Исследование процесса ультразвуковой сушки в устройствах вентиляционного типа

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

***Аннотация* — В статье представлены результаты исследований, направленных на повышение производительности и снижение энергопотребления сушильных машин вентиляционного типа, за счет введения в конструктивную схему излучателей ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.**

I.Введение

В проведенных ранее исследованиях по ультразвуковой сушке белья получены результаты, подтверждающие эффективность применения ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса сушки в устройствах барабанного типа с системой удаления влаги методом конденсирования [1]. Максимальная скорость сушки, достигнутая при одновременном тепловом и УЗ воздействии не превышала 14 г/мин, без теплового воздействия - 4,4 г/мин.

Полученные результаты подтвердили необходимость и возможность повышения эффективности процесса за счет увеличения ультразвукового воздействия. Поэтому дальнейшие исследования осуществлялись в следующих направлениях:

1. Увеличение энергии УЗ колебаний, вводимых в высушиваемый материал за счет увеличения размеров излучателей (от диаметра 200 мм до 340….420 мм);

2. Увеличение вводимой энергии УЗ колебаний за счет применения двух излучателей, устанавливаемых с двух торцевых поверхностей барабана сушильной камеры;

3. Повышение эффективности создаваемых излучателей за счет:

- использования титановых сплавов при изготовлении концентратов и дисковых излучателей;
- применения новых технических решений при проектировании ультразвуковых колебательных систем, в частности, колебательных систем с тремя электроакустическими преобразователями;
- за счет новых технических решений, позволяющих создать конструкции с преимущественным излучением УЗ колебаний одной фазы;
- за счет создания излучателей с фазовыравнивающими элементами, позволяющими создавать поршневые колебания;

В качестве конечной цели исследований, были приняты следующие технические характеристики сушильной машины:

- потребляемая мощность не более 3 кВт;
- скорость сушки не менее 50 г/мин.

II.КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА

На рисунке 1 представлена схема устройства сушилки с добавленными акустическими узлами. Черными условно показаны имеющиеся элементы сушилки. Серым цветом – элементы, разработанные для решения поставленных задач.

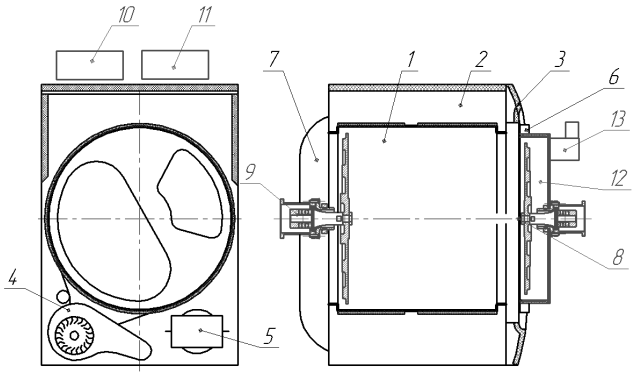

Рисунок 1 – Схема устройства сушилки с добавленными акустическими узлами

Позиция 1 (на рисунке 1) соответствует барабану сушилки, 2 – корпусу, 3 – передней стенке, 4 – вентилятору, 5 – нагревателю, 6 – фронтальной дверце, 7 – задней стенке. Излучатель 8 (диаметр диска 340 мм, частота излучения 22 кГц) размещается во фронтальной дверце (стеклянный люк заменен звукопоглощающей деталью). Излучатель 9 (параметры аналогичны излучателю 8), размещается в задней части барабана. Электронные генераторы 10 и 11 для питания излучателей размещаются в отдельных корпусах в связи с недостатком свободного места внутри сушилки.

Узел фронтальной дверцы доработан. Вместо стекла установлен специальный корпус 12, оклеенный звукоизолирующим материалом. В верхней части корпуса 12 установлен дополнительный вытяжной вентилятор 13.

На задней стенке сушилки размещены две розетки для подключения электронных генераторов.

В связи с тем, что интенсивность акустического

излучения, создаваемого внутри барабана сушилки излучателями представляет опасность для людей, возникла необходимость в звукоизоляции.

Боковая наружная поверхность барабана покрыта слоем звукоизолирующего материала «СПЛЭН» толщиной 8 мм (аналогичен материалу, примененному и испытанному при звукоизоляции стиральной машины).

Звукоизолирующим материалом покрыты также верхняя крышка и передняя стенка 3 корпуса.

III. Акустические излучатели

Акустический излучатель, предназначенный для акустической сушильной системы должен отвечать ряду требований: уровень акустического давления излучения, создаваемого в ближней зоне – не менее 170 дБ, мощность создаваемого УЗ излучения - не менее 0,3 кВт, частота излучаемых колебаний - не менее 18 кГц.

При анализе возможностей различных излучателей установлено следующее. Применение фокусирующих излучателей целесообразно только в случае, когда обрабатываемый (высушиваемый) материал заключен в малом объеме. Применительно к барабанной сушилке использование фокусирующих излучателей неоптимально. В связи с этим, представляют интерес излучатели, создающие в объеме барабана акустическую волну, близкую к плоской.

В ходе выполнения работы было создано несколько излучателей такого типа. Кроме излучающих дисков диаметром 340 мм был изготовлен излучающий диск диаметром 408 мм.

Излучающий диск диаметром 408 мм использовался только на первом этапе текущего проекта. Несмотря на большую эффективную площадь излучения, мощность акустических колебаний, излучаемых в воздушную среду этим излучателем лишь на 10% больше чем у излучателя диаметром 340 мм, при том, что расход материала на производство диска диаметром 408 мм на 35% больше чем на производства диска диаметром 340 мм. В связи с этим, от дальнейшего применения излучающего диска диаметром 408 мм было решено отказаться.

Существует еще одна разновидность излучателя – нефокусирующий, с фазовыравнивающими элементами.

В ходе теоретических исследований и натурных испытаний было определено, что нефокусирующий излучатель с фазовыравнивающими элементами способен обеспечить лучшие характеристики акустического поля по сравнению с ранее рассмотренными типами излучателей. Однако в силу особенности конструкции, а именно утолщения металла в зоне соединения с концентратором, прочность болтового соединения оказалась недостаточной – излом болта возникает при работе в течение 2-3 минут в режиме мощности 200-300 Вт. Оптимизация формы болта результатов не принесла. Очевидный путь решения проблемы – выполнение излучающего диска и концентратора единой деталью методом объемной штамповки. В связи с этим, в экспериментах по сушки данный излучатель не использовался.

IV. Исследование параметров процесса сушки, реализуемого сушильной машиной в штатном варианте без УЗ воздействия

Данные результаты являются исходными и позволяют спланировать ход экспериментов по сушке с применением УЗ колебаний.

Измерение влажности белья осуществлялось весовым методом.

Сухая масса определялась следующим образом. Тестовые образцы белья высушивались в течение 1 часа при температуре сушащего воздуха 100 градусов и взвешивались. В ходе экспериментов было установлено, что сухая масса каждого из 10 исследованных тестовых образцов составляет 100±2 г и от первичного взвешивая других образцов решено было отказаться.

Влагосодержание белья определялось по формуле:

$$v = \frac{M_B - M_C}{M_C} \cdot 100\% \qquad (1)$$

где M_B - масса влажного белья;

M_C - масса сухого белья (сухая масса).

Измерение массы белья осуществлялось электронными весами, имеющими предел взвешивания до 6 кг с точностью до ½ грамма.

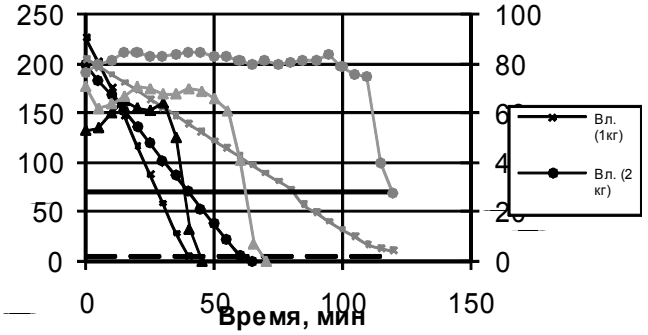

Рисунок 2 – Кинетика процесса сушки белья в режиме энергопотребления 6 кВт (загрузка 1 кг, 2 кг, 5 кг)

На рисунке 2 представлены результаты сушки сильно увлажненного белья без предварительного отжима при работе сушилки в режиме энергопотребления 6 кВт, при различной загрузке белья (1 кг, 2 кг, 5 кг в сухом весе).

Полученные данные позволили сделать следующие промежуточные выводы:

1. Скорость сушки белья в первый период слабо зависит от влажности белья и определяется только величиной загрузки сушилки;

2. Второй период сушки (период падающей скорости) начинается при снижении влажности белья ниже 20%-22%.

Следовательно, высокой точности задания начального влагосодержания в ходе выполнения исследований не требуется.

В связи с тем, что в режиме энергопотребления 6 кВт, скорость сушки (даже без УЗ колебаний) превышает 50 г/мин, проводить дальнейшие эксперименты в этом режиме нецелесообразно.

Поэтому все дальнейшие исследования проводились при работе сушилки в режиме энергопотребления 3,15 кВт. В таком режиме используется только один нагревательный элемент, мощностью 2,7 кВт, а так же 0,45 кВт потребляет двигатель и устройство управления. Поэтому, в соответствии с поставленной задачей, возможно обеспечить суммарную мощность, потребляемую ультразвуковыми устройствами до 0,85 кВт.

Так как скорость сушки в первом ее периоде практически не зависит от влагосодержания белья все дальнейшие эксперименты выполнялись с предварительно увлажненным и отжатым до начального влагосодержания 70%±10%.

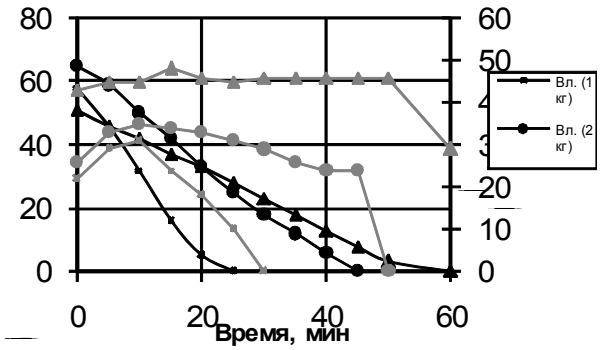

Рисунок 3 – Кинетика процесса сушки белья в режиме энергопотребления 3,15 кВт, при загрузке белья 1 кг, 2 кг, 5 кг

На рисунке 3 представлены результаты сушки белья с предварительным отжимом при работе сушилки в режиме энергопотребления 3,15 кВт, при различной загрузке белья (1 кг, 2 кг, 5 кг в сухом весе).

Таким образом, в режиме энергопотребления 3,15 кВт скорость сушки составляет менее 50 г/мин и представляется возможным увеличить ее до значений, превышающих 50 г/мин за счет действия ультразвуковых колебаний.

В связи с этим, все дальнейшие эксперименты выполнялись только при работе сушилки в режиме энергопотребления 3,15 кВт.

V. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процесс сушки

В ходе первых экспериментов, направленных на исследования влияния ультразвуковых колебаний на процесс сушки, прирост скорости удаления влаги из белья за счет ввода колебаний в камеру сушки был незначителен. Изменение расположения излучателей, их числа и мощности не привело к существенному увеличению эффекта ультразвуковой сушки. По совокупности проведенных экспериментов, включающих 30 процессов сушки 2 кг белья (10 процессов без воздействия УЗ колебаний и 20 - с воздействием УЗ колебаний) средняя скорость сушки без воздействия ультразвуковых колебаний составила 29 г/мин, а скорость сушки с воздействием ультразвуковых колебаний 31 г/мин (предельная не превышала 35 г/мин). С учетом статистической погрешности результатов ±1,7 г/мин (относительная погрешность ±6%), такое различие является незначимым.

Значимое различие обнаруживалось только при кратковременной (2-3 минуты) работе излучателей в режимах, превышающих предельные (потребляемая мощность свыше 450 Вт).

Возникшая ситуация была проанализирована. В ходе анализа было выполнено сравнение способов удаления влаги из барабана в стиральной машине с функцией сушки (предыдущие исследования) и в сушилке, используемой в текущем проекте.

Так в стиральной машине влажный воздух удаляется через всю боковую перфорированную поверхность барабана. В сушилке воздух удаляется через отверстия, расположенные в переднем торце барабана снизу. Было сделано предположение, что отсутствие зависимости скорости удаления влаги из белья от наличия или отсутствия воздействия УЗ колебаний обусловлено тем, что «выбитая» УЗ колебаниями влага возвращается обратно в белье падающим потоком воздуха.

Для проверки этого предположения во фронтальную дверцу было возвращено стекло, внутрь сушилки загружено влажное белье, а излучатель, установленный в задней стенке включен в режиме потребляемой мощности 350 Вт. В результате на внутренней поверхности стекла, а также на металлической поверхности барабана были обнаружены следы аэрозоля, видимые невооруженным глазом. Этот факт подтвердил наличие удаления влаги из белья за счет механизмов УЗ воздействия и ее последующее не удаление из объема барабана штатной системой вытяжной вентиляции сушилки.

Так как барабан сушилки невозможно сделать перфорированным, было принято решение изменить место забора влажного воздуха из барабана. Для этого в верхней части доработанной фронтальной дверце был установлен центробежный вытяжной вентилятор, имеющий характеристики, близкие к характеристикам штатного вентилятора сушилки. Отверстия для забора воздуха штатным вентилятором были заклеены самоклеющейся пленкой.

Во всех нижеописанных экспериментах применялась именно такая схема удаления влажного воздуха.

VI. Основные данные, полученные в ходе экспериментов с использованием излучателей на базе одноэлементных УЗКС

Внешний вид одноэлементной УЗКС представлен на рисунке 4.

Рисунок 4 – Внешний вид одноэлементной УЗКС

На рисунке 5 представлены результаты, полученные при сушке 2 кг белья при использовании одного излучателя (диск с преимущественным излучением одной фазы, двухполуволновая одноэлементная УЗКС с воздушным охлаждением), размещенного во фронтальной дверце при различной мощности, потребляемой УЗ излучателем.

Результаты, приведенные для режимов «без УЗ», «250 Вт» и «320 Вт» получены усреднением по большому количеству экспериментов экспериментам с одинаковыми условиями. Для режима «420 Вт» - только по нескольким экспериментам. Относительная погрешность результатов не хуже 6%.

В связи с тем, что данное исследование было совмещено с исследованием предельных характеристик УЗКС, при мощности 420 Вт произошло нарушение нормальной работы УЗКС. Также было установлено, что при мощности 320 Вт в ходе выполнения повторных экспериментов происходил перегрев пьезоэлектрической керамики, из-за чего характеристики излучателя постепенно ухудшались. Поэтому, было принято решение ограничить мощность для излучателей на базе одноэлементных УЗКС величиной 300 Вт.

Так как мощности 300 Вт недостаточно для достижения требуемой скорости сушки, в следующей серии экспериментов были использованы два излучателя одинаковой конструкции, один из которых закреплялся во фронтальной дверце сушилки, а второй – в задней стенке.

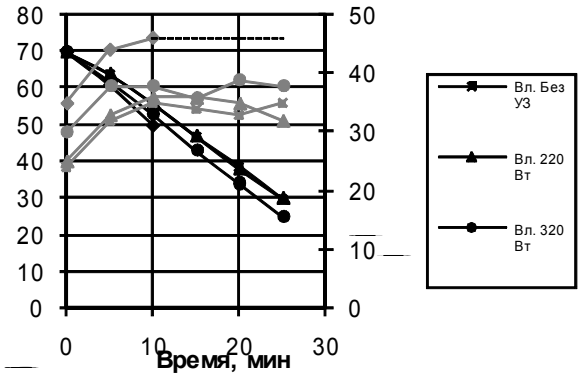

Рисунок 5 – Кинетика процесса сушки 2 кг белья при использовании одного излучателя, работающего при различной мощности

На рисунке 6 представлены результаты, полученные при сушке 2 кг белья при использовании двух излучателей (диск с преимущественным излучением одной фазы, двухполуволновая одноэлементная УЗКС с воздушным охлаждением), мощность которых поддерживалась равной 300 Вт (для каждого излучателя), близкая к предельной долговременной.

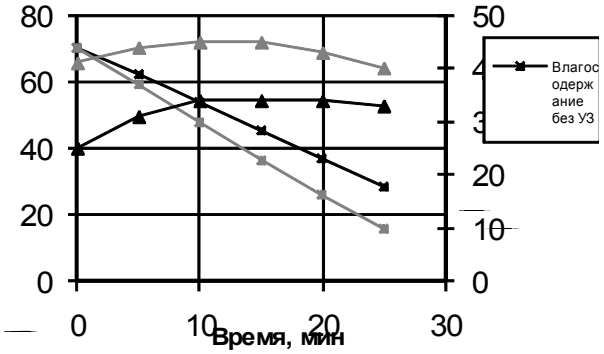

Рисунок 6 – Кинетика процесса сушки 2 кг белья при использовании двух излучателей, работающих при мощности 300 Вт каждый

Полученные результаты представляют собой усредненные данные по пяти экспериментам. Относительная погрешность – не хуже 7%.

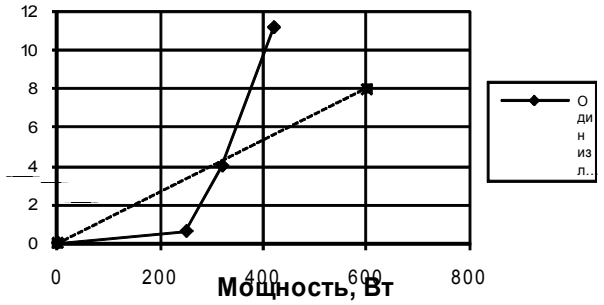

Рисунок 7 – Зависимость скорости сушки 2 кг белья от мощности, потребляемой УЗ излучателем

В таблице 1 представлены сводные данные, характеризующие процесс сушки 2 кг белья при использовании излучателей на базе одноэлементных УЗКС.

Таблица 1 – Сводные данные, характеризующие процесс сушки 2 кг белья при использовании излучателей на базе одноэлементных УЗКС

Режим сушки	Средняя скорость, г/мин	Суммарная потребляемая мощность, кВт	Относительный прирост потребляемой мощности, %	Прирост скорости сушки, г/мин	Относительный прирост скорости сушки, %
Без УЗ	33	3,15	-	-	-
250 Вт	34	3,4	8	1	3
320 Вт*	38	3,47	10	5	15
420 Вт*	45	3,57	13	12	36
2х300 Вт	42	3,75	19	9	27

* - режимы, превышающие предельные.

На основании сделанных выводов были спланированы дальнейшие эксперименты.

Одноэлементные УЗКС в ходе проведенных экспериментов работали в режиме, близком к предельному, что сопровождалось их периодическими отказами.

Увеличение предельной мощности УЗКС за счет увеличения диаметра или высоты пакета пьезоэлектрических колец нецелесообразно, поскольку и то и другое приведет к увеличению длины пути теплопередачи от центральных зон к поверхности. Принимая во внимание низкую теплопроводность пьезоэлектрической керамики, тепловой режим ее в этом случае будет только ухудшен.

Целесообразным представляется применение нескольких пьезоэлектрических преобразователей, объединенных на общем концентраторе. Такие конструкции называются многоэлементными электроакустическими преобразователями.

Рисунок 8. Внешний вид трехэлементных УЗКС.

Общий концентратор суммирует акустическое излучение, генерируемое пьезоэлектрическими преобразователями.

Многоэлементная схема позволяет увеличить площадь охлаждения пьезоэлектрической керамики и соответственно, мощность, передаваемую ультразвуковой колебательной системой.

Внешний вид трехэлементных УЗКС представлен на рисунке 8.

При сравнительных испытаниях одноэлементных и трехэлементных пьезоэлектрических преобразователей, возбуждающих один и тот же излучатель, было установлено, что при входной мощности 400 Вт, пьезоэлектрическая керамика одноэлементного излучателя выходит из строя через 5-7 минут после начала работы, несмотря на интенсивное воздушное или жидкостное охлаждение. Пьезоэлектрическая керамика трехэлементного излучателя способна передавать мощность 400 Вт в течение неограниченного времени, причем, в условиях воздушного охлаждения.

Таким образом, в дальнейшем от использования одноэлементных излучателей решено было отказаться и перейти к трехэлементным УЗКС.

VII. Основные данные, полученные в ходе экспериментов с использованием излучателей на базе трехэлементных УЗКС

На рисунке 9 представлены результаты, полученные при сушке 2 кг белья при использовании одного излучателя и двух излучателей на базе трехэлементных УЗКС, работающих при мощности 400 Вт.

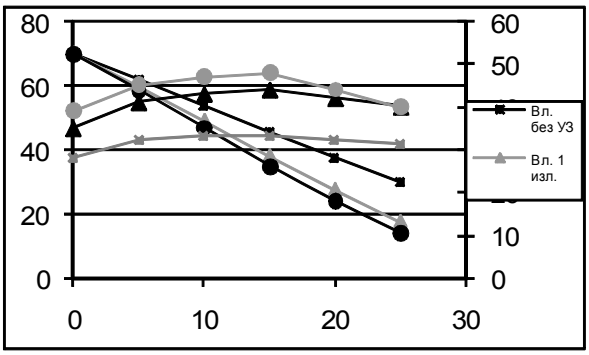

Рисунок 9 – Кинетика процесса сушки 2 кг белья при использовании одного или двух излучателей, работающих при мощности 400 Вт (каждый)

На рисунке 10 представлены результаты, полученные при сушке 5 кг белья при использовании одного излучателя и двух излучателей на базе трехэлементных УЗКС, работающих при мощности 400 Вт.

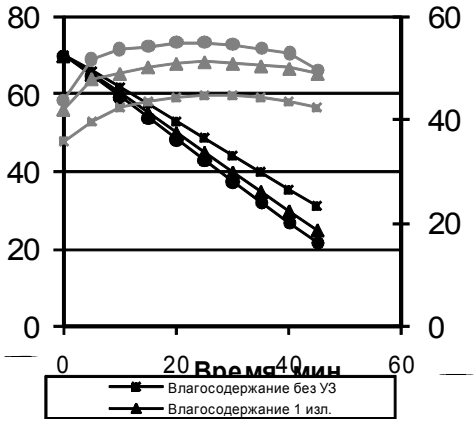

Рисунок 10 – Кинетика процесса сушки 5 кг белья при использовании одного или двух излучателей, работающих при мощности 400 Вт (каждый)

В таблице 2 представлены сводные данные, характеризующие процесс сушки белья при использовании трехэлементных излучателей

Таблица 2 - Сводные данные, характеризующие процесс сушки белья при использовании трехэлементных излучателей

Режим сушки	Средняя скорость, г/мин	Суммарная потребляемая мощность, кВт	Относительный прирост потребляемой мощности, %	Прирост скорости сушки, г/мин	Относительный прирост скорости сушки, %
2 кг, без УЗ	32	3,15	-		
2 кг, 1 изл.	42	3,55	13	10	31
2 кг, 2 изл.	45	3,95	25	13	40
5 кг, без УЗ	43	3,15			
5 кг, 1 изл.	50	3,55	13	7	17
5 кг, 2 изл.	54	3,95	25	11	26

Таким образом, при сушке 5 кг белья при использовании одного излучателя, мощностью 400 Вт скорость сушки достигает 50 г/мин, а при использовании двух излучателей – 54 г/мин.

Однако наибольший прирост скорости сушки с вводом ультразвуковых колебаний по сравнению с аналогичным режимом сушки, но без ввода ультразвуковых колебаний достигается при сушке 2 кг белья. Очевидно, это объясняется тем, что при сушке 5 кг белья внутри барабана остается мало свободного пространства для выхода влаги в виде аэрозоля. Кроме того, с ростом загрузки сушилки ухудшаются условия распределения акустических колебаний в барабане.

VIII.Основные данные, полученные в ходе экспериментов с использованием излучателей на базе трехэлементных УЗКС при сушке белья без нагрева воздуха

В дополнение к полученным данным по сушке белья в условиях нагрева воздуха был проведен ряд экспериментов, позволяющих оценить влияние ультразвуковых колебаний на процесс сушки белья холодным воздухом.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 11. В ходе экспериментов сушка 2 кг белья осуществлялась с использование двух излучателей на базе трехэлементных УЗКС, в режиме потребляемой мощности 400 Вт каждый излучатель.

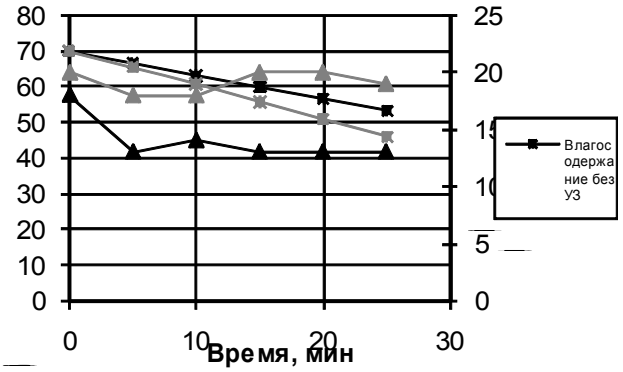

Рисунок 11 – Кинетика процесса сушки 2 кг белья без нагрева воздуха при использовании двух излучателей, работающих при мощности 400 Вт каждый

Средняя скорость сушки белья без УЗ воздействия составила 13 г/мин, а с УЗ воздействием – 19 г/м. Абсолютное значение прироста скорости сушки составило 6 г/мин, относительное 46%.

IX.АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 12 в графическом виде представлены значения скорости сушки при различных условиях.

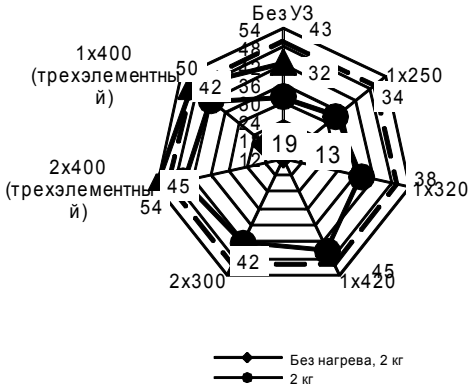

Рисунок 12 - Скорости сушки при различных условиях (лепестковая диаграмма)

На рисунке 13 представлены графики зависимости скорости сушки от мощности воздействия для различных типов излучателей.

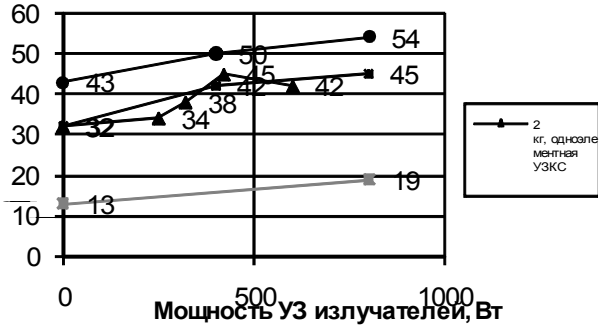

Рисунок 13 – Зависимость скорости сушки от мощности излучателей для различных условий сушки

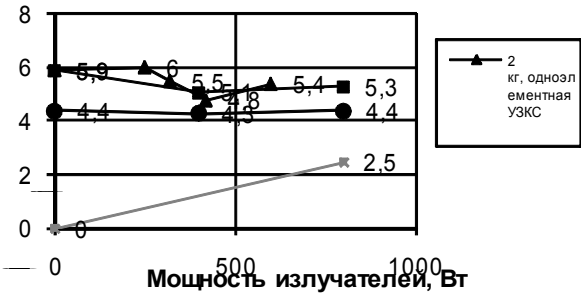

Рисунок 14 – Зависимость энергоемкости сушки от мощности излучателей для различных условий сушки

На рисунке 14 представлены графики зависимости энергоемкости удаления влаги от мощности воздействия для различных типов излучателей.

Таким образом, наименьшая энергоемкость сушки (4,8 кДж/г удаляемой влаги) реализуется при использовании одного излучателя, работающего на максимальной мощности при сушке 2 кг белья. Наибольшая скорость (54 г/мин) реализуется при сушке 5 кг белья при использовании двух излучателей.

Следует также учитывать, что в ходе экспериментов тепло, выделяемое излучателями не направлялось в камеру сушки, а рассеивалось в атмосфере. Учитывая, что к.п.д. излучателя составляет порядка 60%, суммарная энергоемкость сушки (при использовании тепла, выделяемого излучателями) еще снизится.

X.КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СУШИЛКИ

В ходе контрольных испытаний выполняется процесс сушки белья от начального влагосодержания 70% до конечного влагосодержания 5%. Так как наилучший результат по снижению энергопотребления получен при сушке 2 кг белья, контрольные испытания выполнялись только при такой загрузке.

На рисунке 15 представлены результаты контрольных испытаний сушилки при загрузке 2 кг. Использованы два ультразвуковых излучателя, суммарной мощностью 700Вт.

Общее время сушки с ультразвуковыми колебаниями составило 40 минут. Общее время сушки без ультразвуковых колебаний составило 45 минут. Затраты энергии на сушку без ультразвука составили 2,14 кВт*ч. Затраты энергии на сушку с ультразвуковыми колебаниями составили 1,98 кВт*ч. Таким образом достигнуто снижение времени сушки на 28% а энергоемкости на 8%.

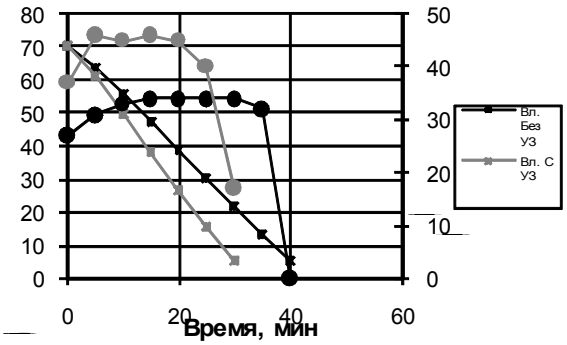

Рисунок 15 – Кинетика контрольного процесса сушки 2 кг белья

XI.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы создан макетный образец акустической сушильной системы для барабанной сушилки, обеспечивающий скорость сушки белья более 50 г/мин при потребляемой мощности менее 4 кВт.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Сушка с применением ультразвуковых колебаний эффективна, так как позволяет снизить энергоемкость процесса удаления влаги;

2. Объем сушилки не позволяет в полной мере использовать преимущества ультразвукового способа сушки из-за неэффективной системы влагоудаления, что подтверждается исследованиями, проведенными при использовании штатной системы удаления влаги и доработанной системы удаления влаги.

3. Создана система ультразвуковой сушки, включающая в себя два излучателя и два электронных генератора, позволяющая реализовать оптимальную конструктивную схему сушилки (излучатели во фронтальной и тыльной части).

4. Спроектированы и изготовлены два различных типа излучателей, практически апробирована и оптимизирована их конструкция. Конструкция излучателя, обеспечивающая эффективность излучения в одном направлении более 70%, может быть рекомендована для серийного производства уже в существующем виде. Конструкция излучателя с фазовыравнивающими элементами по результатам теоретических исследований и натурных испытаний способна обеспечить лучшие характеристики акустического поля, но на сегодняшнем этапе требует доводки.

5. Предложен новый тип многоэлементных пьезоэлектрических преобразователей, обеспечивающих долговременную мощность излучения свыше 400 Вт в условиях воздушного охлаждения. Преобразователи изготовлены и практически апробированы. Полученные результаты позволяют рекомендовать эту конструкцию для серийного производства.

6. Выявлены недостатки штатной системы удаления влаги из барабана применительно к ультразвуковому

способу сушки. Конструкция системы удаления влаги изменена и апробирована. Рекомендуется удалять влажный воздух не из нижней, а из верхней части барабана.

7. Определены оптимальные режимы сушки белья с использованием ультразвуковых колебаний.

Литература

[1] V.N. Khmelev, I.I. Savin, D.S. Abramenko, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, A.N. Lebedev "Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine", Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2006.

[2] Патент Российской Федерации №2221094

[3] Патент Российской Федерации №2144104

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

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

[6] Патент Российской Федерации №2239137

[7] 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.

[8] Патент Российской Федерации 2141386

[9] 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.