

**Лаборатория акустических процессов  
и аппаратов**

**Акустическая сушка белья в  
стиральных машинах  
барабанного типа**

**Бийский технологический институт**

[www.u-sonic.ru](http://www.u-sonic.ru)

# Сушка

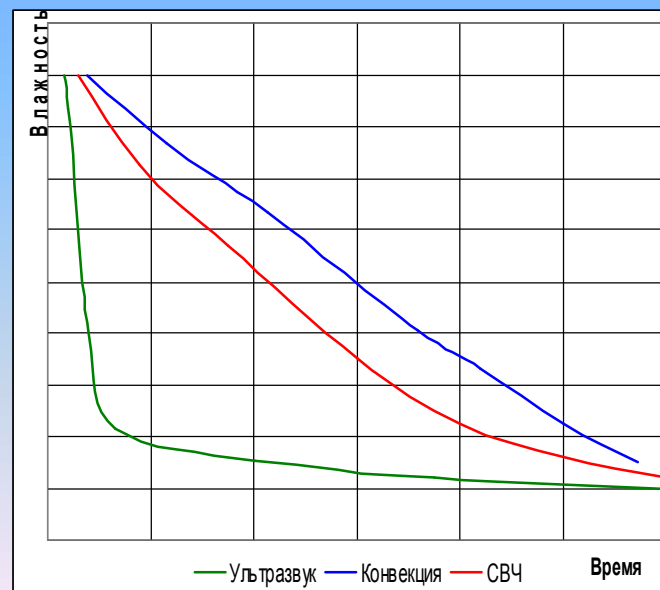
Сушка – заключительная стадия любой стирки белья, позволяет полностью автоматизировать процесс стирки, что сводит к минимуму ручной труд.

## Недостатки

конвективной сушки:

- Высокая энергоемкость и длительность.
- Ограничение на минимальный размер стиральной машины.
- Невозможность сушки деликатных тканей.
- Возможность пересыхания и порчи белья.

## Сравнительные характеристики способов сушки



## Основные

преимущества  
ультразвуковой  
сушки:

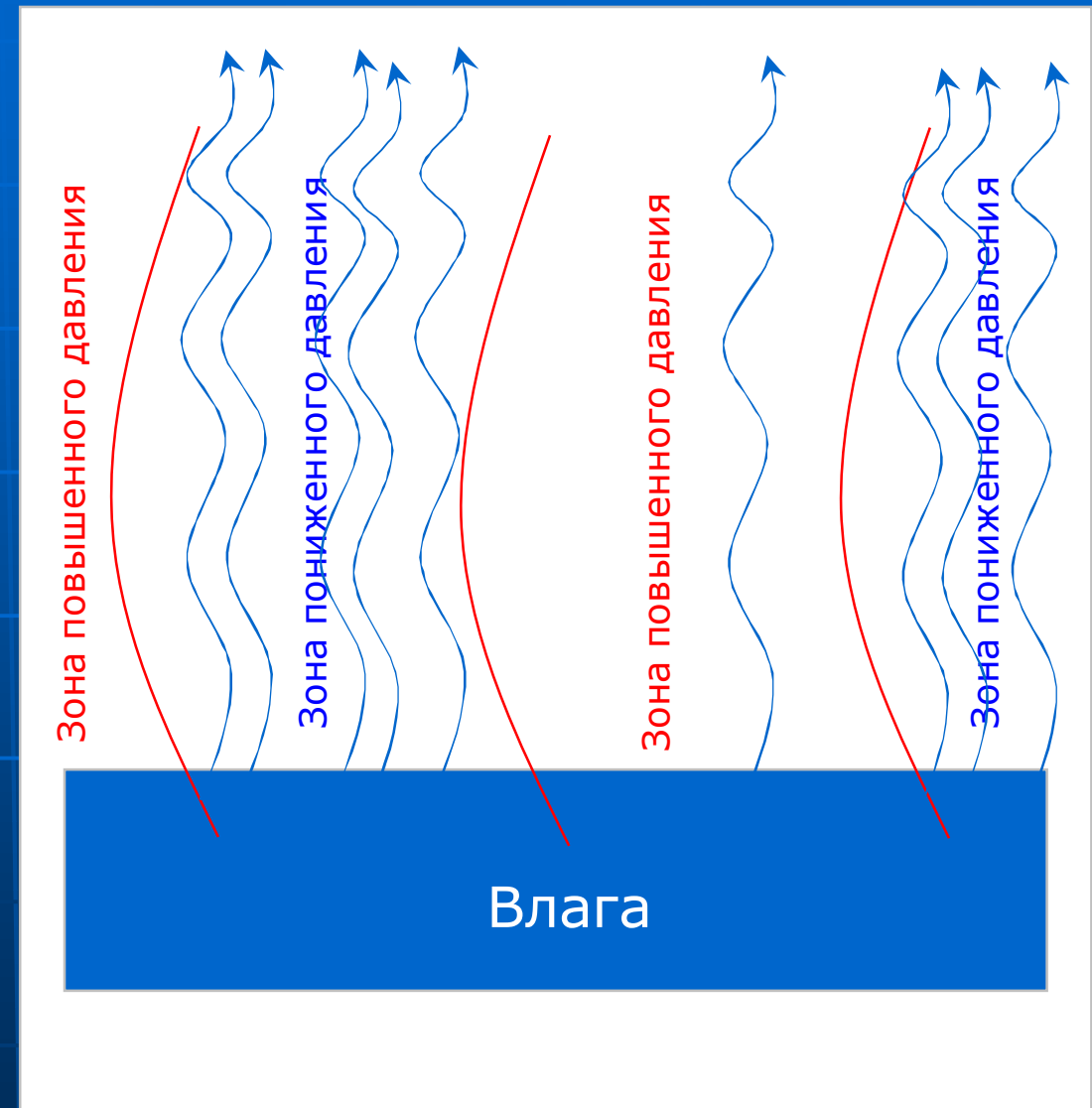
- Снижение энергопотребления.
- Возможность обеспечения качественной и эффективной сушки при более низких температурах воздуха.

# Действующие Факторы Акустической (Ультразвуковой) Сушки



# Перепады Давления Над Поверхностью

- n При распространении акустической волны над поверхностью материала образуются быстросменяющиеся друг друга зоны повышенного и пониженного давления.
- n Согласно гипотезе Буше в зоне повышенного давления скорость процесса сушки практически не замедляется, в то время как в зоне пониженного давления возникает дополнительный эффект вакуумной сушки.



# Акустические Потoki В Ограниченном Пространстве

- n Потоки в жидкой и газовой среде при распространении акустической волны высокой интенсивности вызываются вязким трением
- n В безграничной среде акустические потоки ламинарные и направлены вдоль вектора распространения звуковой волны
- n В условиях стоячей акустической волны акустические потоки замкнутые, а вблизи пограничного слоя образуют завихрения
- n Скорость акустических потоков квадратично зависит от звукового давления и в диапазоне 140-150 дБ составляет 6-10 м/с

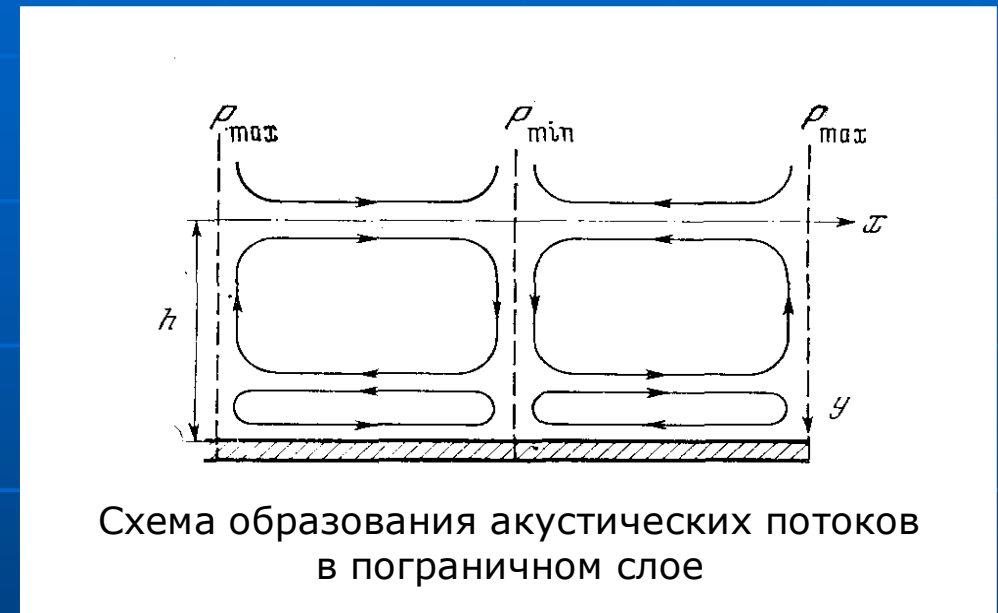
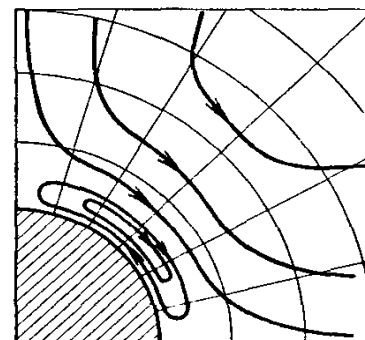


Схема образования акустических потоков в пограничном слое

**При уровне звукового давления 140-150 дБ основной интенсифицирующей силой акустической сушки являются акустические потоки, способствующие ускорению процесса испарения влаги и ее удаления из пограничного слоя**

# Микропотоки Около Препятствия

- п При взаимодействии акустической волны с высушиваемым бельем в непосредственной близости у влажных волокон образуются микропотоки
- п При низких интенсивностях акустических колебаний возле препятствия образуются циклические ламинарные потоки, практически не влияющие на процесс массообмена
- п С увеличением интенсивности акустических колебаний выше критической величины потоки становятся турбулентными, и вытесняют пограничный ламинарный поток, способствуя процессу массообмена.



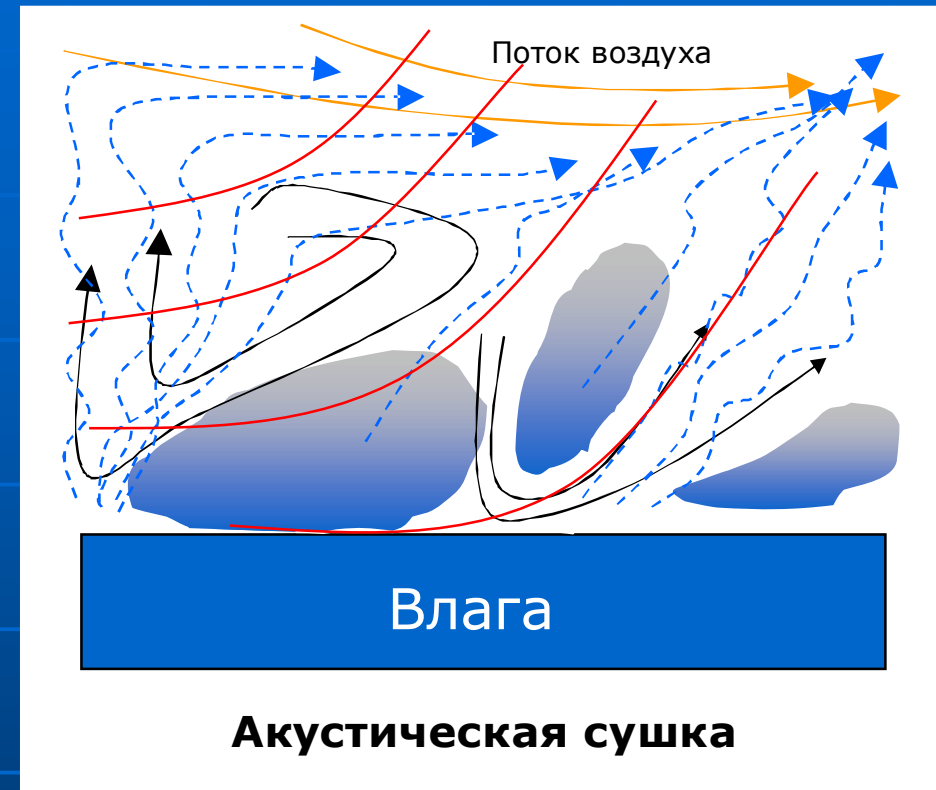
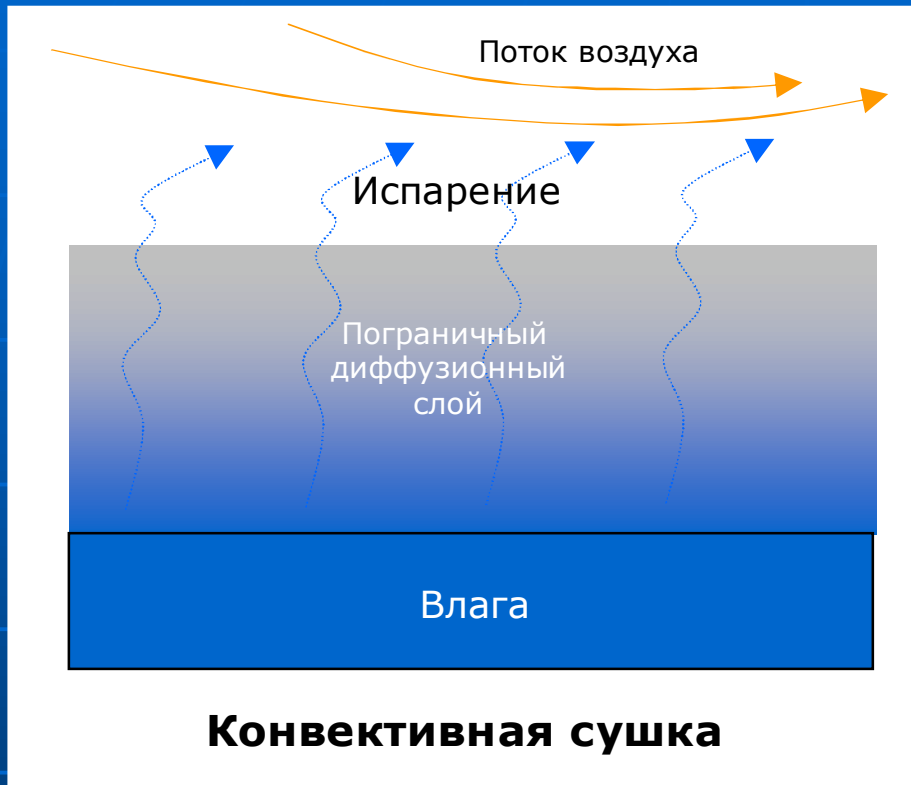
Ламинарный режим  
 $Re < 1200$



Турбулентный режим  
 $Re > 1200$

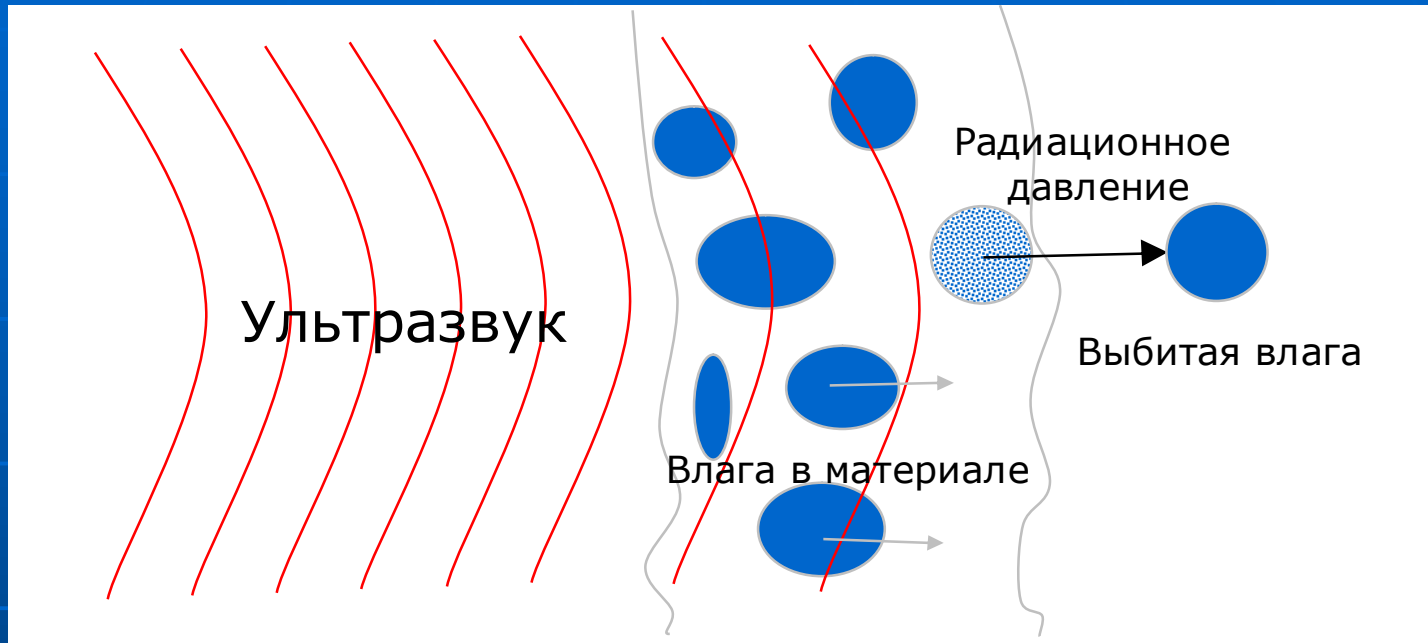
**Микропотоки около препятствия наряду с акустическими потоками вносят существенный вклад в интенсификацию массообменных процессов при интенсивности ультразвукового воздействия 140-150 дБ**

# Уменьшение Толщины Пограничного Слоя



- n Вблизи поверхности высушиваемого материала существует пограничный слой, препятствующий массопереносу. Снижение толщины пограничного слоя обеспечивает прирост скорости сушки.
- n Толщина пограничного слоя определяется диффузионными и гидродинамическими процессами.
- n При конвективной сушке течение воздуха в приповерхностном слое ламинарное и толщина пограничного слоя определяется в основном диффузионными процессам.
- n В интенсивном акустическом поле толщина пограничного слоя резко уменьшается вследствие возникновения турбулентных приповерхностных течений и микропотоков

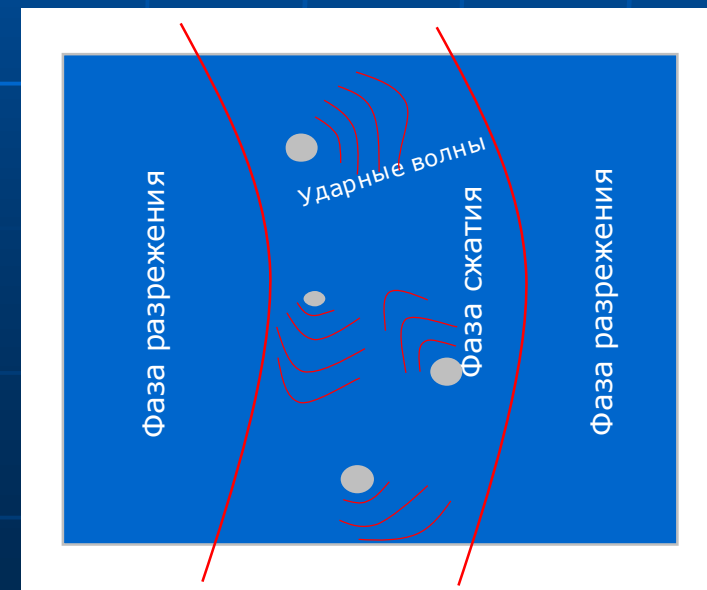
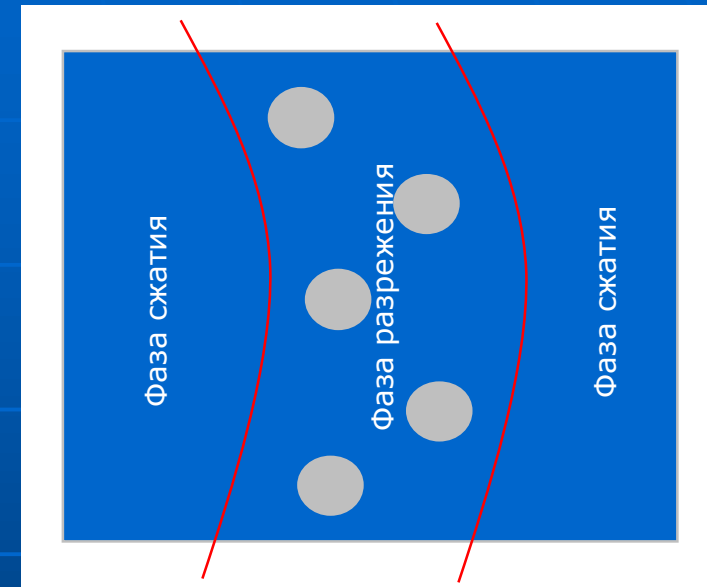
# Радиационное Давление



- н Радиационное давление (давление падающей волны, давление звука) постоянная составляющая давления, действующего на тело, помещенное в акустическое поле.
- н Радиационное давление возникает по причине передачи телу части импульса падающей волны при ее поглощении или отражении.
- н Радиационное давление, возникающее в акустических полях интенсивностью свыше 135 дБ способно выдавливать влагу из капиллярно-пористого материала

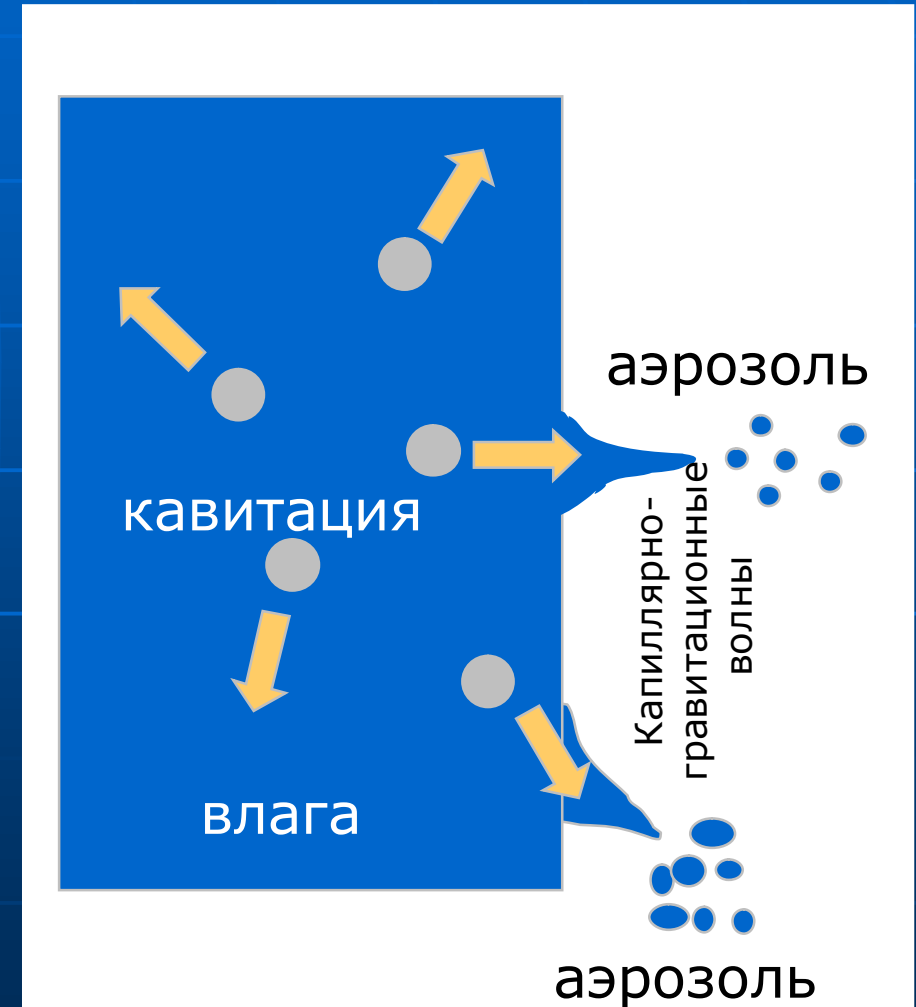
# Кавитация

- n При распространении в жидкости высокоинтенсивной акустической волны возникает явление кавитации.
- n Именно кавитация является основной действующей силой, интенсифицирующей многие физико-химические процессы при воздействии на вещества высокоинтенсивного ультразвука, в том числе и в процессе сушки.
- n Кавитация связана с нарушением сплошности жидкости в фазе разрежения, образованием в зоне разрывов парогазовых пузырей и их захлопывания в последующей фазе сжатия.
- n В момент захлопывания, благодаря неизбежной асимметрии пузырька возникает кумулятивная струя, вызывающая в жидкости ударную волну



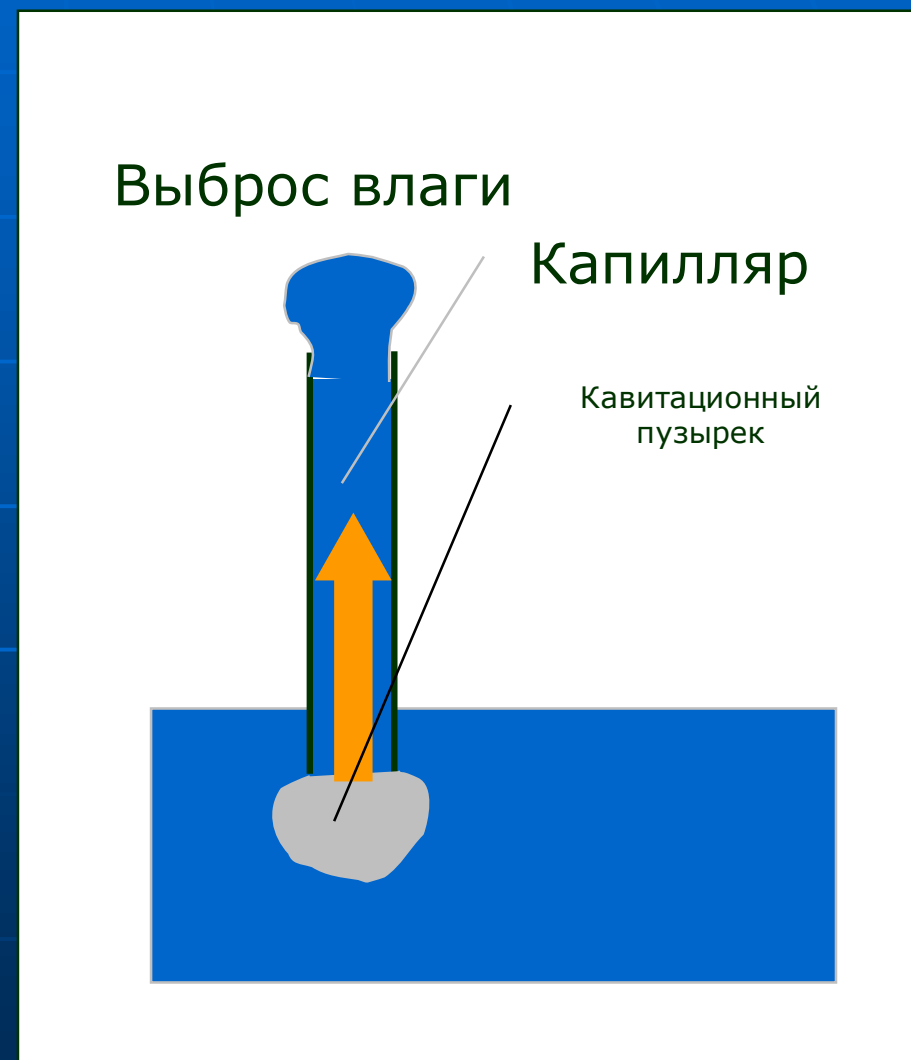
# Кавитационное Распыление Жидкости

- н Захлопывание кавитационных пузырьков вблизи свободной поверхности вызывает гравитационно-капиллярные волны. Остроконечные гребни гравитационно-капиллярных волн распадаются на капли.
- н Отделившиеся капли образуют аэрозоль, который в отсутствии других воздействий находится в равновесном состоянии.
- н При наличии акустических течений, радиационного давления или потока воздуха над свободной поверхностью жидкости происходит эффективное удаление аэрозоля.
- н Кавитационное распыление позволяет осуществлять удаление влаги без фазового перехода, что снижает энергоемкость процесса сушки.
- н Кавитационное распыление возникает только при высоком влагосодержании (более 60%) и интенсивности акустического излучения не ниже 160 дБ.
- н Для сушки белья в стиральных машинах кавитационное распыление применимо ограничено



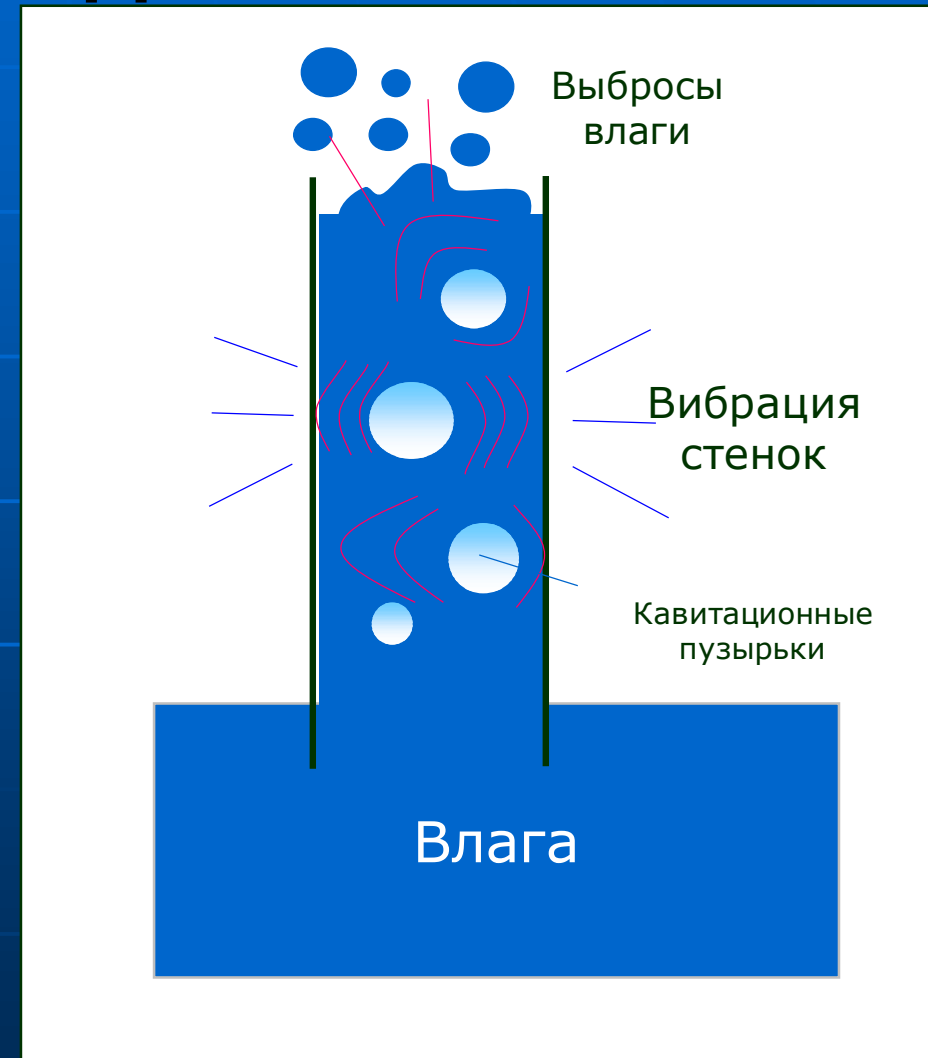
# Звукокапиллярный Эффект

- н Когда кавитационный пузырек развивается на входе в капилляр, ударная волна, возникающая при его захлопывании будет направлена внутрь капилляра.
- н Возникающее в капилляре избыточное давление выталкивает столб жидкости наружу. Это явление называется звукокапиллярным эффектом.
- н Звукокапиллярный эффект способствует ускоренному переносу влаги из глубинных слоев к поверхности, способствуя таким образом повышению скорости сушки.



# Пульсации И Взрывы Парогазовых Пузырьков В Капиллярах, Снижение Вязкости Жидкости

- п С развитием в жидкости кавитации, по мере дальнейшего увеличения интенсивности колебаний часть парогазовых пузырьков не успевает захлопнуться в фазе сжатия. В следующей за ней фазе разрежения такие пузырьки вновь увеличиваются в размерах и этот процесс повторяется продолжительное время. Такие пузырьки называют резонансными.
- п Пульсации резонансных пузырьков в капиллярах вызывают колебания стенок, что способствует ускорению процесса переноса влаги.
- п Взрывы пузырьков в капиллярах также способствуют ускорению процесса переноса влаги.
- п Кавитационные пузырьки в жидкости вызывают ее «разрыхление» и, как следствие, снижение вязкости, что тоже является фактором, ускоряющим массоперенос



# Действие Радиационного Давления



Объекты «витают» на излучателе за счет действия радиационного давления

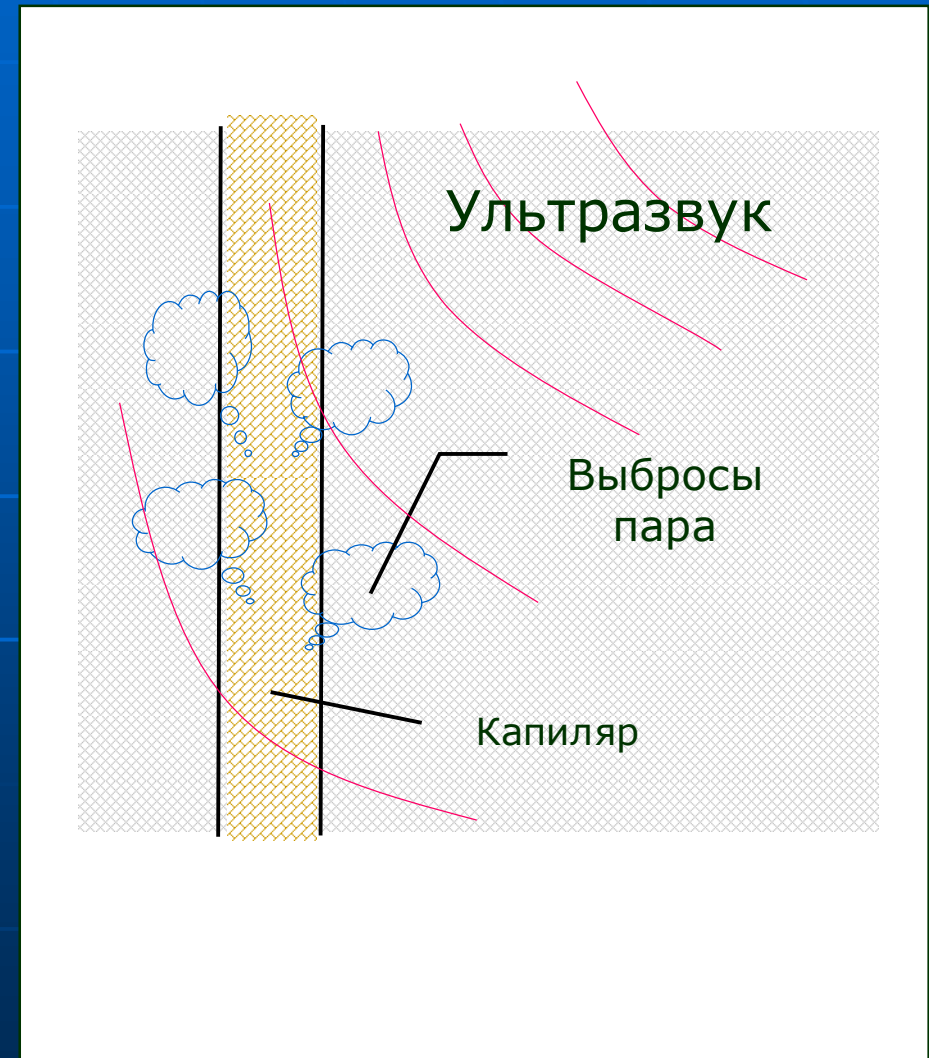
# Тепловое Действие

- n Поглощение ультразвуковых колебаний высушиваемым материалом вызывает его нагрев.
- n Нагрев материала, вызванный ультразвуковым излучением происходит практически равномерно по всей глубине что способствует ускоренному переносу влаги из глубинных слоев.
- n Тепловое действие ультразвука эффективно проявляется только при высоких интенсивностях (свыше 165 дБ) и только при сушке насыпных материалов.
- n При сушке белья тепловой эффект проявляется слабо и не является фактором, существенно влияющим на скорость сушки.



# Пульсация Пары В Освободившихся От Влага Капиллярах

- n По мере снижения влагосодержания часть капилляров становятся полностью освобожденными от влаги.
- n В местах освободившихся от влаги возникают паровые пробки, препятствующие переносу остатков влаги к поверхности.
- n Высокоинтенсивные колебания, проникая вглубь высыхающего материала вызывают пульсацию пара с ультразвуковой частотой.
- n Согласно гипотезе Симоняна такая пульсация пара способствует ускорению диффузии влаги и увеличению скорости сушки во втором периоде

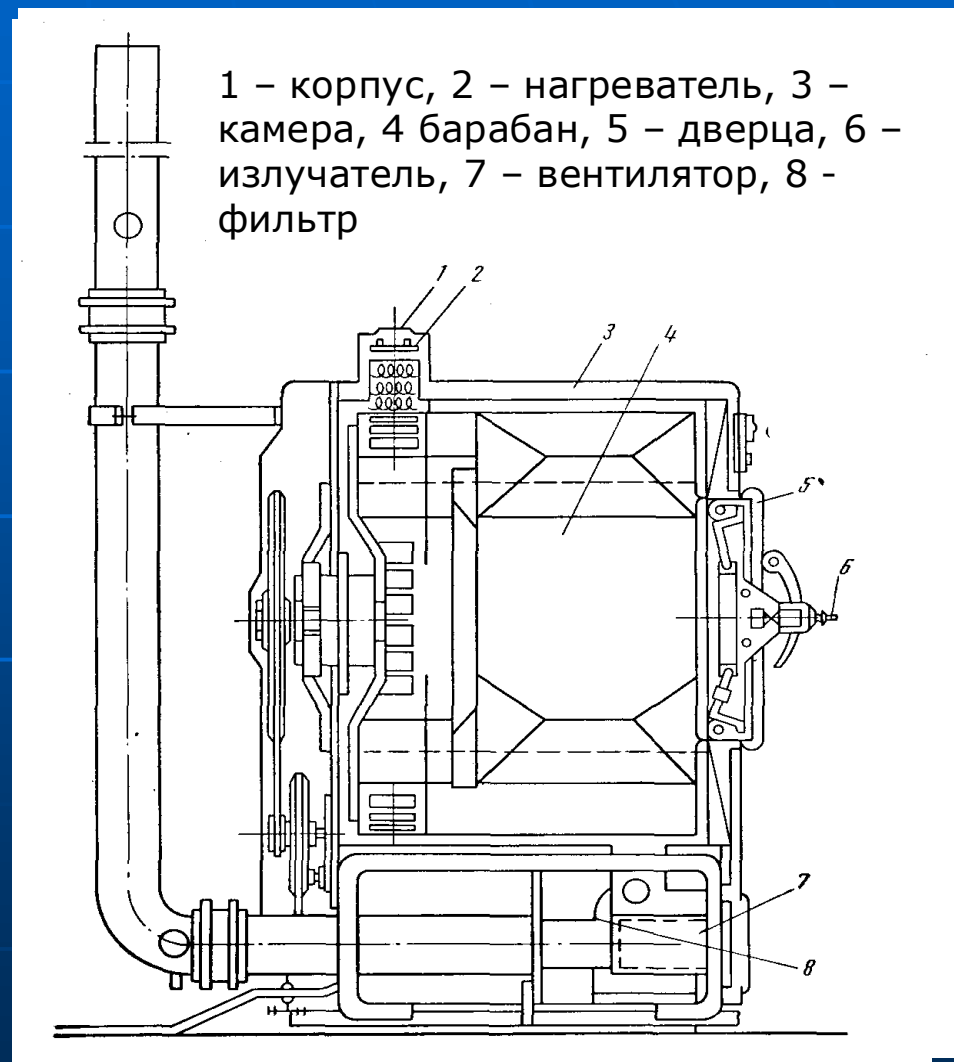


# Промышленное Применение Акустической Сушки

- n Низкотемпературная сушка биологически активных веществ
- n Сушка термочувствительного растительного сырья (зерно, грибы, лекарственные травы)
- n Сушка легкогорючих и взрывчатых веществ
- n Сушка древесины
- n Сушка термолабильных химических и лекарственных препаратов
- n Сушка тканей в текстильном производстве

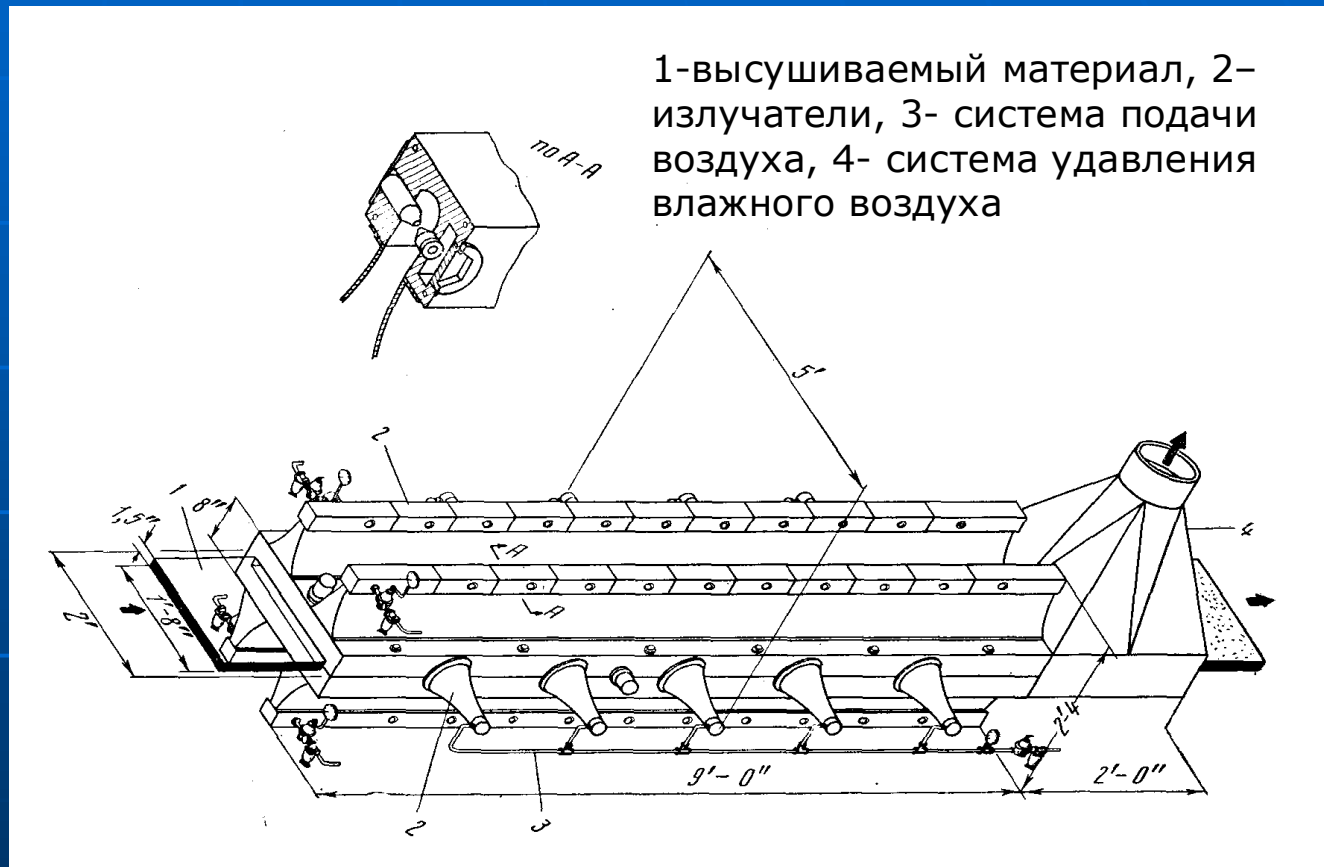
# Промышленные Акустические Барабанные Сушилки

- n Барабанные акустические сушилки используются при сушке сыпучих материалов.
- n Режим работы барабанных сушилок – периодический.
- n Высушиваемый материал закладывается в барабан сушилки, где подвергается акустическому воздействию (в том числе и совместно с тепловым).
- n Вращение барабана способствует равномерности воздействия колебаний на весь объем материала и удалению влаги.
- n Влага из барабанных сушилок удаляется вытяжным вентилятором
- n Акустическое излучение внутри барабанных сушилок создается, как правило газоструйными излучателями.



# Промышленные Акустические Туннельные Сушилки

- n В отличие от барабанных сушилок – туннельные сушилки являются аппаратами непрерывного действия.
- n Высушиваемый материал транспортером движется сквозь туннель, внутри которого создается интенсивное акустическое излучение.
- n Туннельные сушилки применяются для сушки сыпучих материалов, тканей, листовых материалов, древесины



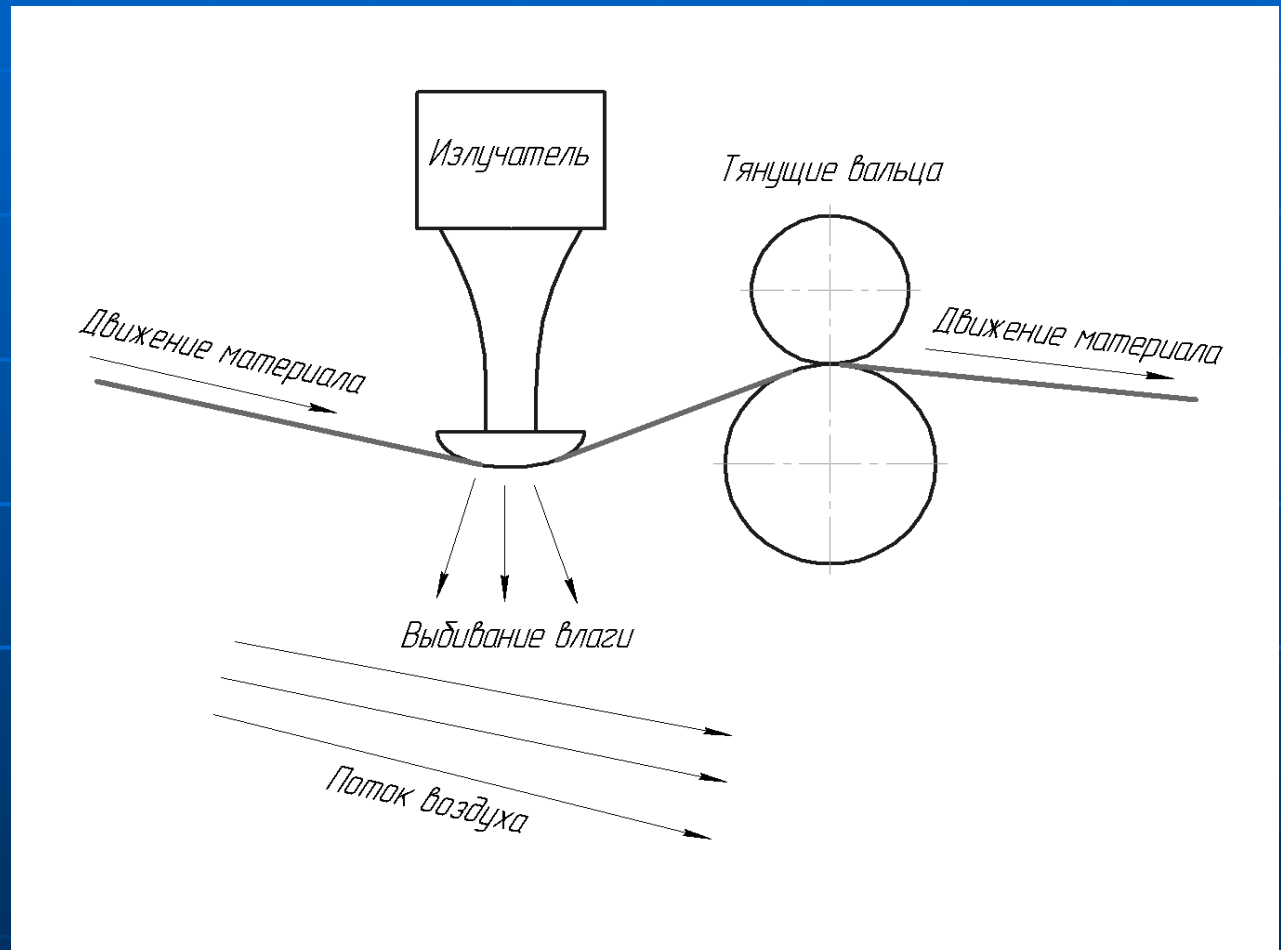
# Промышленные Акустические Эллипсоидные Сушилки (Проект)

- n Камера кольцевых акустических сушилок образована усеченным эллипсоидом вращения, причем ось вращения проходит через один из фокусов эллипса.
- n На оси вращения эллипсоида располагается акустический излучатель.
- n Высушиваемый материал располагается на линии, описываемой другим фокусом образующего эллипса.
- n Благодаря свойствам эллипса, собирающего излучение, испускаемой в одном из фокусов в другой фокус, практически все излучение достигает высушиваемого материала



# Контактные Акустические Сушилки

- n В контактных акустических сушилках ввод колебаний в высушиваемый материал осуществляется при непосредственном контакте с излучателем.
- n Контактные сушилки используются для сушки листовых и рулонных материалов (бумаги, картона, тканей), а также древесины.
- n Для контактных сушилок используются твердотельные акустические излучатели (пьезоэлектрические или магнитострикционные)



# Проблемы Акустической Сушки

- n Несмотря на очевидные преимущества метода акустической сушки его распространение сдерживалось рядом проблем технического характера:
  1. Низким к.п.д. существующих конструкций газоструйных излучателей
  2. Высокой стоимостью компрессоров для подачи сжатого воздуха
  3. Малым сроком службы газоструйного излучателя
  4. Необходимостью защиты персонала от акустического излучения
- n Известные конструкции акустических сушилок ориентированы сугубо на промышленное применение и для бытовых условий являются совершенно непригодными



# Газоструйные излучатели.

## Достоинства

## Недостатки

- + Хорошее согласование с воздухом
- + Малые габариты
- + Возможность изменения рабочей частоты излучения
- Большой расход сжатого воздуха
- Низкий КПД
- Износ механических узлов

# Действие Газоструйного Излучателя На Высушиваемый Материал



# Пьезоэлектрический Излучатель.

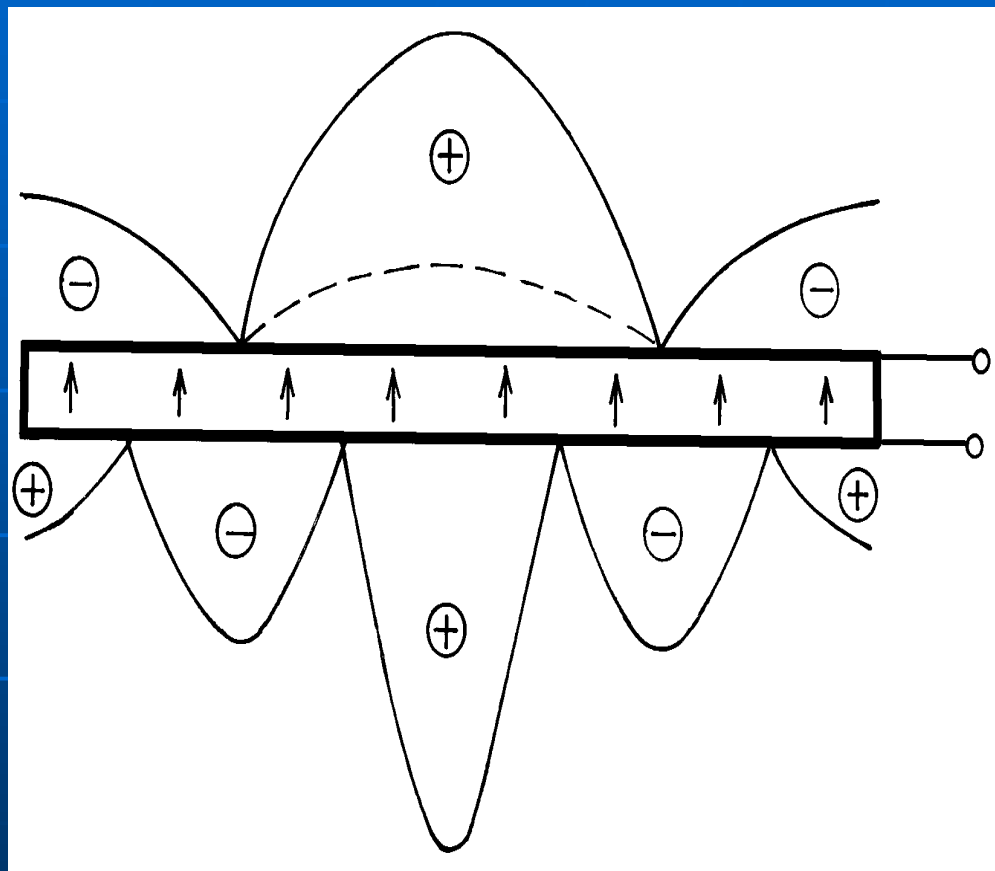
## Достоинства

- + КПД выше, чем у газоструйного излучателя
- + Простота изготовления электронного генератора при серийном производстве
- + Возможность формирования пучков и фокусировки

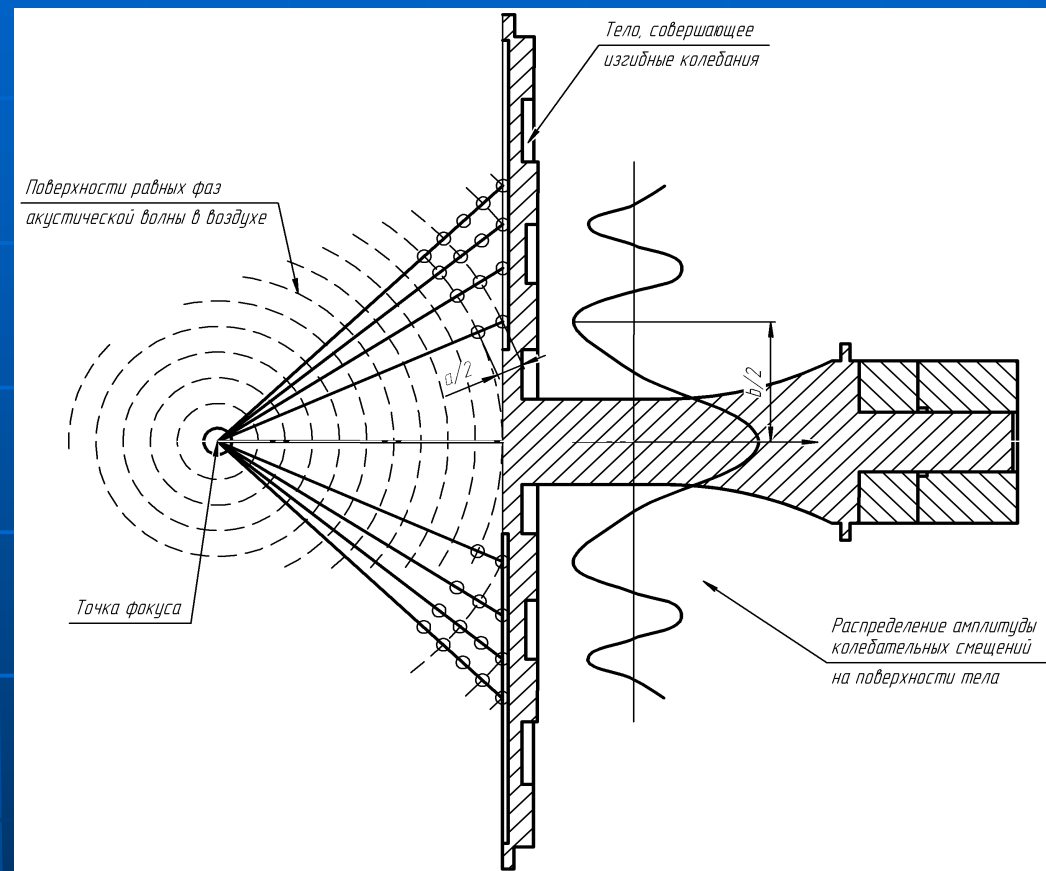
## Недостатки.

- Сложность изготовления ультразвуковой колебательной системы
- Сложность настройки и согласования электронного генератора
- Высокая добротность требует особых условий согласования с генератором
- Сложная электронно-механическая конструкция
- Необходимость использования электронного генератора питания

# Принцип Построения Пьезоэлектрического Излучателя



Патент РФ №2059239,  
Хмелев В.Н. и другие



Патент РФ №2141386,  
Хмелев В.Н. и другие

# Колебания Поверхности Излучателя При Перестройке Частоты



# Пьезоэлектрический Излучатель



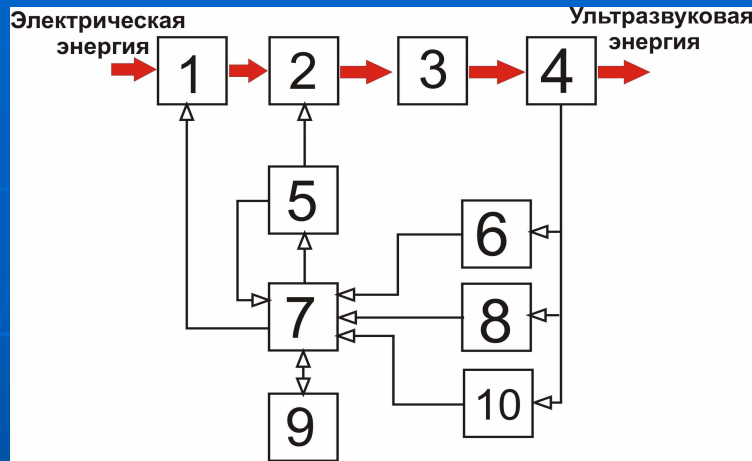
## Технические характеристики:

Диаметр излучающей поверхности, мм	200
Масса, кг	1,8
Частота, кГц	22±1,6
Материал:	
- излучателя	сталь 40X13
- концентратора	титан BT5
Интенсивность УЗ колебаний в фокусе, дБ	≤200
Фокусное расстояние, см	14..20
Длина преобразователя, см	≤ 15
Охлаждение	Воздушное, принудительное
Напряжение питания, В, не более	150

# Действие Пьезоэлектрического Излучателя На Высушиваемый Материал



# Электронный Генератор



1 – регулируемый источник постоянного напряжения, 2-транзисторный инвертор, 3-согласующая цепь, 4-ультразвуковая колебательная система, 5-генератор ультразвуковой частоты, 6,8,10-узлы выделения сигналов обратной связи, 7-устройство управления, 9-панель управления



## Технические характеристики:

Максимальная потребляемая мощность, Вт	630
Габариты, см	25x25x11
Масса, кг, не более	3
Рабочая частота, кГц	22±1,6
Напряжение питания, В	220 ±10%
Диапазон регулировки мощности, %	10..100

# Макетный Образец (на базе стиральной машины «Вятка»)



Внешний вид



Газоструйные  
излучатели

Пьезоэлектрический  
излучатель

# Методика Исследования

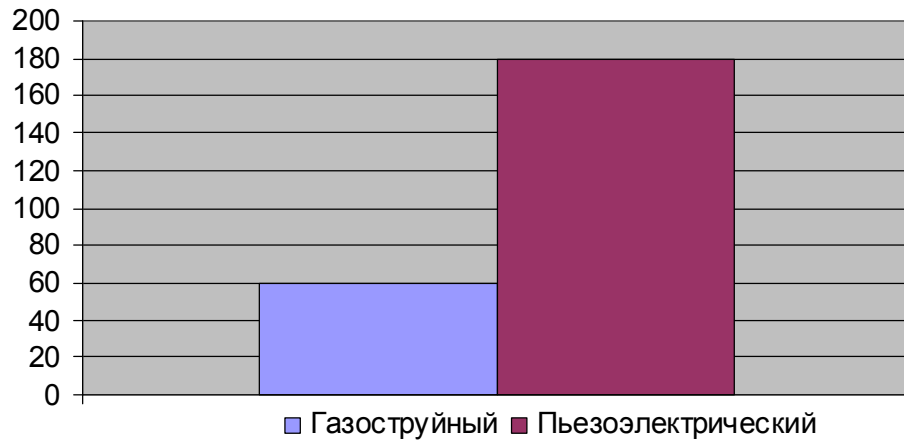
- п Сравнительное исследование газоструйных и пьезоэлектрических излучателей.
- п Исследование возможности стирки различных материалов.
- п Исследование звукоизоляции

Скорость сушки (г/мин) на единицу массы

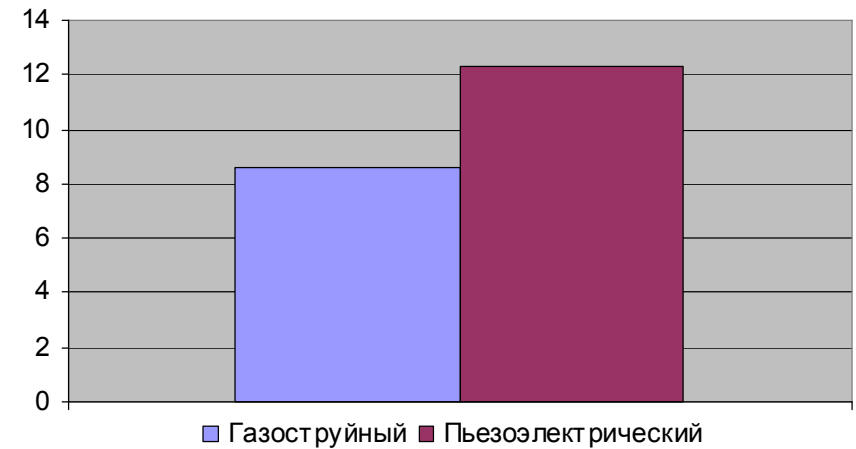
Материал	Газоструйный	Пьезоэлектрический
Полотенце махровое	5	13
Тонкая льняная ткань	5,1	11
Брюки (шерсть)	9,5	11
Футболка (х/б полотно)	4	8,7
Средняя скорость, г/мин	8,2 (7,7)	12,3 (11,6)

# Полученные Результаты

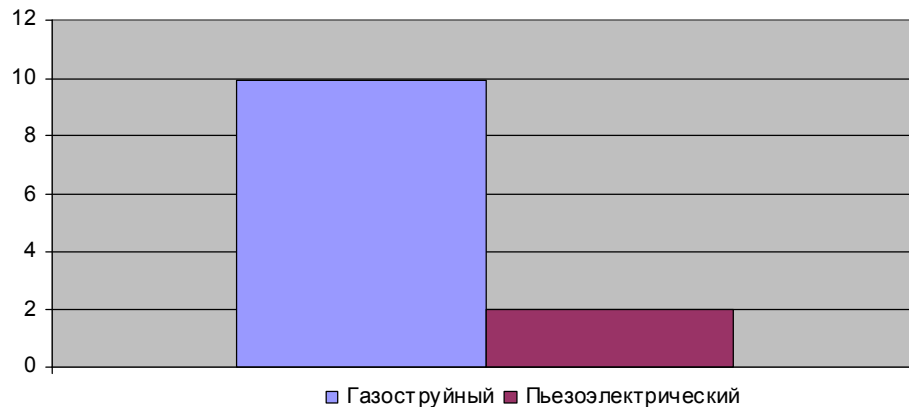
Мощность УЗ воздействия, Вт



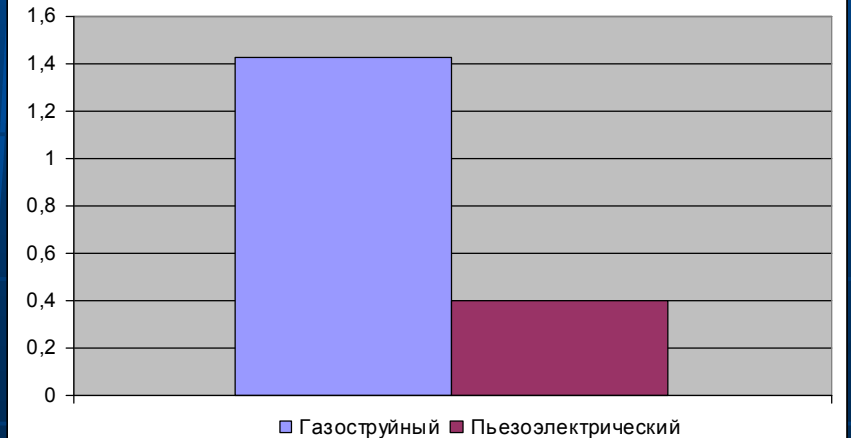
Скорость сушки, г/мин



Энергия затрачиваемая на удаления одного грамма воды, кДж



Потребляемая мощность, кВт



# Выбор Типа Излучателя

Характеристика	Газоструйный излучатель	Пьезоэлектрический излучатель
Энергопотребление	$\geq 1000$ Вт	$\leq 500$ Вт
КПД	$\leq 25\%$	$\leq 50\%$
Возможность реализации	Отсутствие компрессоров с большим расходом	Возможность изготовления электронного генератора
Стоимость узла акустической сушки	10..20\$ + стоимость компрессора	$\leq 100$ \$ при серийном производстве
Длительность работы	$\leq 100$ часов	$\geq 1000$ часов
Уровень шума	выше допустимого	в пределах допустимого

**Вывод:** максимальной эффективностью и приемлемыми параметрами обладает пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь

# Результаты Экспериментов На Макетном Образце («Вятка»)

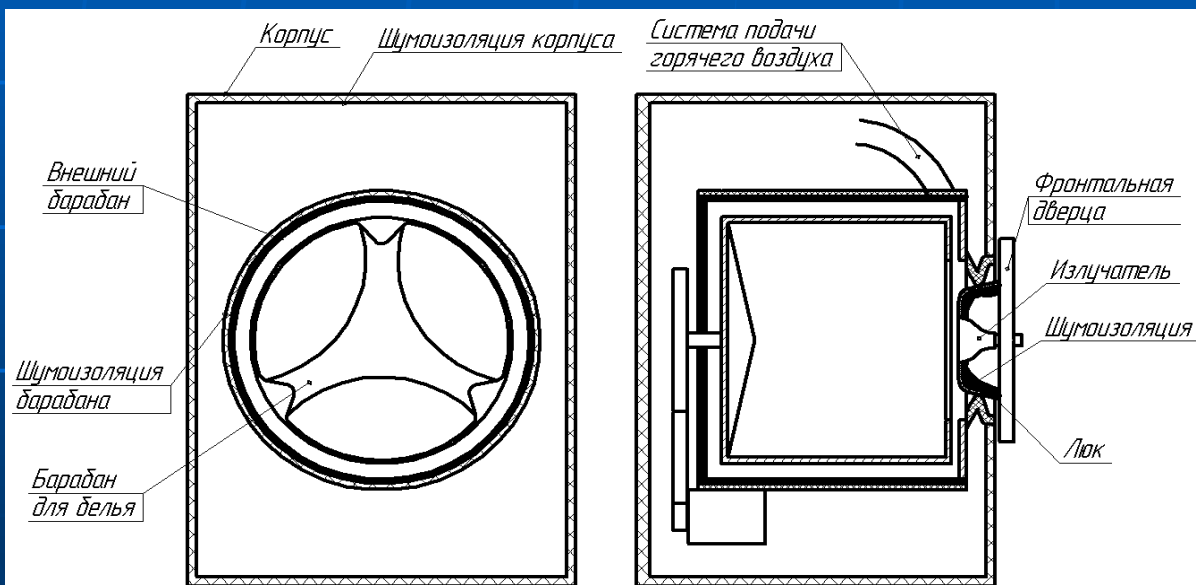
Выводы по результатам работы на образце:

1. Необходимость интеграции в состав стиральной машины с системой термической сушки
2. Необходимость создания узла акустической сушки
3. Необходимость исследования возможности звукоизоляции машины
4. Поиск режимов и условий оптимальной сушки
5. Перераспределение влаги между различными материалами требует работы с одинаковыми образцами.

# Макетный Образец (на базе стиральной машины LG-WD 14124 )

Устройство макета

Внешний вид



# Измеритель Звукового Давления

Стандартный шумомер



Разработанный шумомер



Недостатки:

Измеряемая интенсивность менее 130 дБ

Верхняя граница частоты менее 15 кГц

Одноканальный

Реализованные параметры:

Измеряемая интенсивность до 175 дБ

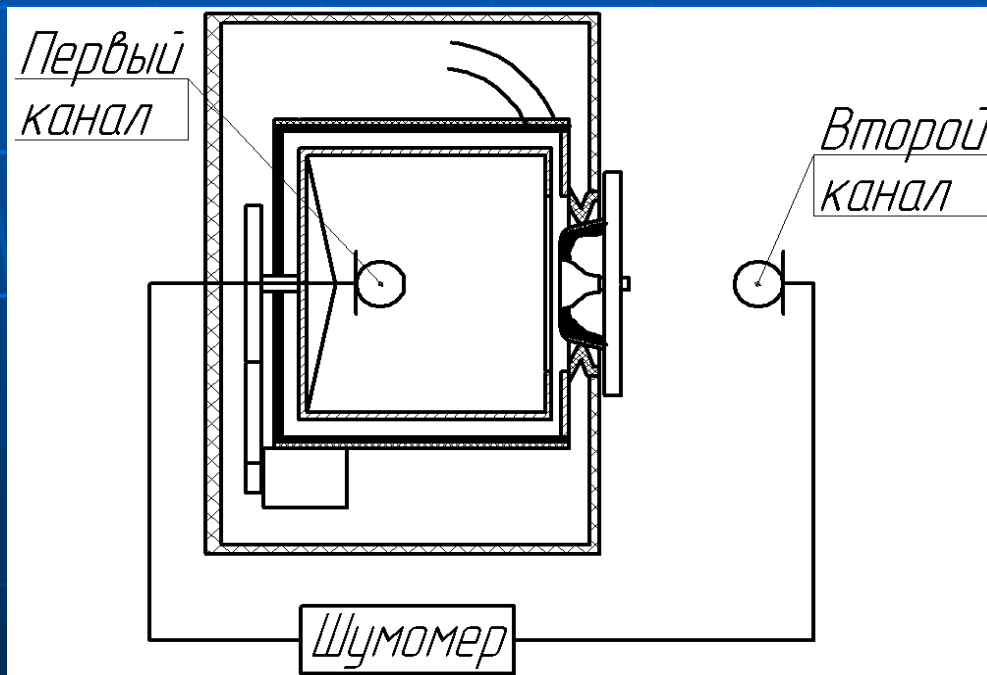
Верхняя граница частоты до 25 кГц

Два канала измерений (внутри и



# Исследование Звукоизоляции

Схема звукоизоляции и измерения звукового давления



Для снижения уровня шума была проведена звукоизоляция стиральной машины материалом типа SPLAN-8\*.

Измерения звукового давления были проведены стандартным и созданным шумомерами.

Полученные результаты:

1. Среднее давление внутри барабана: более 130 дБ.
2. Звуковое давление на расстоянии 1 метр от стиральной машины: менее 70 дБ.

\* - SPLAN-8 – торговая марка группы компаний «Стандартпласт», Россия, <http://en.stplus.ru/>

# Методика Экспериментальных Исследований (LG-WD 14124 )

1. Сушка образцов одного типа в различных условиях:

n без ультразвука - температура 120°C

n без ультразвука - температура 60°C

n с ультразвуком - без нагрева

n с ультразвуком - температура 120°C

n с ультразвуком - температура 60°C

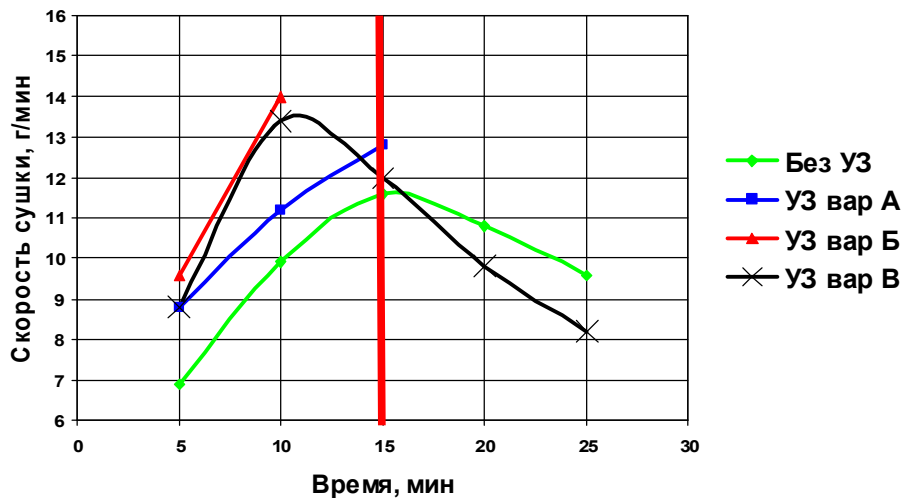
2. Измерение параметров влагосодержания через равные промежутки времени.

3. Обработка результатов.

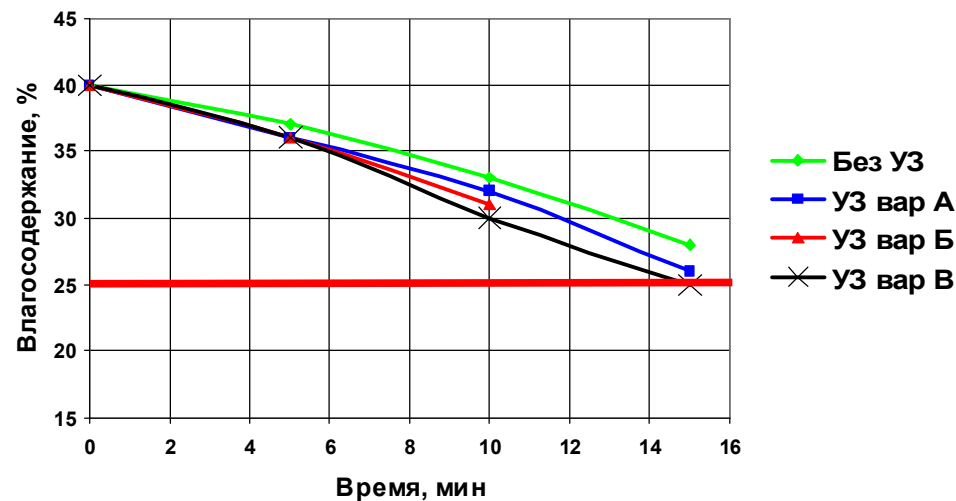
# Результаты Экспериментов

## (1 кг белья, предельная температура 120°C)

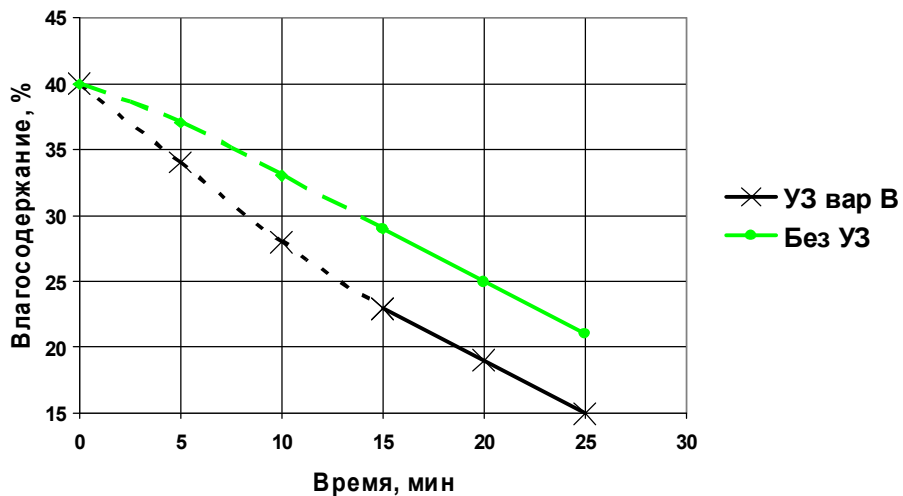
Скорость сушки



Динамика изменения влагосодержания



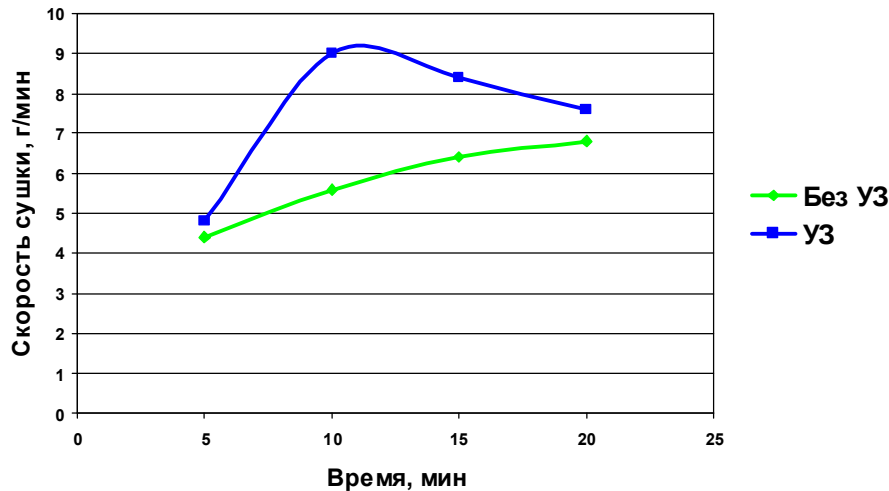
Динамика изменения влагосодержания



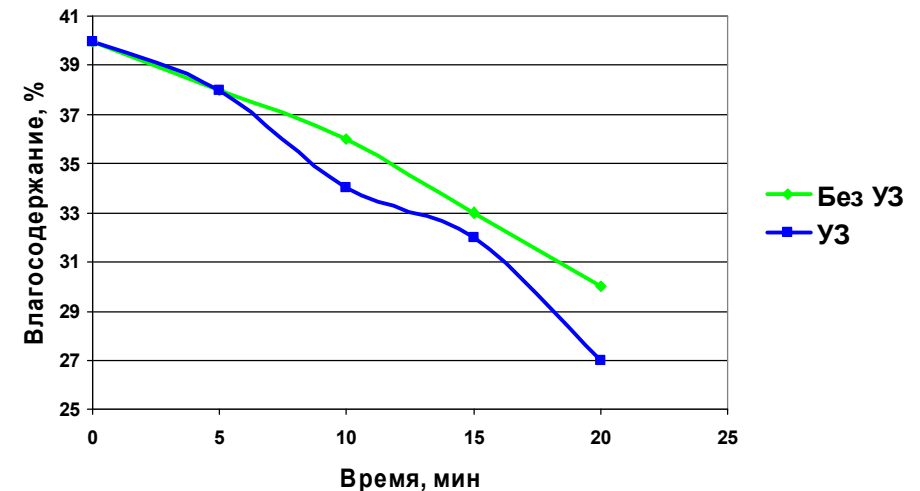
На графиках приняты следующие обозначения: «Без УЗ» - ультразвуковое воздействие отсутствует. «УЗ вар. А» - ультразвуковое воздействие излучателем №1 (стальной концентратор) при выходной мощности генератора 330Вт. «УЗ вар. Б» - ультразвуковое воздействие излучателем №1 (стальной концентратор) при выходной мощности генератора 500Вт. «УЗ вар. В» ультразвуковое воздействие излучателем №2 (титановый концентратор) при выходной мощности генератора 250-280Вт.

# Результаты Экспериментов (1 кг белья, температура сушки 60°C)

Динамика скорости сушки



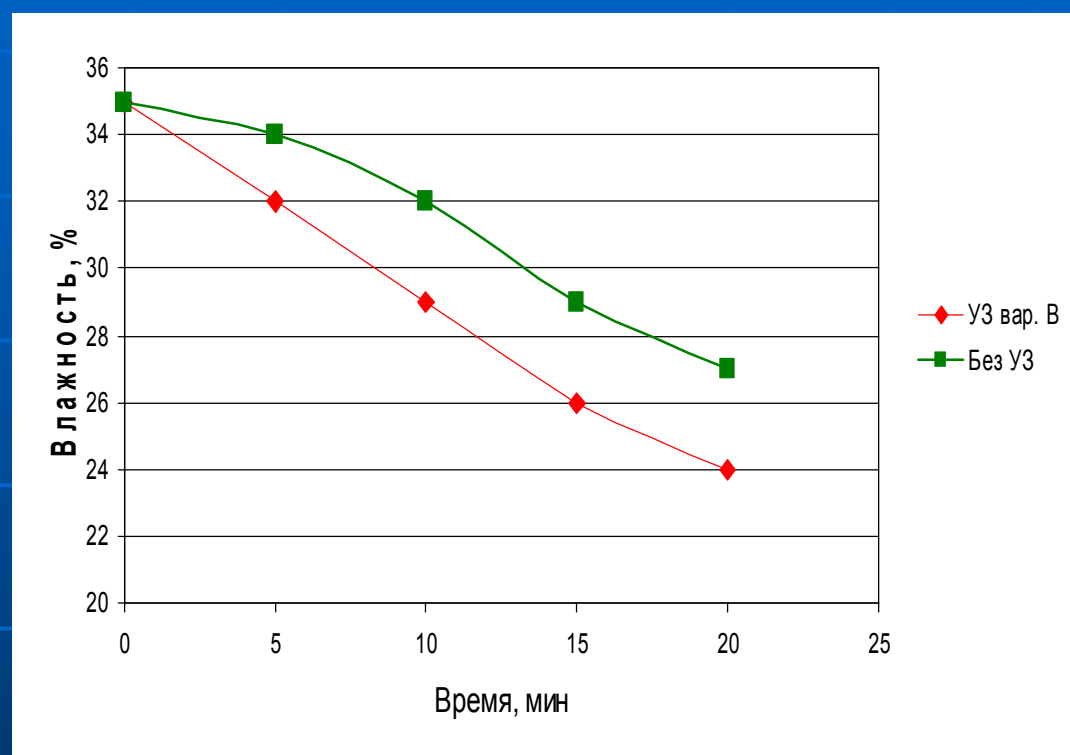
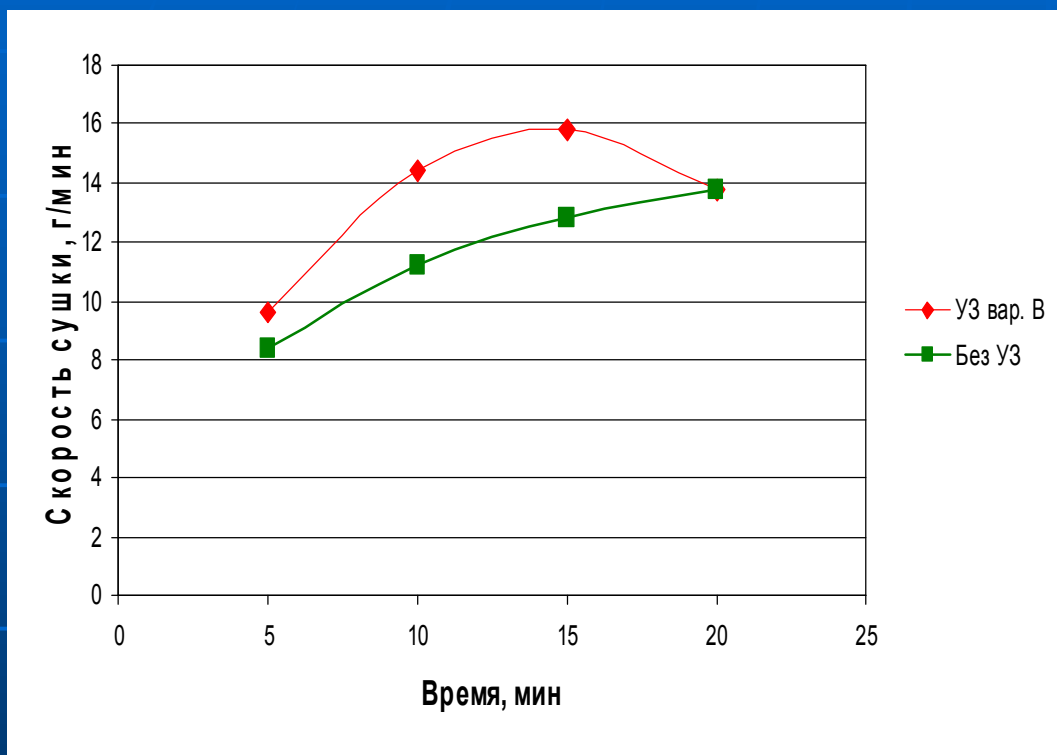
Динамика влагосодержания



Ввиду отсутствия требований к конечным параметрам высушиваемого белья, а также понимая, что существует оптимальная влажность для дальнейшей обработки белья (глажение), учитывая, что равновесная влажность белья может варьироваться от 6% до 20% в зависимости от типа материала и параметров окружающей среды, **ОПТИМАЛЬНЫМ** после сушки белья считается влажность 25%.

# Результаты Экспериментов

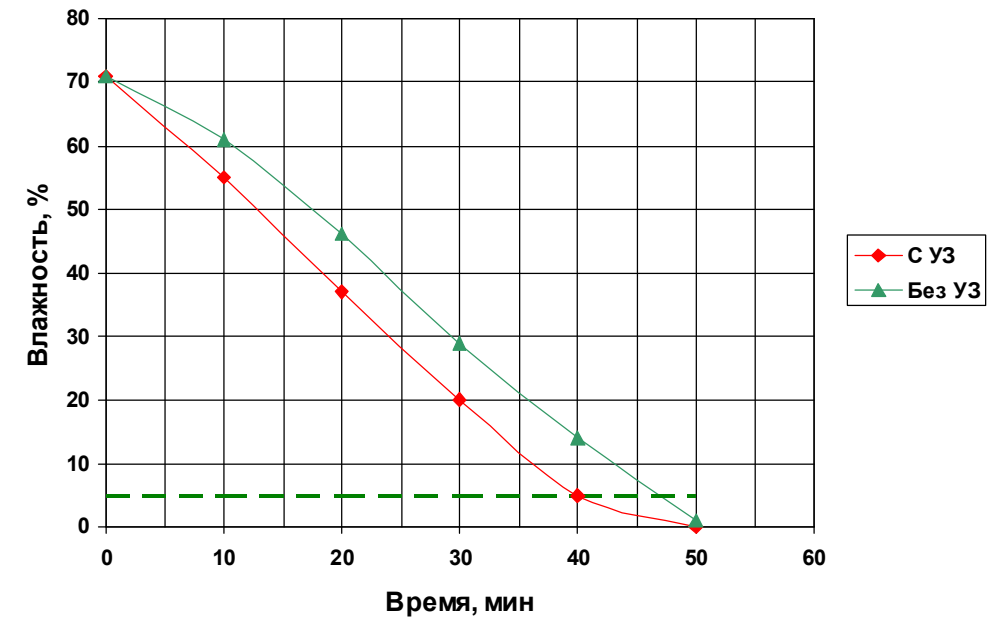
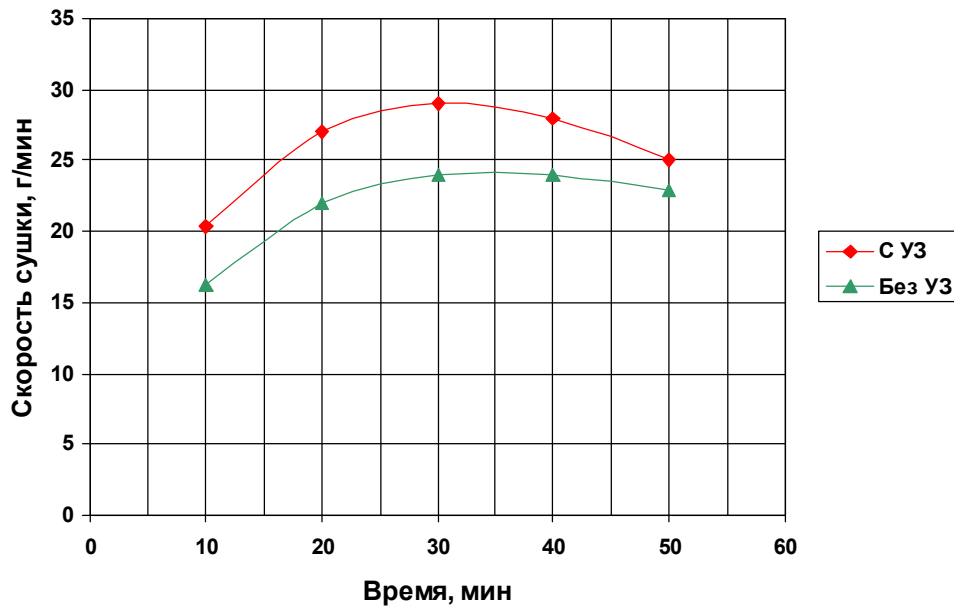
(2,6 кг белья, предельная температура 120°C)



Ввиду отсутствия требований к конечным параметрам высушиваемого белья, а также понимая, что существует оптимальная влажность для дальнейшей обработки белья (глажение), учитывая, что равновесная влажность белья может варьироваться от 6% до 20% в зависимости от типа материала и параметров окружающей среды, **оптимальным после сушки белья считается влажность 25%.**

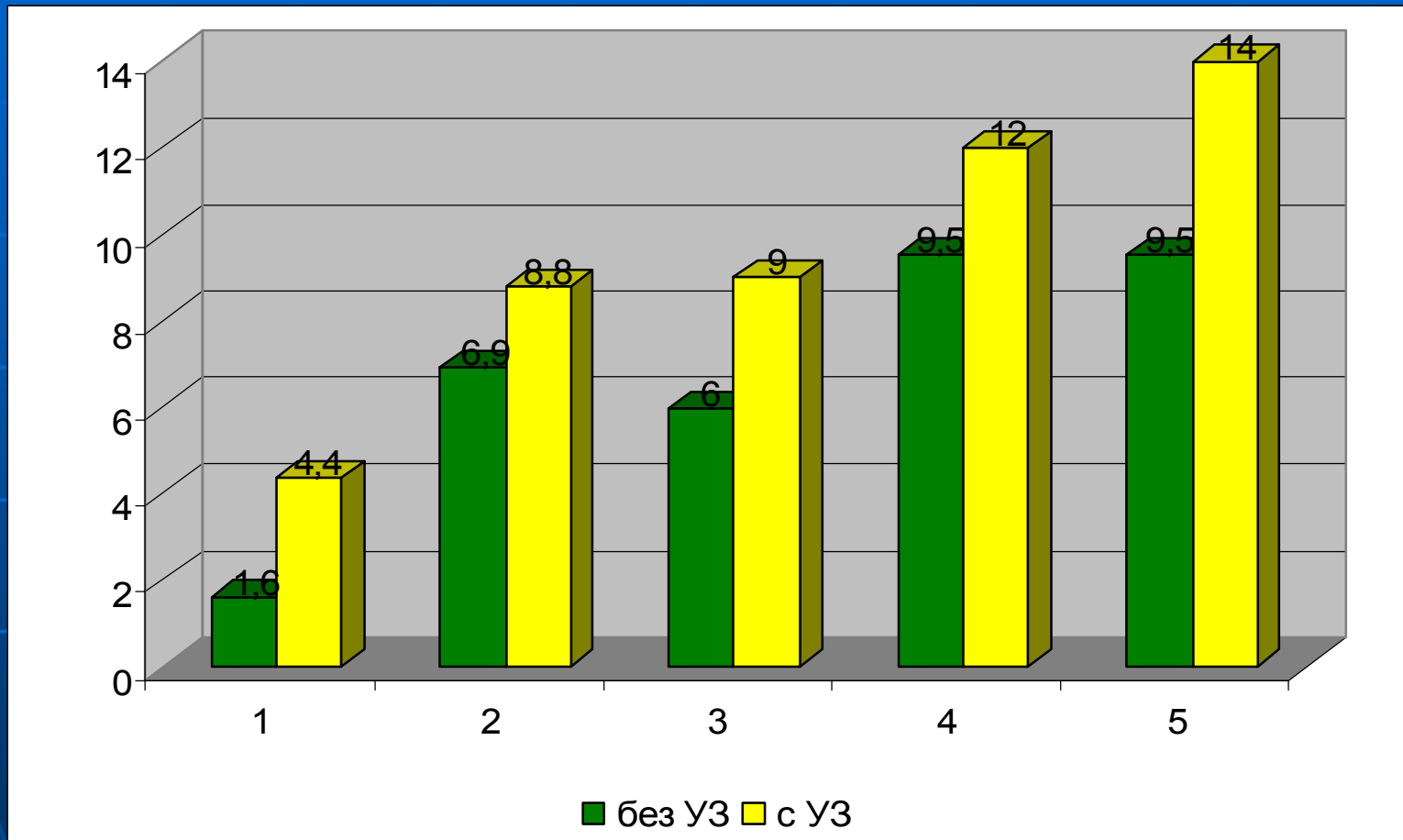
# Результаты Экспериментов

(удаление 1 кг влаги, начальная влажность 70%, температура 120 °С)



Воздействие	Максимальная скорость сушки, г/мин	Средняя скорость сушки, г/мин	Время сушки, мин
Конвективно-тепловое	<b>24</b>	<b>21,3</b>	<b>47</b>
Конвективно-тепловое + ультразвук	<b>29</b>	<b>25,6</b>	<b>39</b>

# Выбор Оптимальных Режимов И Условий Сушки



1 - Холодный воздух, 2- Горячий воздух во время прогрева,  
3 -Теплый воздух (температура 60°C), 4 - Горячий воздух на  
прогретой машине (120°C), 5- Горячий воздух при повышенной  
мощности УЗ на прогретой машине (120°C)

# Результаты Анализа Экспериментальных Данных

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;
4. Максимальная скорость сушки составила 14 г/мин 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).

# Заключение

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