанного типа с использованием высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний, создаваемых пьезоэлектрическим излучателем и вводимых в белье бесконтактно. Приводится описание макетного образца сушильной системы и результаты экспериментов.

Сушка капиллярно-пористых материалов является одним из практических применений ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Лабораторией акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института было проведено исследование процесса сушки белья в стиральных машинах барабанного типа с использованием акустических колебаний высокой интенсивности.

Известно, что подготовка одежды является одной из важнейших и в тоже время одной из самых трудоемких повседневных бытовых операций. В связи с чем широкое распространение получили стиральные машины барабанного типа, выполняющие операции стирки, полоскания и финального отжима белья в автоматическом режиме. Стиральные машины более высокого класса также осуществляют сушку белья. На рис. 1 представлена схема стиральной машины, оборудованной системой конвективной сушки белья.

Сухой воздух с помощью нагревателя 8 доводится до температуры 95–120 градусов, вентилятором 7 по системе воздуховодов направляется внутрь барабана для белья 2. Пройдя сквозь белье воздух увлажняется и поступает в конденсатор 9, куда по шлангу 10 подается холодная вода. Соприкасаясь с развитой поверхностью конденсатора воздух охлаждается и осушается после чего вновь поступает к вентилятору 7. Процесс продолжается до удаления необходимого количества влаги из белья. Несмотря на то, что способ конвективной сушки широко распространен, ему присущ ряд недостатков, которые объясняются не низким техническим уровнем стиральных машин а принципиальными особенностями. Во-первых, конвективная сушка – чрезвычайно энергоемкий процесс – сушка одного килограмма хлопчатобумажного белья требует в среднем 0,8 – 1,2 кВт*ч. Во-вторых, высокая температура сушащего воздуха приводит к пересыханию белья и его порче. В-третьих, сушка изделий из синтетических и «деликатных» тканей практически невозможна, опять-таки по причине высокой температуры.

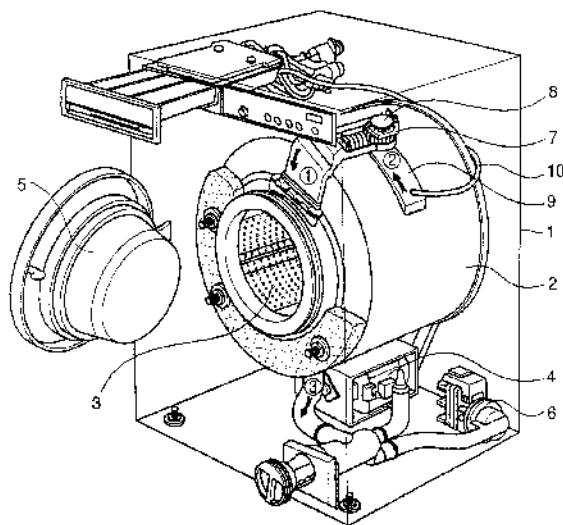


Рисунок 1 – Схема стиральной машины, оборудованной системой конвективной сушки белья (пояснения в тексте)

В тоже время известно, что воздействие на высушиваемый материал ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности (от 130 до 170 дБ) способно интенсифицировать процесс сушки. При высокой влажности материала (свыше 100%) и интенсивности колебаний свыше 162 дБ процесс удаления влаги может протекать вообще без нагрева воздуха только за счет распыления воды в ультразвуковом поле.

В тоже время обеспечить такой режим акустической сушки в стиральных машинах невозможно, во-первых по причине чрезвычайной опасности даже кратковременного воздействия на человека столь мощных ультразвуковых полей, а во-вторых, по причине того, эффект распыления влаги исчезает при снижении влажности ниже 70–80%, тогда как влажность белья после отжима уже лежит в пределах 30–50%.

Поэтому было решено использовать свойства мощных ультразвуковых полей турбулизовать диффузионный слой на границе раздела жидкой и газообразной фаз, повышая тем самым градиент влажности и, соответственно, скорость протекания процесса сушки. В этом случае ультразвуковые колебания интенсивностью 140–150 дБ лишь ускоряют процесс конвективной сушки.

Для исследования процесса акустической сушки белья в стиральных машинах барабанного типа был создан макетный образец на базе стирально-сушильной машины LG WD14124RD, пьезоэлектрического излучателя и электронного генератора. Внешний вид макетного образца представлен на рис. 2.

Способ ввода акустических колебаний в высушиваемый материал через воздушную среду определяет особенности конструкции пьезоэлектрического излучателя. Известно, что существенное различие акустических сопротивлений металлов и воздуха не позволяют создавать с помощью твердотельных излучателей в воздушной среде плоские или сферические волны с уровнем звукового давления свыше 115–125 дБ. Поэтому, при использовании пьезоэлектрических излучателей для создания в воздушной среде акустических волн с уровнем звукового давления 130–140 дБ используют фокусировку (концентрирование) менее интенсивных колебаний на локализованном участке. Для фокусировки акустических колебаний в воздушной среде используются зеркальные, линзовые или фазированные системы. Последние представляют наибольший интерес, поскольку имеют наиболее простую конструкцию и небольшие габариты.

Принцип действия фазированного излучателя поясняется на рисунке 3, а внешний вид излучателя на рис. 4.



Рисунок 2 – Внешний вид макетного образца

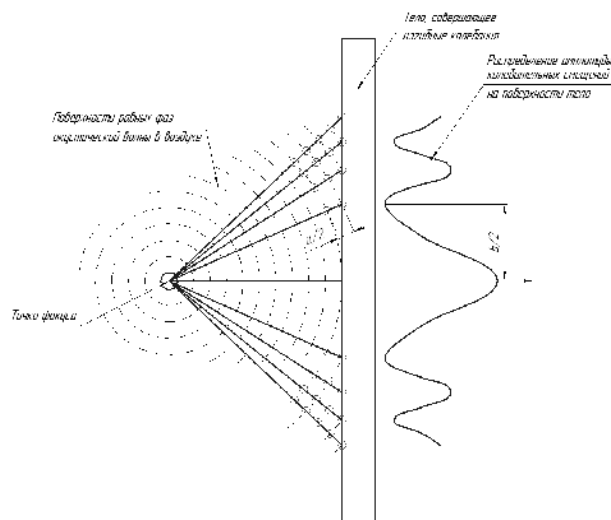


Рисунок 3 – Принцип действия фазированного фокусирующего излучателя

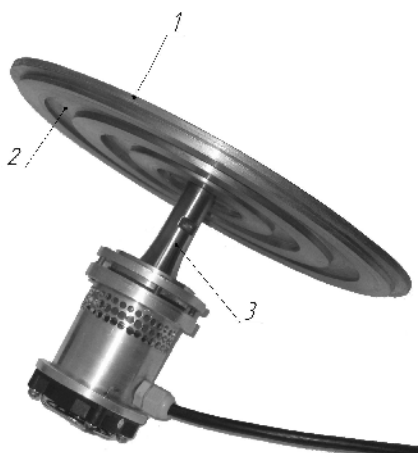


Рисунок 4 – Внешний вид пьезоэлектрического излучателя

Пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система 3 возбуждает изгибные колебания металлического диска 1. В диске устанавливается режим стоячих изгибных волн, длина которых убывает по мере удаления от центра таким образом, что минимумы колебаний

расположены на расстояниях от центра диска, равных, $Y = \sqrt{naL + \frac{n^2 a^2}{4}}$, где a – длина звуковой волны в воздухе, L – фокусное расстояние, $n=0,2,4...$ для «положительных» максимумов и $n=1,3,5...$ – для «отрицательных».

Последнее достигнуто за счет специальной формы рельефа на тыльной поверхности 2 диска 1. Расстояние между смежными «положительными» и «отрицательными» максимумами колебаний выбраны таким образом, что сферические волны, излучаемые поверхностью диска интерферируя между собой концентрируются в фокусе, где уровень звукового давления достигает значений 170 дБ и выше. В зонах, прилегающих к фокусу интенсивность ультразвуковых колебаний составляет 140-150 дБ. Реверберация, возникающая внутри барабана и его вращение способствуют равномерному воздействию акустических колебаний на весь объем белья.

Проведенные эксперименты позволили установить влияние ультразвуковых колебаний на скорость и динамику процесса сушки. В таблице 1 представлены усредненные данные скорости сушки при различных вариантах энергетического воздействия. Хорошо видно, что применение ультразвуковых колебаний способствует удалению влаги из белья как при сушке горячим воздухом, так и холодным.

Таблица 1 – Усредненные значения скорости сушки

Способ сушки	Скорость, г/мин
холодный воздух без УЗ	1
холодный воздух с УЗ	4
горячий воздух без УЗ	9,5
горячий воздух с УЗ	12

На рис. 5 представлен график динамики процесса сушки горячим воздухом с воздействием ультразвуковыми колебаниями и без такового. Как видно, на начальном этапе сушки ультразвуковые колебания способствуют увеличению скорости сушки на 20–30%. Затем по мере прогрева и высыхания белья скорость сушки падает. При этом максимум скорости сушки с воздействием ультразвуковых колебаний достигается раньше чем в случае, когда воздействия колебаний нет.

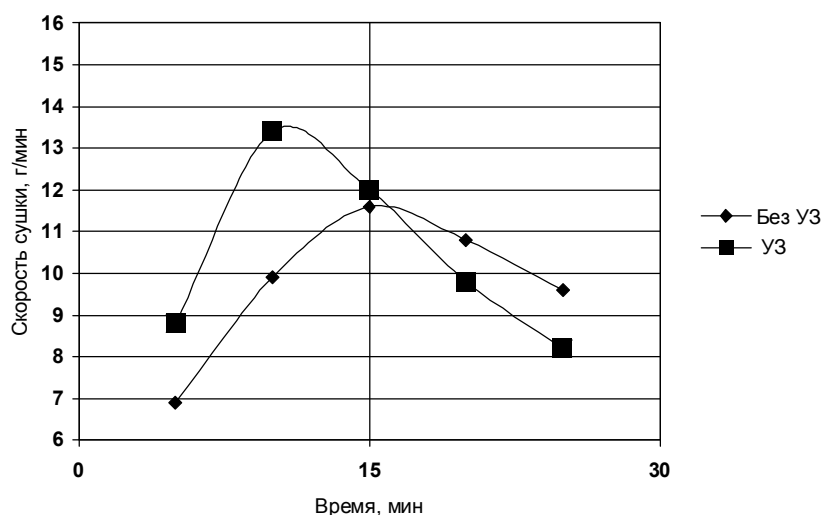


Рисунок 5 – Динамика скорости сушки

На рис. 6 представлен график динамики влагосодержания белья в процессе сушки разными способами.

Мощность нагревателя системы конвективной сушки стиральной машины составляет 2 кВт, что обеспечивает среднюю скорость сушки белья 9,5 г/мин. Долговременная мощность, потребляемая пьезоэлектрическим излучателем составляет 210 Вт, акустическая мощность порядка 80–100 Вт, что увеличивает скорость сушки на 2,5 г/мин. При кратковременном увеличении потребляемой мощности излучателя до 310 Вт (акустической до 130–150 Вт) скорость сушки возрастает на 4 г/мин, по сравнению с чисто конвективной сушкой. Соответственно, затраты энергии в первом случае составляют 12,6 кДж/г, во втором случае – 11 кДж/г, в третьем 9,9 кДж/г. Соответственно, с увеличением мощности акустического излучения и одновременном снижении мощности нагревателя следует ожидать еще большего снижения энергозатрат.

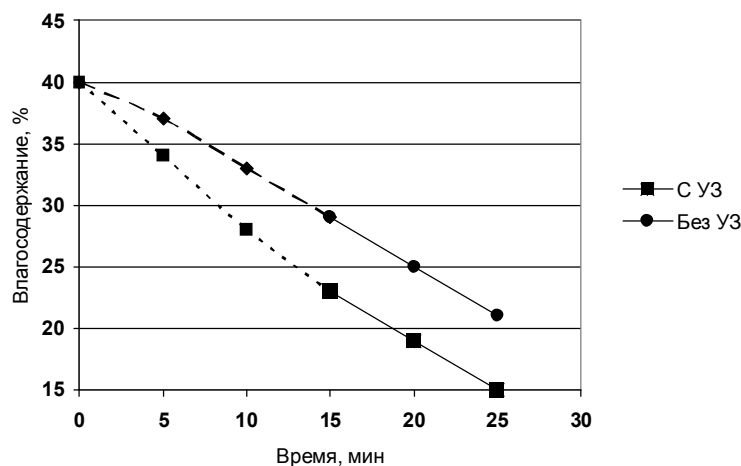


Рисунок 6 – Динамика влагосодержания белья при сушке разными способами

Основные результаты работы заключены в следующем:

1. Создан действующий макетный образец системы ультразвуковой сушки белья для стиральной машины барабанного типа.
2. Практически показана возможность интенсификации процесса конвективной сушки белья в стиральных машинах барабанного типа с использованием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, создаваемых пьезоэлектрическим преобразователем и вводимых в белье бесконтактно.
3. Показано, что увеличение мощности акустического излучения способствует снижению удельных энергетических затрат на сушку, по сравнению с конвективным способом.
4. Определены дальнейшие пути развития:
 - Кардинальное изменение конструкции стиральной машины, в частности размещения одного или нескольких излучателей внутри барабана.
 - Повышение акустической мощности за счет применения материалов с меньшим коэффициентом внутреннего трения, например титана или высокопрочных алюминиевых сплавов.