

# Исследование Изменений Электрических Параметров Ультразвуковых Колебательных Систем в Процессе УЗ Воздействия на Жидкие и Жидкодисперсные Среды

Геннадий В. Леонов, Владимир Н. Хмелев, Роман В. Барсуков, Сергей Н. Цыганок, Максим В. Хмелев.  
Бийский технологический институт  
Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

**Аннотация**— Статья посвящена исследованию изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды. Описана методика проведения исследований. Представлены результаты практических исследований при обработке различных технологических сред с использованием ультразвуковых колебательных систем с различной излучающей поверхностью.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЗ технологий сегодня не вызывает сомнений. Они позволяют решить множество проблем связанных со сверлением хрупких материалов, сваркой полимеров, мелкодисперсным распылением. Особенно широкое распространения получили УЗ технологии для интенсификации процессов в жидких и жидкодисперсных средах (эмульгирование, диспергирование, дегазация, экстрагирование, пропитка т.п.).

Все ультразвуковые технологические процессы, проходящие в жидких средах, основаны на создании кавитации в технологической среде, точнее режима «развитой кавитации».

Технологические процессы в различных средах реализуются при помощи УЗ аппаратов, состоящих из электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). Максимальная эффективность протекания процесса обеспечивается при оптимальном согласовании электронного генератора и УЗКС и соответствия рабочей частоты генератора резонансной частоте УЗКС.

Различные технологические среды по разному влияют на параметры электронного генератора и УЗКС [1]. Степень влияния технологических сред определяется вязкостью жидкой среды, количеством твердого вещества, затуханием ультразвуковых колебаний. Кроме того, изменение параметров УЗКС происходит при реализации ультразвукового воздействия (например, переход от масла

или воды в процессе эмульгирование, набухание веществ при экстрагировании и т.п.).

Известно также, что свойства обрабатываемых технологических сред изменяются при увеличении амплитуды колебаний, что обусловлено возникновением и развитием кавитационных процессов (образование облака парогазовых пузырьков на излучающей поверхности).

Все возможные изменения свойств обрабатываемых технологических сред обуславливают изменение собственной резонансной частоты и добротности УЗКС, приводя к ее рассогласованию с электронным генератором по частоте и напряжению. При этом существенно уменьшается амплитуда колебаний ультразвуковой колебательной системы и снижается эффективность реализации процессов вплоть до нуля, при не достижении кавитирующего процесса.

Таким образом, при реализации технологических процессов в различных средах, возникает необходимость в непрерывном контроле свойств обрабатываемых сред и непрерывной перестройке генератора, в соответствии со всеми возможными изменениями параметров технологических сред, только в этом случае обеспечивается ультразвуковое воздействие с максимальной эффективностью.

В связи с этим возникла необходимость в проведении экспериментальных исследований по выявлению степени влияния различных технологических сред на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем.

Проведению экспериментальных исследований, анализу полученных результатов и выработки требований к параметрам и режимам перестройки электронных генераторов посвящена представленная работа.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБОРУДОВАНИЕ

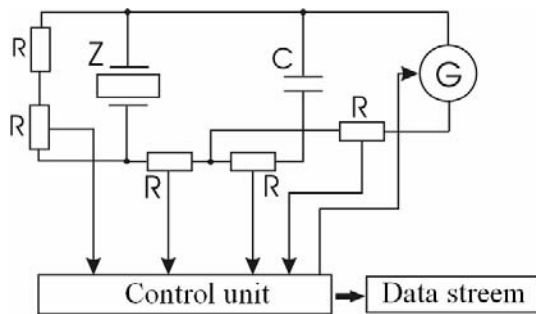
При УЗ воздействии на различные жидкие и жидкодисперсные среды происходит изменение электрических параметров УЗКС. Диапазоны изменения электрических параметров УЗКС зависит от величины

акустической нагрузки, режимов УЗ воздействия. Для практического измерения и исследования электрических параметров колебательных систем предложен и разработан специализированный измерительный стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 1.а.

В качестве источника питания УЗКС использовался генератор электронных колебаний УЗ частоты, мощностью 400 Вт. Были использованы УЗКС с рабочими инструментами двух типов: цилиндрические с различной площадью излучающей поверхности и грибовидные. Для проведения практических исследований были использованы следующие технологические среды:

- водная среда;
- водная среда под давлением 7 атм.;
- воздушная среда;
- растворитель;
- машинное масло.

Выбор материалов позволил перекрыть широкий диапазон известных жидких сред с различной



R – резистивные датчики для снятия токов и напряжений;

Z – импеданс УЗКС;

C – дополнительная емкость;

G – перестраиваемый генератор.

Рисунок 1 – Структурная схема для измерения электрических параметров УЗКС

кавитационной прочностью.

Специализированный измерительный стенд, блок схема которого представлена на рисунке 1, состоит из устройства управления, резистивных датчиков, ультразвуковой колебательной системы с пьезоэлектрическим преобразователем и ультразвукового электронного генератора. При работе измерительного стенда осуществляется:

- сбор текущих значений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов (электрическое напряжение на пьезоэлектрических элементах ультразвуковой колебательной системы, ток, потребляемый колебательной системой от электронного генератора, ток, протекающий по дополнительной емкости C, частота питающего УЗКС электрического напряжения, значение

фазовых сдвигов между контролируемыми токами и напряжениями);

- перестройку частоты электронного генератора в диапазоне от 15 кГц до 25 кГц для снятия частотных характеристик контролируемых электрических параметров колебательных систем, резонансные частоты которых лежат в пределах этого диапазона ;

- управление мощностью электронного генератора для получения зависимостей параметров ультразвуковых колебательных систем от параметров технологических сред в различных режимах (работа в докавитационном режиме, на пороге зарождения кавитации, в режиме развитой кавитации);

- формирование потока полученных данных для его последующей обработки, вычисления новых параметров и характеристик, анализа и визуализации на ЭВМ.

Для проведения экспериментов, ультразвуковой электронный генератор оснащался электрическими датчиками для измерения электрических параметров колебательных систем и электронных генераторов (электрического напряжения на пьезоэлектрических элементах ультразвуковой колебательной системы, тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора, тока, протекающего по дополнительной емкости C, как показано на рисунке 1), электрические сигналы с которых поступают на устройство управления.

### III. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования были проведены в два этапа.

Первый этап заключался в получении амплитудно-частотных характеристик электрических параметров ультразвуковой колебательной системы [2,3] путем прямых измерений (при помощи аналого-цифровых преобразователей, входящих в состав устройства управления) при различных частотах напряжения питания колебательной системы, накоплении измерительной информации в устройстве управления (смотри рисунок 1) и ее последующей передачи в виде последовательного потока цифровых данных на ЭВМ.

Получение амплитудно-частотных зависимостей электрических параметров колебательной системы осуществляется путем плавной перестройки частоты электронного генератора в заданном частотном диапазоне с непрерывным измерением электрических параметров колебательной системы. При ширине частотного диапазона перестройки электронного генератора 10 кГц, время его сканирования составляло 5 сек.

Амплитудно-частотные характеристики электрических параметров УЗКС измерялись при разных напряжениях питания ультразвуковой колебательной системы. Это позволило для каждого отдельного эксперимента (УЗ обработка конкретной технологической сред с использованием определенного типа рабочего окончатания) получить 250 зависимостей, соответствующих разным напряжениям питания колебательной системы.

В ходе проведения измерений обеспечивалось накопление и передача измерительной информации по последовательному каналу (RS-232) ЭВМ для ее дальнейшей обработки.

Второй этап заключался в обработке накопленных данных, а именно визуализации первичных данных (амплитудно-частотных характеристик), обработке первичных данных, получении новых зависимостей для и их визуализации и анализа. Результатом обработки накопленных данных являются графические зависимости измеряемых параметров и их численные значения.

#### IV. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований (АЧХ тока механической ветви колебательной системы (б); АЧХ тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора (а); АЧХ электрического

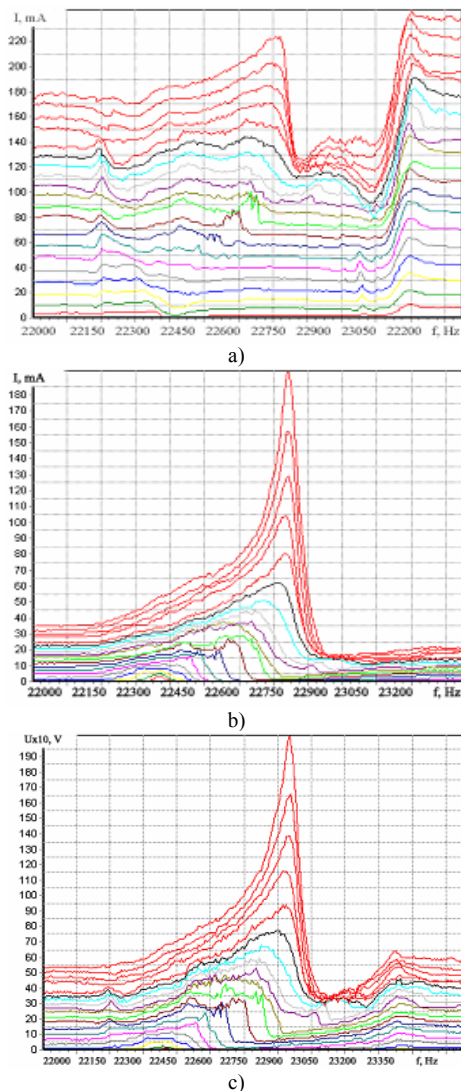


Рисунок 2 - Частотные характеристики электрических параметров ультразвуковой колебательной системы.

напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы (в) для различных напряжений питания колебательной системы).

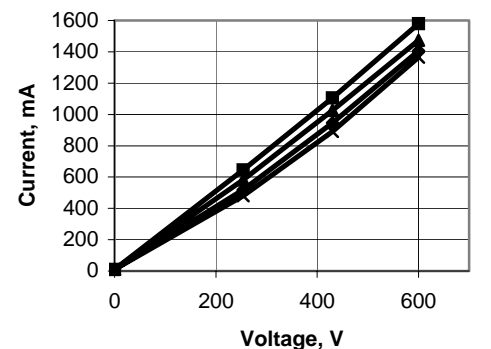
Зависимость тока механической ветви колебательной системы от частоты электронного генератора получена путем вычитания емкостного тока, протекающего по электрической емкости  $C$  (смотри рисунок 1) из тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора (емкость  $C$  при проведении экспериментов выбирается равной электрической емкости пьезокерамических элементов ультразвуковой колебательной системы).

Из рисунка 2.а следует, что частотная характеристика тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора, не отражает резонансных свойств колебательной системы, в то время как характеристики тока механической ветви (рисунок 2.б) и напряжения на пьезокерамических элементах колебательной системы (рисунок 2.в) явно отражают резонансный характер работы ультразвуковой колебательной системы. В связи с этим был проведен анализ только частотных характеристик тока механической ветви колебательной системы.

Анализ характера зависимостей, полученных для различных технологических сред при использовании разных рабочих окончаний позволил установить, что при увеличении напряжения на пьезокерамических элементах колебательной системы увеличивается не только амплитуда механических колебаний на резонансной частоте, но и происходит так же смещение резонансной частоты. Траектория движения точки, соответствующей резонансной частоте колебательной системы по координатной плоскости при увеличении напряжения на пьезокерамических элементах индивидуальна для каждой среды и определяется ее свойствами.

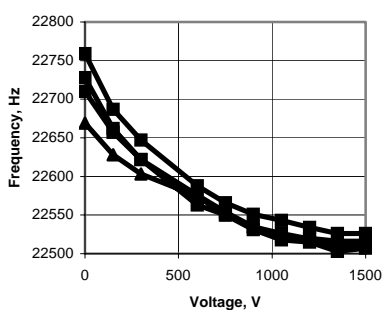
Далее представлены результаты обработки и анализа полученных экспериментальных зависимостей (АЧХ) для различных технологических сред (воздушная среда, ацетон, машинное масло, вода при нормальных условиях и избыточном давлении) при использовании цилиндрических рабочих инструментов с различной площадью излучающей поверхности и грибовидных рабочих инструментов с развитой излучающей поверхностью.

На рисунке 3 представлены зависимости тока механической ветви и резонансной частоты колебательной системы от напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы при использовании цилиндрического инструмента и осуществлении ультразвукового излучения в различные технологические среды.



◆ water ■ air ▲ solvent × engin oil

a)



◆ water ■ air ▲ solvent ■ engin oil

b)

Рисунок 3 - Зависимости тока механической ветви и резонансной частоты колебательной системы от напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы при использовании цилиндрических инструментов.

Из полученных зависимостей следует (рисунок 3.а), что ток механической ветви ультразвуковой колебательной системы практически линейно зависит от напряжения на ее пьезокерамических элементах. Различный угол наклона кривых обусловлен тем, что обрабатываемые среды имеют различный импеданс. Большая амплитуда механических колебаний (амплитуда тока механической ветви) достигается в воздушной среде (самый малый импеданс), затем в ацетоне, затем в воде и в масле (самый большой импеданс) при прочих равных условиях (одинаковом напряжении на пьезокерамических элементах).

Небольшая разница в амплитудах тока механической ветви при обработке различных технологических сред с использованием цилиндрических рабочих инструментов связана с тем, площадь излучения имеет относительно малое значение, равное  $1.7 \text{ см}^2$ . Очевидно, что чем меньше площадь акустического контакта с обрабатываемой средой, тем меньше ее влияние на механические и электрические параметры

колебательных систем. Тем не менее, видно, что различные технологические среды при использовании цилиндрических рабочих инструментов, оказывают влияние на величину тока механической ветви.

Кривые, представленные на рисунке 3.б, иллюстрируют изменение резонансной частоты по мере увеличения тока механической ветви (колебательной скорости) колебательной системы.

Как было сказано выше, в связи с малой площадью акустического контакта колебательной системы с обрабатываемыми средами, импеданс колебательной системы при обработке различных технологических сред меняется не существенно. Именно по этой причине во всех технологических средах изменение резонансной частоты колебательной системы происходит практически в одинаковых пределах и изменяется по одному и тому же закону.

Работа генератора в случае использования рабочих окончаний с малой площадью излучений, при обработке рассмотренных выше технологических сред, должна обеспечивать перестройку частоты в пределах не менее  $0.2 \text{ кГц}$ .

Аналогичные кривые, были получены для рабочих инструментов с увеличенной поверхностью излучения, т.е. рабочих инструментов, близких к цилиндрическим, но имеющих скошенную под углом  $30^\circ$  торцевую излучающую поверхность. Однако зависимости, характеризующие изменение амплитуды тока механической ветви незначительно отличаются от аналогичных зависимостей полученных для цилиндрического окончания. Это обусловлено тем, что площадь излучения усеченного под углом  $30^\circ$  цилиндра, всего в 1.3 раза больше площади основания цилиндрического окончания, что так же не существенно влияет на величину тока механической ветви.

Для срезанного рабочего инструмента резонансная частота выросла, что связано с меньшей массой присоединяемого инструмента в виде усеченного цилиндра, в то время как диапазон изменения резонансной частоты не изменился. Работа генератора в случае использования рабочих окончаний в виде цилиндра со скошенной поверхностью, при обработке рассмотренных выше технологических сред, как и для случая с цилиндрическим рабочим инструментом, должна обеспечивать перестройку частоты в пределах не менее  $0.2 \text{ кГц}$ .

Наиболее эффективным способом увеличения вводимой в жидкие технологические среды ультразвуковой энергии является увеличение площади излучения при помощи грибовидных рабочих инструментов, совершающих поршневые колебания.

На рисунке 4 представлены зависимости резонансной частоты колебательной системы с грибовидным рабочим инструментом при излучении в воздушную среду, в воду при нормальных условиях, водную среду под статическим давлением  $7 \text{ атм.}$ , ацетон и машинное масло.

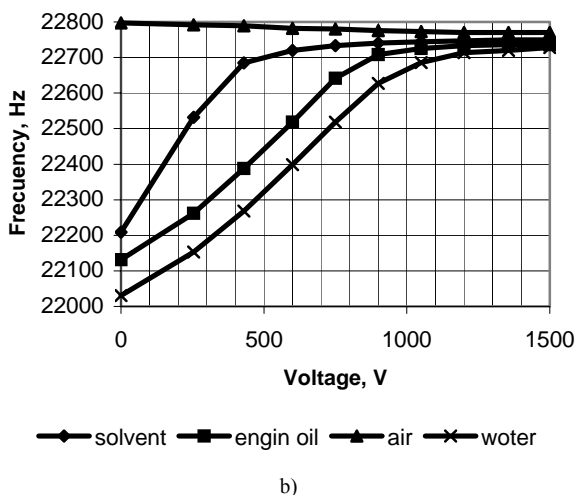
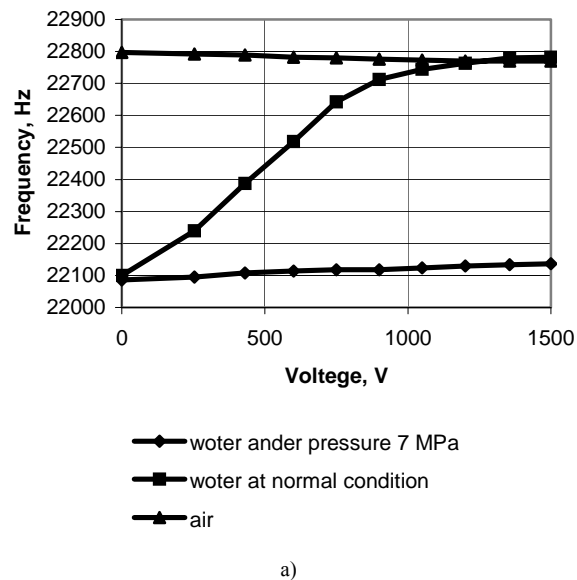


Рисунок 4 - Зависимость резонансной частоты УЗКС с грибовидным рабочим окончанием от напряжения ее питания.

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о следующих процессах.

1. Изменение (незначительное уменьшение) резонансной частоты в воздушной среде при использовании грибовидных рабочих инструментов так же имеет место, как и при использовании цилиндрических рабочих инструментов. Изменение резонансной частоты при работе колебательной системы в воздушной среде лежит в диапазоне 22790 Гц – 22825 Гц.

2. При введении ультразвуковых колебаний в водную среду, при нормальных условиях наблюдается резкое увеличение резонансной частоты, диапазон изменения которой лежит в пределах от 22100 Гц до 22800 Гц. При использовании инструментов с грибовидным рабочим окончанием диаметром 25 мм, окружающая его водная среда представляет для

ультразвуковой колебательной системы достаточно большую присоединенную массу, что снижает резонансную частоту колебательной системы до значения 22100 Гц. По мере увеличения амплитуды колебаний (при увеличении напряжения на пьезокерамических элементах колебательной системы) в воде начинает возникать кавитация, что связано, прежде всего, с появлением кавитационных пузырьков, которые разрыхляют водную среду в непосредственной близости рабочего инструмента, изменяя тем самым свойства жидкой среды. При напряжении 800 В резонансная частота колебательной системы достигает своего максимального значения 22800 Гц и соответствует резонансной частоте колебательной системы в воздушной среде. При дальнейшем увеличении напряжения резонансная частота колебательной системы остается постоянной. Это свидетельствует о том, что при напряжении 800 В, в обрабатываемой водной среде устанавливается режим развитой кавитации, который характеризуется устойчивым кавитационным облаком в области излучателя.

3. Наличие статического давления в водной среде сдвигает порог возникновения кавитации в область больших амплитуд механических колебаний. Отсутствие кавитации при обработке воды под статическим давлением 7 атм. свидетельствует о том, что жидкость, находящаяся в непосредственной близости от излучающей поверхности не меняет своих физических свойств и соответственно величина эквивалентной присоединенной массы не меняет своего значения. Это подтверждается постоянством резонансной частоты колебательной системы при увеличении напряжения на ее пьезокерамических элементах. Следует отметить, что резонансные частоты при обработке водных сред при нормальном и избыточном давлениях на малых напряжениях питания (при отсутствии кавитации в обоих случаях) равны друг другу.

Исследованные технологические среды представляют собой крайние случаи (воздух, вода - жидкость, обладающая максимальным кавитирующим эффектом, вода под давлением, исключая зарождение кавитации).

Рассмотренные зависимости могут быть дополнены данными, полученными на других средах и при аналогичных условиях ультразвукового воздействия, представленные на рисунке рисунок 4.б.

Из зависимостей, представленных на рисунке 4.б следует, что при излучении в ацетон кавитация начинает развиваться при меньших, чем для воды и масла, питающих напряжениях, не превышающих 550-600 В.

Кроме того, подобные измерения были проведены при излучении в водную среду с использованием грибовидных рабочих инструментов диаметром 30мм, 35мм и 40мм. Измерения показали, что с увеличением диаметра рабочего инструмента (30мм, 35мм, 40мм) диапазоны изменения резонансной частоты колебательной системы по мере развития в среде развитой кавитации составили 1700 Гц, 2300 Гц и 3072 Гц соответственно.

На рисунке 5.а представлены зависимости амплитуды тока на резонансе в механической ветви УЗКС

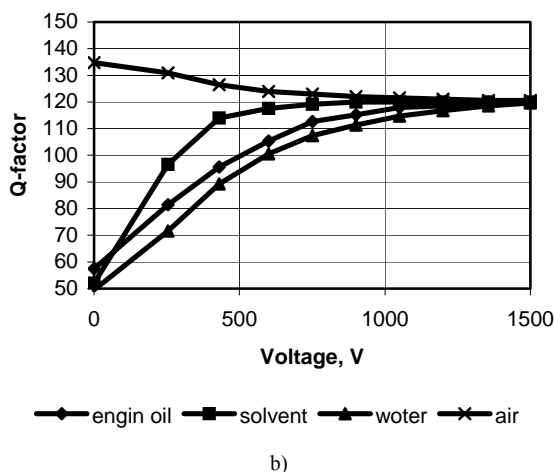
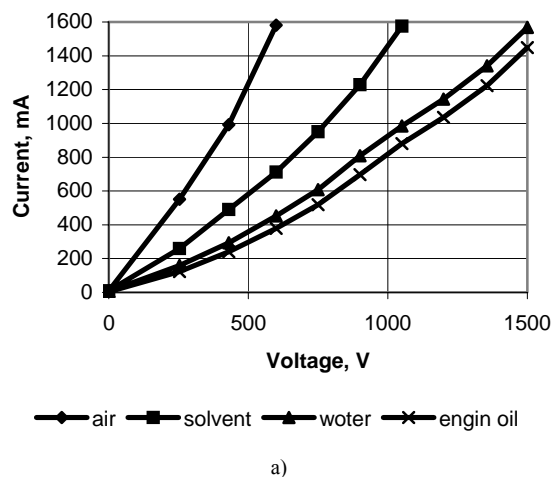


Рисунок 5 - Зависимость амплитуды тока механической ветви УЗКС на резонансной частоте и ее электрической добротности от напряжения питания УЗКС.

с грибовидным инструментом от напряжения на ее пьезокерамических элементах полученные в различных средах.

Из зависимостей, представленных на рисунке 5.а следует, что зависимости тока механической ветви колебательной системы при обработке различных технологических сред имеют разный характер. Это, как было показано выше, обусловлено различными волновыми сопротивлениями обрабатываемых технологических сред. Вместе с тем при использовании грибовидного рабочего инструмента, наблюдается существенное отличие (в сравнении с подобными экспериментами, проведенными с цилиндрическими рабочими инструментами) амплитуды тока механической ветви при одном и том же напряжении питания колебательной системы. Это обусловлено тем, что грибовидный рабочий инструмент диаметром 25 мм имеет большую поверхность акустического контакта с обрабатываемой средой (8 см<sup>2</sup>), что в пять раз больше чем

поверхность акустического контакта цилиндрического инструмента. В связи с этим, изменение технологической среды (изменение импеданса присоединяемой нагрузки) при использовании инструментов с развитой поверхностью акустического контакта оказывает большее влияние на электрический импеданс ультразвуковой колебательной системы.

Поскольку грибовидные инструменты широко используются на практике и при их использовании параметры обрабатываемых сред оказывают заметное влияние на электрические параметры колебательных систем, то для случая использования грибовидного рабочего окончания с диаметром 25 мм были получены дополнительные зависимости электрической добротности колебательной системы в зависимости от напряжения на ее пьезокерамических элементах, представленные на рисунке 5.б.

Зависимости иллюстрируют увеличение электрической добротности колебательной системы при обработке различных технологических сред, т.е. для различных технологических сред кривые имеют разный характер. С развитием кавитации, механическая добротность колебательных систем увеличивается и приближается к механической добротности той же колебательной системы при ее работе в воздушной среде. Изменение электрической добротности колебательной системы соответствует изменению механической добротности колебательной системы, что объясняется электромеханическими аналогиями между механическими и эквивалентными электрическими параметрами колебательной системы.

Крутизна кривой, при обработке ацетона, объясняется слабой прочностью на разрыв этой технологической среды. При этом электрическая добротность колебательной системы, достигает значения добротности этой же колебательной системы в воздушной среде при напряжениях питания колебательной системы 500 В.

Более стойким к разрывным напряжениям являются вода и масло. Напряжения, при котором электрическая добротность колебательной системы приближается к ее добротности в воздушной среде, при обработке воды и масла, составляют 700 и 800 вольт соответственно.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований влияния обрабатываемых технологических сред на электрические параметры колебательных систем, определения диапазонов влияния и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Для повышения эффективности технологических процессов в различных жидких и жидко – дисперсных средах необходимо непрерывно осуществлять перестройку электрических параметров ультразвуковых электронных генераторов (амплитуда и частота напряжения питания колебательных систем) в соответствии со всеми возможными изменениями

электрических параметров ультразвуковых колебательных систем (ток механической ветви, резонансная частота, электрическая добротность), обусловленными изменениями параметров обрабатываемых УЗ колебаниями технологических сред.

2. Увеличение вводимой в технологические среды энергии УЗ колебаний за счет увеличения излучающей поверхности рабочих инструментов (например грибовидной формы) усиливает взаимосвязь параметров обрабатываемых сред с электрическими параметрами ультразвуковых колебательных систем и расширяет диапазоны необходимой перестройки параметров электронных генераторов.

3. Повышение эффективности технологических процессов возможно путем реализации и контроля режима развитой кавитации в обрабатываемых средах. Реализация режима развитой кавитации осуществляется за счет контроля влияния реактивной эквивалентной массы присоединенного объема жидкой среды, непосредственно контактирующего с излучающей поверхностью рабочего инструмента, что приводит к изменению резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков Р.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В. Исследование влияния кавитирующих сред на работу электронного генератора уз аппаратов. Межвузовский сборник «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях». – Бийск: АлтГТУ, 2003. - с.216-226.
2. Барсуков Р.В., Хмелев В.Н., Шутов В.В. Измеритель электрических параметров ультразвуковых колебательных систем. Сборник тезисов докладов 55-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова «Научно-техническое творчество студентов», в 2-х частях, ч.1. - Барнаул: АлтГТУ, 1997. - с.133
3. Барсуков Р.В., Хмелев В.Н., Князев А.В.. Измерительный комплекс для изучения работы ультразвуковых колебательных систем. Материалы межвузовской научно-практической конференции «Наука и образование: проблемы и перспективы». - Бийск: АлтГТУ, 1999. - с.10-12