

Исследование процесса акустической сушки белья в макетном образце стиральной машины барабанного типа

В. Н. Хмелев, к.т.н., *IEEE Senior Member*, И. И. Савин, Д. С. Абраменко, С. Н. Цыганок, к.т.н., Р. В. Барсуков, к.т.н., А. Н. Лебедев.

Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Аннотация — В статье представлены результаты исследований, направленных на увеличение эффективности и производительности конвективного способа сушки белья в стиральных машинах барабанного типа, а так же снижение энергопотребления за счет введения в конструктивную схему стиральной машины излучателя ультразвука высокой интенсивности.

1. ВВЕДЕНИЕ

СУШКА - заключительная стадия любой стирки белья, заключающаяся в удалении влаги из тканей, является самой продолжительной и затратной стадией обработки белья.

В настоящее время в стиральных машинах барабанного типа наибольшее распространение получили конвективные способы сушки белья [1,2], реализующиеся следующим образом: сухой воздух нагревается встроенным нагревателем и с помощью вентилятора направляется по воздушному каналу в барабан для белья. Проходя через белье, воздух увлажняется, забирая влагу из белья, после чего поступает в конденсатор, где охлаждается, в результате чего влага конденсируется. Сухой воздух вновь нагревается и направляется в барабан для белья. Процесс повторяется до удаления необходимого количества влаги из белья.

Конвективный способ сушки обладает существенными недостатками:

- процесс сушки чрезвычайно энергоемок и длителен;
 - в случае малогабаритных (узких) стиральных машин, уменьшается воздушный объем в барабане, что ограничивает скорость процесса сушки, и увеличивает энергозатраты;
 - для обеспечения приемлемого качества сушки приходится либо уменьшать загрузку, либо сушить постиранное белье в два приема;
 - длительное высокотемпературное неравномерное энергетическое воздействие, разрушает синтетические материалы и приводит к пересыханию и порче белья.
- Представленные недостатки обусловлены не низким

уровнем проработанности конструктивных решений реализующих конвективный способ сушки, а принципиальными недостатками положенного его основу.

В связи с этим перспективным является осуществление сушки белья с использованием акустических колебаний высокой интенсивности.

Известно [3], что влагосодержание высушиваемого материала от времени процесса сушки при постоянном энергетическом воздействии характеризуется сложной нелинейной зависимостью, на которой можно выделить два периода сушки. Во время первого периода скорость сушки постоянна. По мере снижения влагосодержания высушиваемого материала, наступает момент, когда скорость сушки асимптотически стремится к нулю.

Акустическое воздействие высокой интенсивности позволяет интенсифицировать оба периода процесса сушки [4]. В течение первого периода сушки акустические колебания позволяют уменьшить толщину гидродинамического пограничного слоя. В акустическом поле гидродинамический пограничный слой может быть существенно меньше диффузионного. Это значит, что звуковые колебания проникают внутрь диффузионного слоя, турбулизируют его, тем самым ускоряют процесс испарения.

Акустический метод сушки обладает еще одним важным преимуществом – колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и пониженного давления, что интенсифицирует процессы переноса влаги из глубинных слоев к поверхности во втором периоде сушки.

Другими действующими факторами акустического воздействия являются:

- уменьшение вязкости жидкости под действием акустических колебаний, что способствует ускоренному переносу влаги из глубинных слоев к поверхности,
- выдавливание влаги из материала кавитационными пузырьками, возникающими в жидкости под действием акустических колебаний высокой интенсивности (эффект

наблюдается только при высоком влагосодержании – 80% и выше),

- радиационное давление, выдавливающее жидкость из материала.

Меньшие энергетические затраты акустической сушки, по сравнению с конвективной объясняются тем, что жидкость с поверхности удаляется не только за счет испарения (что требует значительных энергетических затрат на осуществление фазового перехода), но и в виде аэрозоля (без фазового перехода) – который возникает за счет действия быстроменяющихся перепадов давления и кавитационных процессов.

Для установления возможности практического применения акустической сушки белья лабораторией акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института совместно с фирмой LG Electronics были проведены исследования возможностей комбинированного способа сушки, реализуемого в макетном образце при одновременном тепловом и акустическом воздействии.

II. ВЫБОР АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

В ходе исследования в качестве источника акустических колебаний высокой интенсивности применялось три различных типа излучателей - два типа стержневых газоструйных излучателей (разновидность генераторов Гартмана) и один тип пьезоэлектрических излучателей.

Выбор стержневых газоструйных излучателей обусловлен тем, что среди других аэродинамических излучателей, они обладают наибольшим к.п.д. (до 25%-30%), обеспечивают устойчивый режим генерации, не требуют высоких давлений сжатого воздуха [5].



Рисунок 1. Внешний вид газоструйного излучателя рефлексорной схемы, смонтированного во фронтальную дверцу стиральной машины.

Для практических исследований были разработаны и изготовлены два варианта стержневых излучателей: излучатель осевой рефлексорной схемы (рисунок 1) и излучатель радиальной рупорной схемы (рисунок 2).

Сравнительные испытания рупорного и рефлексорного варианта излучателей показали, что более эффективным является рефлексорный вариант, так как он обеспечивает требуемый уровень звукового давления при меньшем значении расхода сжатого воздуха.

Уровень звукового давления, создаваемого излучателем на расстоянии 0,3-0,4 м составляет 135-140 дБ. На расстоянии порядка 0,17-0,22 м имеются локальные участки, где уровень звукового давления достигает 145-150 дБ. Кроме того, в отдельных зонах наблюдается кавитационное распыление воды, следовательно, уровень звукового давления в этих зонах достигает 162 дБ. Рабочее давление сжатого воздуха для этого излучателя составило 0,2 – 0,3 МПа, при расходе сжатого воздуха около 0,19 м³/мин.



Рисунок 2. Внешний вид газоструйного излучателя рупорной схемы.

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.

Пьезоэлектрический излучатель [6] состоит из излучающего диска, совершающего изгибные колебания высших порядков, и пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы осевого типа, возбуждающей колебания диска [7,8]. Питание пьезоэлектрического преобразователя электрическими колебаниями УЗ

частоты осуществляется от специализированного электронного генератора.

В зоне фокуса излучатель обеспечивает интенсивность акустического воздействия 160 дБ - 170 дБ, в околофокальной зоне – 145 дБ – 160 дБ, в других точках внутреннего объема барабана стиральной машины – не менее 135 дБ.



Рисунок 3. Пьезоэлектрический излучатель

III. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ

Основной параметр, характеризующий процесс сушки – влажность белья, которая определяется как

$$w = \frac{M - M_0}{M_0} \cdot 100\%, \text{ где } M_0 - \text{масса сухого белья, } M$$

– масса влажного белья.

Абсолютное значение скорости сушки белья определяется как $v = (M_1 - M_2) / t$, где M_1 – начальная масса белья (при закладке на сушку), M_2 – конечная масса белья (после сушки), t – время сушки.

IV. СОЗДАНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для практического исследования процесса сушки было создано два макетных образца. Первый макетный предназначался для выбора принципа организации процесса сушки, типа используемого излучателя, испытания системы звукоизоляции, измерения параметров акустического поля. Конструктивно, первый макетный образец был изготовлен на базе стиральной машины «Вятка-Автомат 16», которая является типичным представителем стиральных машин барабанного типа (без сушильного аппарата). В конструкции макетного образца сохранены только барабанный узел, корпус и фронтальная дверца, все другие узлы были удалены. В ходе экспериментов с первым макетным образцом, показана возможность увеличения скорости протекания процесса сушки под воздействием акустических колебаний высокой интенсивности. Так, при равных условиях циркуляции

воздуха в объеме барабана скорость сушки под воздействием ультразвуковых колебаний возрастает на 43% при сушке тонкой ткани. При сушке полотенца скорость последней возростала под действием ультразвуковых колебаний создаваемых газоструйным излучателем в среднем на 33% и под действием ультразвуковых колебаний, создаваемых пьезоэлектрическим излучателем – в среднем на 43% (что на 15% больше чем для газоструйного излучателя).

Также установлено следующее:

1. Эффективность системы электронного генератора – пьезоэлектрический излучатель примерно в 10 раз выше эффективности систем компрессор-газоструйный излучатель. Кроме того, при работе газоструйного излучателя вне корпуса стиральной машины присутствует низкочастотный акустический шум, создаваемый струей сжатого воздуха. Компрессор, используемый для питания газоструйного излучателя также является источником шума. Поэтому для дальнейших исследований был использован только пьезоэлектрический излучатель.

2. Для снижения уровня акустического излучения за пределами корпуса стиральной машины до безопасного уровня (70 дБ) требуется применение звукоизоляции. Как показали исследования – достаточно одного слоя самоклеющегося ячеистого звукоизолирующего материала толщиной 8 мм, наносимого на внутреннюю поверхность корпуса и внешнюю поверхность внешнего барабана.

Второй макетный образец для исследования процесса сушки создан на базе стирально-сушильной машины LG WD14124RD, с учетом результатов, полученных в процессе исследований на первом макетном образце.

Поскольку при создании макетного образца требовалось выполнить условия полного сохранения существующей функциональности базовой стиральной машины, что определило единственно возможное место размещение пьезоэлектрического излучателя – во фронтальной дверце.

Стекланный люк фронтальной дверцы был заменен на деталь, выполненную из высокопрочного термостойкого пластика. Внешняя поверхность пластиковой детали по возможности полно копирует форму стекла, форма внутренней поверхности выполнена с учетом возможности размещения там пьезоэлектрического излучателя. Пластиковая деталь люка закрепляется в штатный ободок дверцы стиральной машины. Внешний вид второго макетного образца представлен на рисунке 4.

Необходимое подавление звука может быть обеспечено нанесением одного слоя шумоизолирующего материала на наружную поверхность внешнего барабана и внутреннюю поверхность корпуса.

Подготовка, нагрев и циркуляция воздуха в процессе

сушки белья обеспечивается существующей в машине системой конвективной сушки.

V. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения эффективности воздействия акустических колебаний на процесс сушки была проведена серия экспериментов, в ходе которых с использованием созданного макетного образца осуществлялась сушка белья, как только за счет конвективно – теплового воздействия, так и с применением акустических колебаний.



Рисунок 4. Внешний вид второго макетного образца

Для устранения влияния типа материала, возможных потерь при стирке были использованы образцы ткани одного типа (хлопчатобумажной). Это позволило также исключить перераспределение влаги между образцами из различных материалов.

Перед началом эксперимента осуществлялось полоскание и отжим семи образцов ткани в стиральной машине. После отжима осуществлялось взвешивание образцов и закладки их на сушку. Эксперимент осуществлялся в несколько этапов длительностью по 5 минут. После каждого этапа образцы извлекались из барабана стиральной машины и взвешивались, после чего вновь закладывались в барабан. Первый этап начинался на «холодной» машине, температура внутри которой не превышала температуру окружающей среды более чем на 3 градуса.

Эксперименты по сушке проводились как в базовом режиме работы нагревателя воздуха (2 кВт, температура сушащего воздуха до 120 градусов), так и при сниженной мощности (не более 1 кВт и температуре воздуха 62 – 65 градусов). Кроме того, применялись

различные пьезоэлектрические излучатели.

VI. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании полученных экспериментальных данных были построены графические зависимости динамики скорости сушки и динамики изменения влагосодержания при различных условиях энергетического воздействия.

Для обеспечения сопоставимости результатов различных экспериментов, все графики, иллюстрирующие динамику влагосодержания, были нормированы к одинаковым начальным условиям влажности белья после отжима, равной 40%.

На рисунках 5-7 представлены графические зависимости, полученные в результате обработки результатов экспериментов, где нагреватель воздуха стиральной машины работает на полную мощность (2000 Вт) при реализации различных вариантов дополнительного ультразвукового воздействия. На графиках приняты следующие обозначения: «Без УЗ» - ультразвуковое воздействие отсутствует. «УЗ вар. А» – ультразвуковое воздействие излучателем №1 (стальной концентратор) при выходной мощности генератора 310Вт. «УЗ вар. Б» - ультразвуковое воздействие излучателем №1 (стальной концентратор) при выходной мощности генератора 500Вт. «УЗ вар. В» ультразвуковое воздействие излучателем с титановым концентратором при выходной мощности генератора 250-280Вт.

На рисунке 5 представлены зависимости скорости сушки при различных вариантах энергетического воздействия от времени. На графике 6 представлены зависимости динамики влагосодержания от времени сушки в первые 15 минут. На рисунке 7 представлены графики динамики влагосодержания при длительной сушке (25 минут). В связи с тем, что первый этап указанных экспериментов длился 15 минут, промежуточные значения влагосодержания (5 и 10 минут) расчетные (на графике – соединятся штриховой линией).

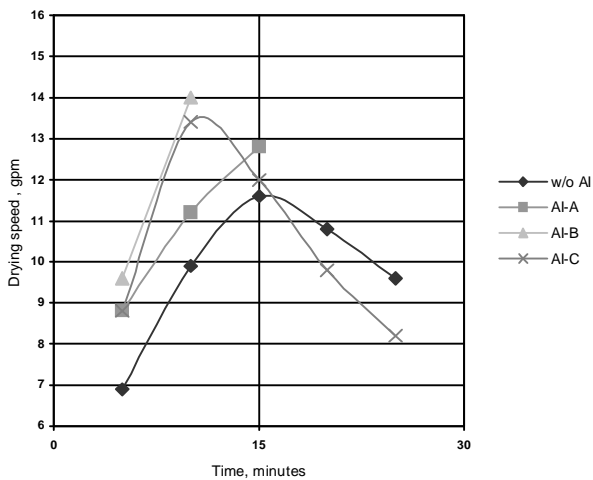


Рисунок 5. Динамика скорости сушки.

На рисунке 8 представлена динамика скорости сушки, наблюдаемая в экспериментах, где мощность теплового воздействия постепенно снижалась, а температура сушащего воздуха поддерживалась в пределах 63-65 градусов.

На рисунке 9 представлена динамика влагосодержания.

На рисунке 10. представлено сравнение усредненных данных по скорости сушки при различных вариантах энергетического воздействия.

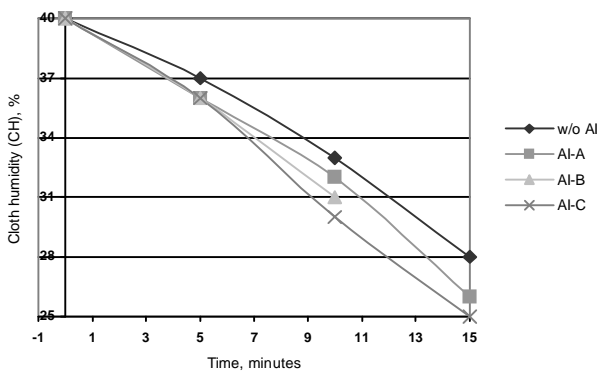


Рисунок 6. Динамика влагосодержания

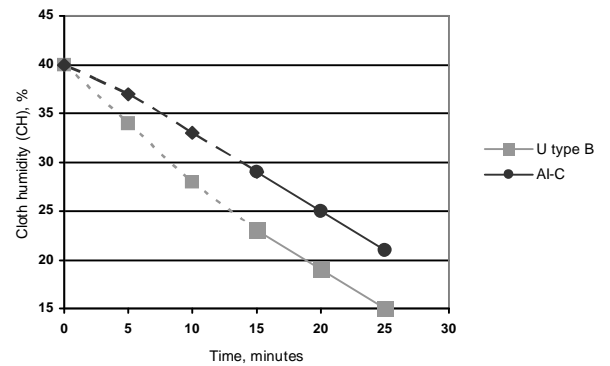


Рисунок 7. Динамика сушки при длительном воздействии (25 минут)

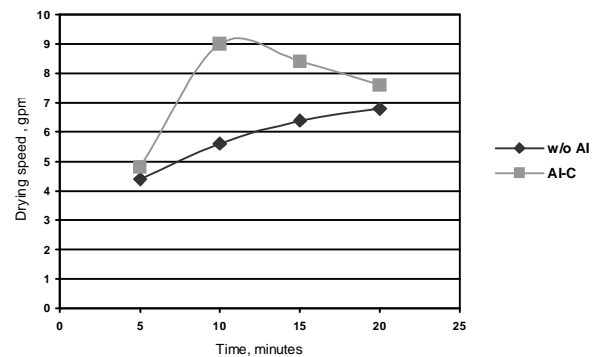


Рисунок 8. Динамика скорости сушки при снижении мощности теплового воздействия с целью поддержания температуры сушащего воздуха в пределах 63-65 градусов

Принимая во внимание, что мощность, потребляемая нагревателем воздуха стиральной машины LG WD14124RD в штатном режиме составляет 2 кВт, мощность потребляемая пьезоэлектрическим излучателем в штатном режиме составляет 260 Вт, а в режиме повышенной мощности 500 Вт, была рассчитана энергоёмкость сушки при различных энергетических воздействиях.

Результаты представлены в таблице 1.

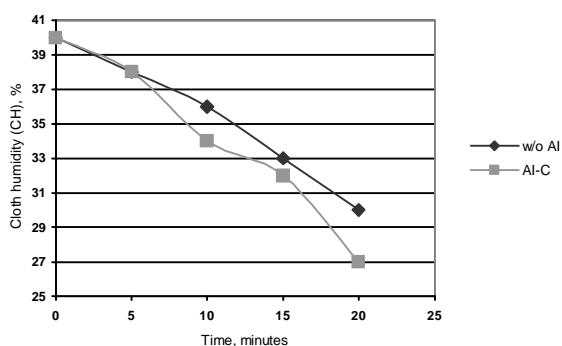
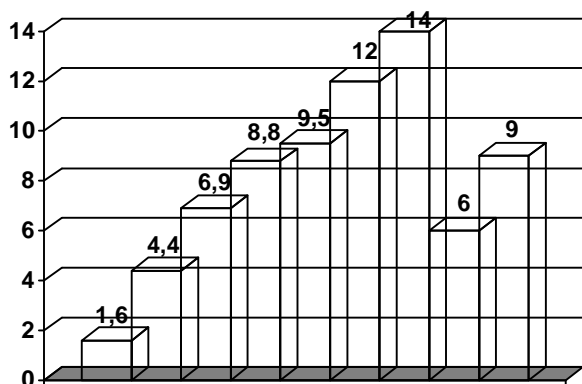


Рисунок 9. Динамика скорости сушки при снижении мощности теплового воздействия с целью поддержания температуры сушащего воздуха в пределах 63-65 градусов



Графики слева направо: без УЗ воздействия и нагрева воздуха, с УЗ воздействием без нагрева воздуха, без УЗ воздействия во время прогрева машины, с УЗ воздействием во время прогрева машины, без УЗ воздействия на прогретой машине, с УЗ воздействием на прогретой машине, при повышенной мощности УЗ воздействия на прогретой машине, без УЗ воздействия при температуре воздуха 60 градусов, с УЗ воздействием при температуре воздуха 60 градусов.

Рисунок 10. Сравнение усредненной скорости сушки при различных вариантах энергетического воздействия

ТАБЛИЦА 1 Сравнение энергоёмкости сушки при различных энергетических воздействиях

Режим воздействия	Суммарная мощность, кВт	Скорость сушки, г/мин	Энергоёмкость сушки, кДж/г
Конвективно-тепловой	2	9,5	12,6
Конвективно-тепловой+ УЗ номинальная мощность	2 + 0,21	12	11
Конвективно-тепловой + УЗ повышенная мощность	2+0,5	14	10,6
Конвективно-тепловой на пониженной мощности + УЗ номинальная мощность	1 + 0,21	9	8
Конвективно-тепловой на пониженной мощности без УЗ	1	6	10
Циркуляция холодного воздуха + УЗ	0,33	4,4	4,5

На рисунке 11 представлены графики динамики

изменения влагосодержания белья, измеренной в соответствии с методикой ANSY/АНАМ HLD-1-1992 [9].

VII. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Результаты анализа полученных экспериментальных данных заключаются в следующем:

1. скорость сушки с применением ультразвуковых колебаний всегда выше скорости сушки без ультразвукового воздействия;
2. эффективность сушки возрастает нелинейно с увеличением мощности ультразвукового излучения;
3. максимальная скорость ультразвуковой сушки обеспечивается в начальный период сушки белья, имеющего максимальное влагосодержание;
4. максимальная скорость сушки составила 14 г/мин

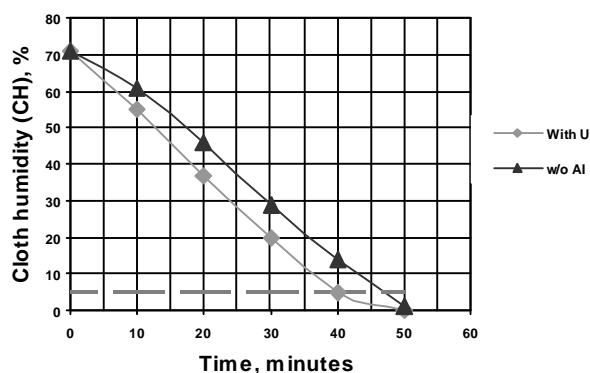


Рисунок 11. Динамика изменения влагосодержания белья, измеренная в соответствии с методикой ANSY/АНАМ HLD-1-1992 при различных видах энергетического воздействия.

при максимальной реализованной мощности излучения (около 500 Вт потребляемой электрической мощности со стальным излучателем);

5. оптимальная скорость сушки составляет 12 г/мин (около 350 Вт потребляемой электрической мощности со стальным излучателем или около 200 Вт потребляемой электрической мощности с титановым излучателем);

6. более быстрое нарастание скорости на начальном этапе сушки при ультразвуковом воздействии объясняется безинерционностью ультразвукового воздействия, по сравнению с тепловым;

7. более быстрый спад скорости сушки при ультразвуковом воздействии объясняется более быстрым снижением влагосодержания.

Примененная в макетном образце схема размещения излучателя во фронтальной двери имеет ряд ограничений:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов, можно сформулировать следующее заключение по работе:

1. интеграция узла акустической сушки белья в стиральную машину с системой конвективно-тепловой сушки улучшает ее показатели за счет повышения скорости сушки и снижения энергоемкости;

2. с ростом мощности акустического излучения энергоемкость сушки падает;

3. наибольший прирост скорости сушки за счет ультразвукового воздействия наблюдается на начальном этапе сушки, пока воздух внутри стиральной машины и белье еще недостаточно прогреты, а влажность белья высока.

4. наиболее существенные различия скорости сушки белья с ультразвуковым воздействием и без него наблюдаются при пониженной температуре сушащего воздуха.

Вместе тем, конструктивная схема с расположением одного излучателя во фронтальной дверце вносит ряд ограничений и не позволяет в полной мере реализовать потенциал акустической сушки. Поэтому, на основании полученных экспериментальных данных, проведенного анализа и сделанных выводов авторы считают, что дальнейшее повышение эффективности сушки при интеграции системы акустической сушки белья в стиральную машину может быть достигнуто при осуществлении исследований в следующих направлениях:

1. Повышение эффективности излучения и снижение энергопотребления пьезоэлектрических излучателей, за счет использования высокопрочных материалов (титановых и алюминиевых сплавов для выполнения концентраторов и пластин, совершающих изгибные колебания и концентрирующих излучение), увеличения и изменения формы излучающей поверхности пластин совершающих изгибные колебания. Таким образом, при выполнении указанных мероприятий при увеличении потребляемой электрической мощности в 2 раза (до 400 Вт) эффективность удаления влаги будет увеличена не менее чем в 2 раза.

2. Совершенствование существующей, и создание новых конструктивных схем размещения излучателей.

3. Изменение конструктивной формы стиральной машины с учетом особенностей формирования и взаимодействия УЗ колебаний с бельем.

4. Оптимизация процесса сушки с использованием УЗ колебаний высокой интенсивности.

Таким образом, дополнительные исследования и получение новых знаний могут существенно продвинуть решение проблем акустической сушки.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Патент Российской Федерации №2221094

[2] Патент Российской Федерации №2144104

[3] А.В.Лыков. Теория сушки. М., «Госэнергоиздат», 1950

[4] Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. М., «Наука», 1970

[5] Патент Российской Федерации №2239137

[6] Хмелёв В.Н., И.И. Савин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.Н. Лебедев, С.В. Левин, М.В. Хмелёв. Система ультразвуковой сушки на основе пьезоэлектрического бесконтактного излучателя // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник / Под редакцией Г.В. Леонова. – Бийск, 2005. – С.110-114.

[7] Патент Российской Федерации 2141386

[8] Khmelev V.N., Savin I.I., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tsyganok S.N., Chipurin E.V., "Development of Compact Multipurpose Ultrasonic Technological Device", Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2003. - p. 217-221.

[9] ANSY/AHAM HLD-1-1992 Household Tumble Type Clothes Dryers, – recommended by Association of Home Appliance Manufactures from 01.01.1992.