

АКУСТИЧЕСКАЯ СУШКА БЕЛЬЯ В СТИРАЛЬНЫХ МАШИНАХ БАРАБАННОГО ТИПА

Г.В. Леонов, И.И. Савин, В.Н. Хмелев, А.Н. Заборовский, Р.В. Барсуков
С.Н. Цыганок, М.В. Хмелев

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

В статье рассматривается вопрос повышения эффективности и снижения энергоемкости сушки белья в стиральных машинах барабанного типа за счет применения акустических колебаний высокой интенсивности. Сформулированы основные требования к акустической сушильной системе, предложены варианты практической реализации акустической сушки на базе пьезоэлектрических излучателей. Разработаны конструктивные схемы основных элементов сушильной системы: излучателя, резонаторов, звукоизоляции.

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие техники во второй половине двадцатого века отразилось практически на всех сферах человеческой деятельности, включая удовлетворение жизненных потребностей.

Одна из важнейших и наиболее трудоемких бытовых операций – стирка. Уже в 60-х годах двадцатого века были созданы первые автоматические стиральные машины. Тогда это были громоздкие и ненадежные устройства, работающие по жестко заданной программе. Современные же автоматические стиральные машины – компактные надежные устройства, работающие по гибкой программе, учитывающей тип белья, его количество, загрязненность и другие факторы. Эти машины позволяют выполнять в одном объеме барабана практически все операции по обработке белья: замачивание, стирку, полоскание, отжим, а ряд современных моделей стиральных машин еще и сушку отстиранного белья.

Сушка – завершающая операция обработки белья. Однако конвективный способ сушки белья, реализуемый

практически во всех современных стиральных обладает существенными недостатками. Один из основных недостатков – необходимость обеспечения высокой температуры сушащего воздуха, что может привести к пересыханию и порче белья и делает невозможным сушку «деликатных» тканей. Второй недостаток – высокая энергоемкость процесса, обусловленная необходимостью обеспечения фазового перехода воды к газообразному состоянию. Третий недостаток – длительность процесса.

Недостатки объясняются не низким уровнем проработки конструкции стиральных машин, а принципиальными недостатками способа конвективной сушки. В связи с этим возникает необходимость использования других способов, среди которых наиболее перспективным является способ сушки в акустических полях высокой интенсивности.

1. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Сушить различные материалы (пищу, гончарные изделия, ткани, дрова и т.п.) человек научился еще в древние времена и с тех пор непрерывно пытается усовершенствовать процесс сушки – увеличить ее скорость, снизить энергозатраты, однако, принцип (конвективно-тепловой) оставался неизменным. Лишь в конце девятнадцатого - начале двадцатого века были предложены альтернативные способы энергетического воздействия: вакуумный, электростатический, акустический.

Согласно классической (конвективно-тепловой) теории сушки капиллярно-пористых материалов [1], удаление влаги при

постоянном энергетическом воздействии происходит неравномерно: пока влажность материала достаточно высока – скорость сушки постоянна – приток влаги из глубинных слоев восполняет испарившуюся влагу со свободной поверхности. По мере снижения влагосодержания, приток влаги к поверхности становится недостаточным. Наружные слои пересыхают, а испарение идет из глубины. Скорость сушки начинает снижаться и асимптотически стремиться к нулю.

Наиболее эффективным является способ сушки в акустических полях высокой интенсивности [2]. Действующими факторами акустического воздействия являются:

- уменьшение толщины диффузионного и гидродинамического слоя на границе раздела жидкость-воздух;
- образование кавитационных пузырей в жидкости, заключенной внутри материала, способствующих выдавливанию влаги;
- уменьшение вязкости жидкости, способствующее ускоренному перемещению влаги из глубинных слоев на поверхность;
- создание быстроменяющихся зон повышенного и пониженного давления;
- радиационное давление, направленное к поверхности высушиваемого материала;

Акустическая сушка обладает значительной меньшей энергоемкостью по сравнению с конвективной, поскольку удаление жидкости из материала осуществляется не только за счет фазового перехода (испарения), но и за счет превращения жидкости в аэрозоль (мелкодисперсного распыления).

Преимущества акустической сушки начинают проявляться при величине уровня звукового давления, равном 130-135 дБ. С ростом уровня звукового давления эффективность сушки существенно возрастает.

Как известно [2], при одинаковом энергетическом воздействии сушка капиллярно-пористых материалов (к которым относится и белье) происходит в 4-5 раз быстрее, чем при конвективной и в 6-7 раз быстрее вакуумной и, кроме того, может протекать при низких температурах, что делает ее весьма перспективной для применения в бытовых стиральных машинах. Несмотря на то, что существуют промышленные крупногабаритные

акустические сушилки [2,3,4,5], применение акустических колебаний для сушки белья в стиральных машинах авторам неизвестно.

В связи с этим возникла необходимость в анализе возможностей ультразвуковых колебаний применительно к реализации сушки в стиральных машинах, создании экспериментального образца оборудования для подтверждения эффективности акустической сушки и выработке рекомендаций по промышленному применению новой технологии сушки.

II. ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ СУШКИ БЕЛЬЯ В СТИРАЛЬНЫХ МАШИНАХ, ТРЕБОВАНИЯ К АКУСТИЧЕСКОЙ СУШИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

В настоящее время преимущественное распространение в быту получили автоматические стиральные машины барабанного типа. Схематически устройство стирально-сушильной машины барабанного типа производства компании «Samsung Electronics» [6] показано на рисунке 2.1.

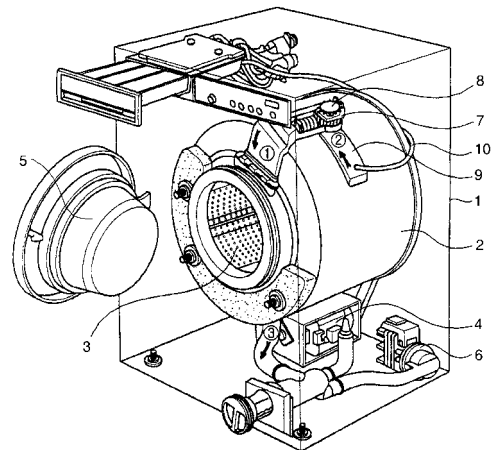


Рисунок 2.1. Схема устройства стирально-сушильной машины барабанного типа

Стирально-сушильная машина содержит в своем составе такие важнейшие узлы как корпус 1, внешний барабан 2, барабан для белья 3, двигатель 4, фронтальную дверцу 5, откачивающий насос 6, нагреватель воздуха 7, вентилятор 8, воздуховоды 9, охладитель воздуха 10.

Барабан для белья (внутренний барабан) 3 закреплен во внешнем барабане с возможностью вращения. Барабан

выполняется из коррозионно-стойкого металла, имеет перфорацию для протока жидкости и лопатки для перемешивания белья. Внешний барабан 2 выполняется, как правило, из полимерного теплоизолирующего химически стойкого материала. Внутри внешнего барабана при стирке находится моющий раствор, а при отжиге туда стекает вода. Барабан выполнен герметичным, и с фронтальной стороны закрывается дверцей 5.

Сушильная система включает в себя нагреватель воздуха 7, вентилятор 8, воздуховоды 9 и охладитель воздуха 10. Работает сушильная система следующим образом: сухой воздух нагревается нагревателем 7 и с помощью вентилятора 8 по воздуховоду направляется внутрь барабана для белья 3. Пройдя сквозь белье воздух, увлажняется, затем попадает в охладитель 10, где влага конденсируется и удаляется в сливную систему, откуда насосом 6 в канализацию. Осушенный воздух вновь нагревается и направляется в барабан. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута необходимая влажность белья.

Проведенные авторами исследования [7] показали, что применительно к стиральным машинам принципиально возможны два способа ввода колебаний в высушиваемый материал: через воздушную среду или при непосредственном контакте с колеблющейся поверхностью.

Непосредственный ввод колебаний сопряжен с необходимостью возбуждения изгибных колебаний стенок барабана для белья с амплитудой 100-200 мкм и частотой 18-35 кГц, что вызовет значительные вибрационные нагрузки и потребует внесения существенных изменений в конструкцию стиральной машины.

Реализация передачи колебаний через воздушную среду сопряжена с меньшими конструктивными изменениями стиральной машины, а эффективность сушки при этом ожидается не меньше чем при непосредственном вводе колебаний. Поэтому способ ввода колебаний через воздушную среду предпочтительнее.

Исходя из особенностей акустической сушки, конструктивных особенностей стиральных машин, требований удобства и

безопасности эксплуатации, бытового комфорта сформулированы следующие требования к отдельным элементам устройства акустической сушки:

- уровень звукового давления внутри барабана для белья не менее 135-160 дБ (при уровне звукового давления ниже 135 дБ процесс сушки протекает малоэффективно, при уровне выше 160 дБ вибрационные нагрузки на элементы стиральной машины могут вызвать их разрушение),

- частота акустических колебаний, создаваемых излучателем, должна лежать гарантированно выше порога слышимости человека и составлять не менее 20 кГц,

- уровень звукового давления вне корпуса стиральной машины не должен превышать 100 дБ (при частоте 22000 Гц) в соответствии с ГОСТ 12.1.001, но в связи с тем, что некоторые люди обладают чувствительностью к звуковым колебаниям с частотой свыше 20 кГц исходя из соображений бытового комфорта уровень звукового давления следует ограничить до 50 дБ на расстоянии 1 м,

- элементы акустической сушильной системы не должны препятствовать движению белья внутри барабана, наполнению барабана моющим раствором, удалению моющего раствора, вращению барабана, открыванию и закрыванию дверцы стиральной машины,

- элементы акустической сушильной системы должны иметь возможность работы в условиях погружения в жидкость или иметь гидроизоляцию,

- устройство должно отвечать требованиям электрической и пожарной безопасности, не содержать быстроизнашивающихся частей, не нуждаться в периодической регулировке или наладке, работать в автоматическом режиме,

- срок службы акустической сушильной системы должен быть не меньше нормативного срока службы стиральной машины.

Основным элементом, определяющим конструкцию сушильной системы, является акустический излучатель. Наибольшее распространение получили газоструйные излучатели Гартмана, преобразующие энергию потока газа (в основном воздуха) в энергию акустических колебаний, а также

пьезоэлектрические излучатели, преобразующие энергию электрических колебаний в энергию ультразвуковых колебаний.

Несмотря на такие достоинства газоструйных излучателей [8,9], как высокий кпд (более 25%), небольшие габариты, простота конструкции и возможность работы в условиях высокой влажности, применение их в бытовой стиральной машине требует высокопроизводительного компрессора. Это вызовет значительное удорожание стиральной машины (стоимость компрессора составляет 50-80% от стоимости стиральной машины без функции сушки). Кроме того, ресурс газоструйного излучателя и компрессора невелик, а компрессор также нуждается в регулярном обслуживании специалистом.

Пьезоэлектрические излучатели [10,11,12] весьма долговечны (срок службы при непрерывной эксплуатации 8-12 лет), себестоимость электронных генераторов для их питания при современном уровне развития электронной техники невелика. Кроме того, пьезоэлектрические излучатели обладают

повышенных температур (100°C и выше), не требуют высоких питающих напряжений.

Поэтому пьезоэлектрические излучатели являются наиболее перспективными для практической реализации акустической сушки в стиральных машинах барабанного типа.

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ СУШИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Как уже было отмечено, для обеспечения практической реализации ультразвуковой сушки белья необходимо обеспечить уровень звукового давления вблизи высушиваемого участка белья на уровне 135-160 дБ, что соответствует абсолютной величине звукового давления 100-2000 Па и интенсивности излучения 350 – 6300 Вт/м².

При использовании пьезоэлектрических излучателей необходимый уровень звукового давления обеспечивается при амплитуде колебаний излучающей поверхности порядка

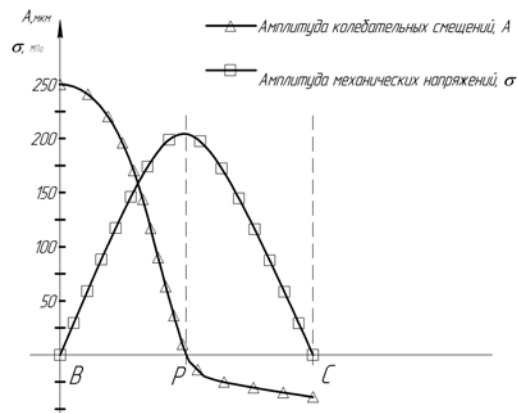
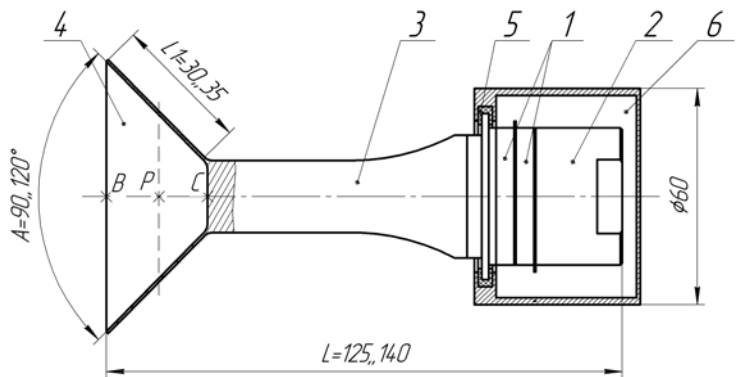


Рисунок 3.1. Схема пьезоэлектрического излучателя с рупорным трансформатором колебательной скорости и графики распределения амплитуды колебательных смещений и механических напряжений

высоким электроакустическим кпд (при работе в воздушной среде 35% и выше), позволяют обеспечивать уровень звукового давления до 160 дБ. Конструкция пьезоэлектрического излучателя позволяет разместить все электрические элементы в герметичный корпус, а узел акустической развязки позволяет исключить передачу акустических колебаний на корпус. Современные пьезоэлектрические материалы способны работать в условиях



75-150 мкм. В связи с тем, что амплитуда колебаний пьезоэлектрических элементов, даже в резонансном режиме, составляет порядка 5-10 мкм, необходимая амплитуда колебаний излучающей поверхности может быть достигнута только применением трансформаторов колебательной скорости или согласующих четвертьволновых слоев. Согласующие четвертьволновые слои позволяют создать достаточно компактный преобразователь [13], однако, их применение

в излучателях большой мощности ограничивается высоким коэффициентом затухания колебаний в материале согласующего слоя, и как следствие, большим количеством рассеиваемого тепла, а также низкой теплопроводностью. Металлические трансформаторы колебательной скорости обладают меньшим коэффициентом затухания и большей теплопроводностью, что позволяет передавать через них значительные акустические мощности.

Для работы в воздушной среде наиболее перспективным представляется использование рупорных трансформаторов колебательной скорости, которые позволяют увеличивать значение колебательной скорости (амплитуды колебаний) в 20-40 раз и воздействовать на значительный объем воздуха.

Схема пьезоэлектрического излучателя, снабженного рупорным трансформатором колебательной скорости представлена на рисунке 3.1.

Пьезоэлектрический излучатель состоит из пьезоэлектрических элементов 1, задней 2 и передней 3 частотопонижающих накладок, трансформатора колебательной скорости 4, узла акустической развязки 5, герметичного корпуса 6.

С помощью компьютерного моделирования были определены следующие характеристики преобразователя: коэффициент усиления, распределение амплитуды колебательных смещений по излучающей поверхности, рабочая частота, значения механических напряжений, возникающих в излучателе.

ТАБЛИЦА. 1.

Параметр	Значение
Длина преобразователя L, мм	135
Угол раскрытия рупора A, град.	90
Длина образующей конической части рупора L1, мм	33
Резонансная частота, кГц	21,8
Коэффициент трансформации амплитуды	24
Максимальная амплитуда колебаний излучающей поверхности ограниченной пределом усталостной прочности материала 200МПа, мкм	250

Уровень звукового давления, создаваемого излучателем вблизи излучающей поверхности, дБ	до 160
Мощность акустического излучения в воздушную среду, Вт	до 100
Потребляемая электрическая мощность, Вт	250-350

Распределение амплитуды колебательных смещений и механических напряжений вдоль продольной оси рупорного трансформатора колебательной скорости показано на графике, также представленном на рисунке 3.1.

В связи с тем, что в стенках рупорного трансформатора колебательной скорости возникают значительные механические напряжения, достигающие значений 200МПа, особые требования предъявляются к материалу и способу изготовления трансформатора колебательной скорости.

Учитывая размеры излучателя, в частности, его длину (125-150 мм) и диаметр (60-70 мм), единственным возможным вариантом размещения излучателя представляется его закрепление на внутренней поверхности внешнего барабана, причем, таким образом, что его акустическая ось оказывается параллельной оси вращения барабана для белья. В этом случае, перенаправить излучение внутрь барабана для белья удастся с помощью акустических зеркал.

Количество излучателей и место расположения их, очевидно, будет определяться конструкцией конкретной стиральной машины и необходимой мощностью излучения. Однако, учитывая опыт проектирования и эксплуатации ультразвуковых пьезоэлектрических колебательных систем можно рекомендовать размещение излучателей в верхней или в боковой части барабана, там, где они в процессе работы стиральной машине не окажутся погруженными в жидкость. Учитывая затухание ультразвуковых колебаний в воздушной среде необходимо обеспечить минимальное расстояние от излучающей поверхности до белья, что может быть обеспечено распределением последнего по поверхности барабана при его

вращении. Вращение барабана позволяет также обеспечить равномерность облучения всего белья.

Возможная схема расположения излучателей и распределение уровня звукового давления (расчетное) показано на рисунке 3.2.

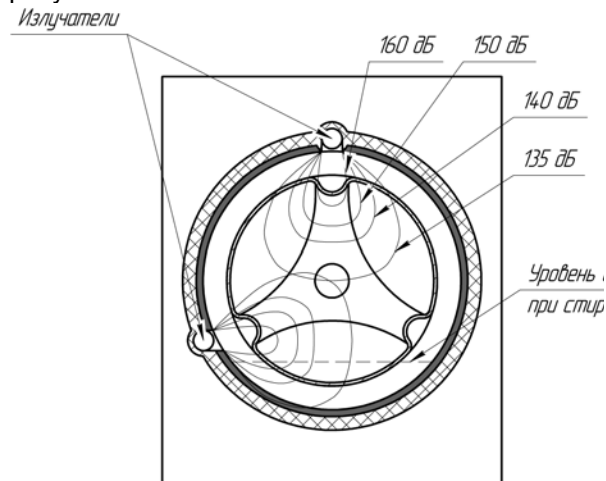


Рисунок 3.2. Возможная схема расположения излучателей и ожидаемое распределение уровня звукового давления

Повысить интенсивность звуковых колебаний и обеспечить равномерность их распределения в объеме барабана можно используя резонансные явления. В конструкции стиральной машины можно выделить два «естественных» резонатора: воздушный объем барабана для белья и воздушный объем промежутка между барабанами, причем его резонансные явления могут быть усилены разбиением на отдельные псевдозамкнутые резонансные ячейки, в рамках каждой из которых происходят колебания воздушных масс в направлении от барабана для белья к внешнему барабану и обратно. Для использования резонансных явлений, частота излучаемых акустических колебаний должна соответствовать собственной резонансной частоте резонирующего элемента.

Резонансная частота воздушного объема барабана для белья, а также воздушного промежутка между барабанами зависит от большого количества факторов: загрузки белья, его влажности, температуры воздуха и др. В связи с этим, подстройку частоты излучения необходимо осуществлять

на основании информации о фактическом уровне звукового давления внутри барабана для белья, стремясь достичь его максимума. Это обеспечивается размещением в объеме барабана для белья датчика уровня звукового давления (микрофона).

Существенно повысить эффективность акустического воздействия в воздушной среде позволяет применение специальных акустических резонаторов, например резонаторов Гельмгольца, напоминающих по форме бутылку с узким горлом. Резонатор Гельмгольца позволяет усиливать колебания с частотой

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (5)$$

где c - скорость звука в воздухе,
 S - площадь поперечного сечения узкой части резонатора,
 L - длина узкой части резонатора,
 V - внутренний объем резонатора.

Частотные характеристики таких резонаторов весьма стабильны, что позволяет использовать для их возбуждения узкополосный акустический излучатель.

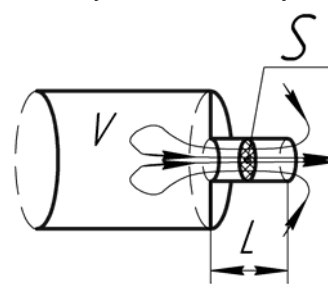


Рисунок 3.3. Схема резонатора Гельмгольца

В стиральной машине резонаторы Гельмгольца необходимо размещать в верхней части внешнего барабана (чтобы вода, попавшая в них при работе машины, свободно вытекала), таким образом, чтобы ось узкой части резонатора была направлена к центру барабана для белья. Пример расположения излучателя и резонаторов показан на рисунке 3.4.

Заключение пьезоэлектрического излучателя в резонансный объем также позволяет повысить звуковое давление при неизменной амплитуде колебаний излучающей поверхности. На практике удается добиться коэффициента усиления звукового давления в 2-3 раза (6-10 дБ).

Конструкции электронных генераторов для питания пьезоэлектрических колебательных систем большой мощности [14] достаточно хорошо отработанны и характеризуются высокой надежностью, небольшими габаритами, высоким КПД. Уровень автоматизации современных электронных генераторов позволяет без участия человека обеспечивать получение необходимых выходных параметров в достаточно широком диапазоне условий работы ультразвуковых колебательных систем. Однако при работе излучателя в воздушной среде его колебательная добротность достигает значения 100 и более, что определяет некоторые требования к электронному генератору. Во-первых, при работе излучателя с высокой колебательной добротностью в выходных каскадах генератора протекает ток значительной силы, амплитуда которого может в 5-10 раз превышать силу тока, потребляемого от сети, что требует применения в выходных цепях генератора элементов, рассчитанных на большую мощность и специальной топологии печатной платы. Во-вторых, ширина резонансной полосы частот составляет всего 150-200 Гц, что требует высокой точности работы системы автоматической подстройки частоты и стабилизации амплитуды выходных колебаний, а также исключает возможность подключения нескольких излучателей к одному генератору.

Для оптимизации акустического воздействия стиральная машина должна быть оснащена датчиками уровня звукового давления в объеме барабана, в качестве

которых могут быть использованы водозащищенные микрофоны, устанавливаемые на внешней поверхности барабана для белья. Такое размещение микрофонов позволяет контролировать уровень звукового давления непосредственно вблизи зоны акустического воздействия.

Для защиты людей от ультразвукового воздействия высокой интенсивности стиральная машина в обязательном порядке должна быть снабжена шумоизоляцией. Поскольку акустическое воздействие происходит внутри внешнего барабана, а барабан этот является герметичным (за исключением ввода патрубков подачи и слива воды) наиболее целесообразно разместить элементы шумоизоляции на внешней поверхности внешнего барабана. В качестве шумоизолирующих материалов могут быть использованы пенополимеры, минеральная вата, другие пористые и волокнистые материалы. Применение многослойной шумоизоляции (2-3 слоя) позволит снизить уровень звукового давления вне стиральной машины до безопасных значений (30-40 дБ). Фронтальная дверца также должна быть звукоизолирована. В случае если прозрачность дверцы значения не имеет, применимы те же материалы что и для звукоизоляции барабана. Если необходимо обеспечить прозрачность дверцы, необходимую звукоизоляцию можно обеспечить многослойным прозрачным полимером и вакуумированием промежутков между слоями. Во избежание передачи

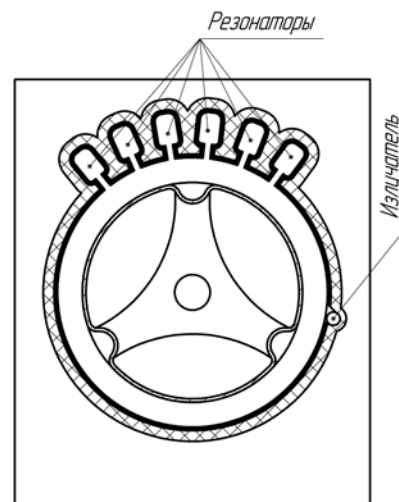


Рисунок 3.4. Расположение излучателя и резонаторов в стиральной машине

акустических колебаний, патрубков подачи воды в барабан должен быть оборудован автоматическим вентилем, а сливной – глушителем акустических колебаний.

Как показали предварительные исследования, предотвратить передачу ультразвуковой вибрации на корпус стиральной машины способна штатная система подвешивания внешнего барабана и резиновый уплотнитель дверцы машины.

Для контроля уровня звукового давления вне барабана для белья и уровня вибрации корпуса в должны быть предусмотрены датчики, отключающие акустическую сушилку при превышении безопасных уровней воздействия (например, при повреждении шумоизоляции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы был предложен и разработан способ интенсификации процесса сушки белья в стиральных машинах с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Показано, что акустическая сушка в 4-5 раз эффективнее конвективной, позволяет сушить белье при низких температурах. Сформулированы требования к акустической сушильной системе стиральной машины, предложены пути практической реализации и конструкции отдельных устройств, в частности пьезоэлектрического излучателя, акустических резонаторов, шумоизоляции. В настоящее время производится конструктивная проработка отдельных элементов акустической сушильной системы применительно к существующим типам стиральных машин и готовится проект создания опытного образца стиральной машины с акустической сушкой белья

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 А.В.Лыков. Теория сушки. М., «Госэнергоиздат», 1950.
- 2 Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. М., «Наука», 1970.
- 3 Патент США №4334366.
- 4 Патент США №6233844.

- 5 В.Н. Хмелев, А.Н. Заборовский «Способ сушки капиллярно-пористых материалов», Патент РФ №2239137.
- 6 Патент РФ №2221094.
- 7 В.Н.Хмелев и др. Отчет по НИР «The analysis of opportunities and development of the offers for realization of small-sized systems of acoustic drying for washing machines». Бийск 2004.
- 8 Источники мощного ультразвука. Под ред. Л.Д. Розенберга. М., «Наука», 1970.
- 9 Авторское свидетельство СССР №1789301.
- 10 Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. "Ультразвуковые электротехнологические установки", Л. Энергоиздат 1982.
- 11 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.
- 12 Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. "Ультразвуковая колебательная система". Патент РФ №2141386.
- 13 Патент РФ №2059239.
- 14 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.