

Повышение эффективности ультразвукового воздействия на жидкие среды

Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В., Цыганок С.Н.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния различных технологических сред и ультразвуковых колебательных систем с различной поверхностью излучения на эффективность УЗ процессов, определены диапазоны необходимой перестройки электронных генераторов по частоте и мощности для обеспечения оптимального УЗ воздействия в режиме развитой кавитации.

1. Введение.

Эффективность технологий, основанных на применении ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности, сегодня не вызывает сомнений. Они позволяют решить множество проблем связанных с обеспечением размерной обработки хрупких и особотвердых материалов, сваркой полимеров, мелкодисперсным распылением и т.п.. Особенно эффективно применение УЗ колебаний для интенсификации процессов в жидких и жидко - дисперсных средах (эмульгирование, диспергирование, дегазация, экстрагирование, пропитка т.п.).

Основные ультразвуковые технологические процессы, проходящие в жидких средах, основаны на создании в них «развитой кавитации», при реализации которой в жидкостях образуется устойчивое кавитационное облако, сформированное растущими и схлопывающимися парогазовыми пузырьками.

Технологические процессы на практике реализуются при помощи УЗ аппаратов, состоящих из электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). Максимальная эффективность протекания процессов обеспечивается при оптимальном согласовании электронного генератора, УЗКС и технологической среды.

Технологические среды по разному влияют на параметры электронного генератора и УЗКС [1]. Степень влияния жидких сред определяется их вязкостью, количеством твердого вещества, степенью затухания ультразвуковых колебаний, волновым сопротивлением. Кроме того, изменение параметров УЗКС может

происходить непосредственно в процессе ультразвукового воздействия, например в процессе образования водномасляной эмульсии и т.п., из-за изменения волновых свойств обрабатываемых жидкостей.

Известно также, что волновые свойства обрабатываемых жидких сред изменяются при увеличении амплитуды колебаний излучающей поверхности УЗКС, что обусловлено возникновением и развитием в них кавитационных явлений (образование облака парогазовых пузырьков на излучающей поверхности).

Изменения свойств обрабатываемых жидких сред обуславливают изменения собственной резонансной частоты и добротности УЗКС, что приводит к ее частотному рассогласованию с электронным генератором. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний ультразвуковой колебательной системы, работающей в резонансном режиме, и снижению эффективности реализации процессов, вплоть до нуля при отсутствии кавитации.

Таким образом, при реализации технологических процессов в жидких и жидко – дисперсных средах, возникает необходимость в непрерывном контроле свойств обрабатываемых сред и непрерывной подстройке параметров УЗ генератора, в соответствии с изменениями параметров этих сред. Только в этом случае может быть обеспечено ультразвуковое воздействие с максимальной эффективностью.

Разнообразие технологических процессов обусловили необходимость проведения экспериментальных исследований по выявлению степени влияния акустических свойств жидких сред на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов технологических аппаратов.

2. Экспериментальная установка и оборудование

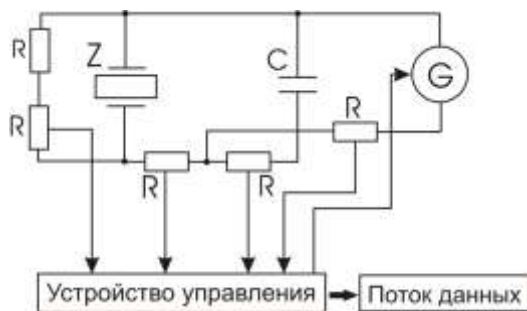
Диапазоны изменения электрических параметров УЗКС зависит от величины акустической нагрузки и режимов УЗ воздействия. Для практического измерения и

исследования электрических параметров колебательных систем предложен и разработан специализированный измерительный стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

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

- водная среда;
- водная среда под давлением 0,7 МПа;
- воздушная среда;
- ацетон;
- индустриальное масло.

Выбор обрабатываемых сред обусловлен широким диапазоном их кавитационной прочности.



R - резистивные датчики для снятия токов и напряжений;
 Z - колебательная система;
 C - дополнительная емкость;
 G - перестраиваемый генератор.

Рисунок 1 - Структурная схема стенда для измерения электрических параметров УЗКС

Специализированный измерительный стенд 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);

- перестройка 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 свойств 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.

3. 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 потока цифровых данных на ЭВМ.

Получение амплитудно-частотных характеристик колебательной системы осуществлялось при плавной перестройке частоты электронного генератора в заданном частотном диапазоне и непрерывном измерении электрических параметров колебательной системы. При ширине частотного диапазона перестройки электронного генератора равного 10 кГц, время его сканирования составило 5 секунд. Амплитудно-частотные характеристики электрических параметров УЗКС были получены при разных напряжениях питания ультразвуковой колебательной системы. Это позволило для каждого отдельного

Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие среды

эксперимента (УЗ обработка конкретной технологической среды с использованием определенного типа рабочего окончания) получить 250 зависимостей, соответствующих разным напряжениям питания колебательной системы.

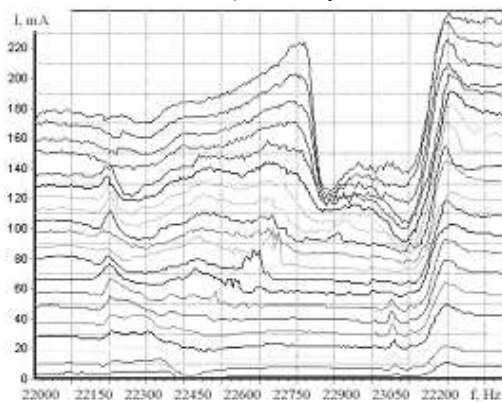
В ходе проведения измерений осуществлялось накопление и обеспечивалась передача измерительной информации по последовательному каналу (RS-232) в ЭВМ для ее дальнейшей обработки.

Второй этап заключался в обработке накопленных данных, а именно визуализации первичных данных (амплитудно-частотных

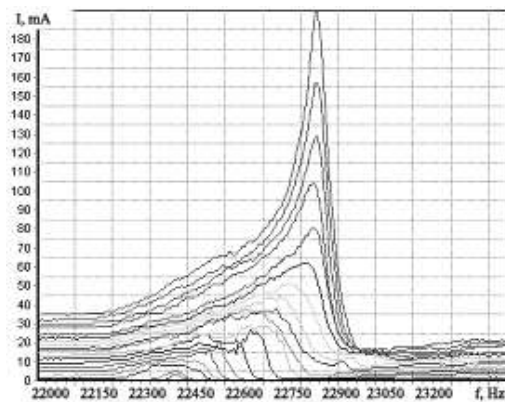
характеристик), обработке первичных данных, получении новых зависимостей для их визуализации и анализа. В результате обработки накопленных данных были получены графические зависимости параметров УЗКС и их численные значения, представленные далее.

4. Анализ результатов

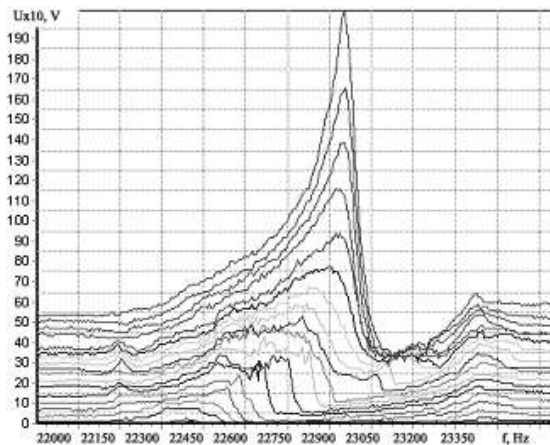
На рисунке 2 представлены первичные экспериментальные данные, полученные при различных напряжениях питания колебательной системы.



а)



б)



в)

а – семейство АЧХ тока, потребляемого от генератора;

б – семейство АЧХ тока механической ветви;

в – семейство АЧХ напряжения питания УЗКС.

Рисунок 2 - Частотные характеристики электрических параметров УЗКС

Зависимость тока механической ветви колебательной системы (рисунок 2.б) от частоты электронного генератора получена путем вычитания емкостного тока, протекающего по электрической емкости С

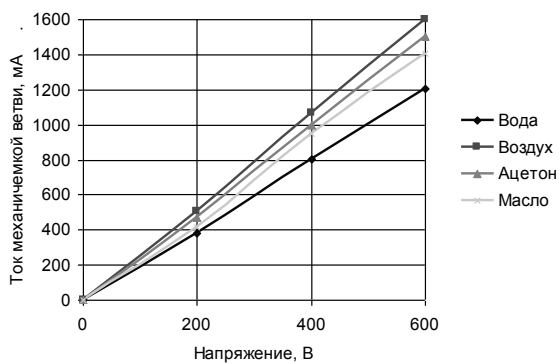
(смотри рисунок 1) из тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора (емкость С при проведении экспериментов выбирается равной электрической емкости пьезокерамических

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 реальный 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 некоторых жидких сред при использовании различных 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 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.

Результаты обработки и анализа полученных первичных данных для



различных технологических сред (воздушная среда, ацетон, промышленное масло, вода при нормальных условиях и избыточном давлении 0,7 МПа) при использовании цилиндрических и грибовидных рабочих инструментов с развитой излучающей поверхностью, представлены на рисунках 3 и 4.

На рисунке 3 показаны зависимости тока механической ветви (при работе УЗКС на резонансной частоте) и резонансной частоты колебательной системы от напряжения на ее пьезокерамических элементах при использовании цилиндрического инструмента и осуществлении ультразвукового излучения в различные технологические среды.

Из представленных зависимостей следует, 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).

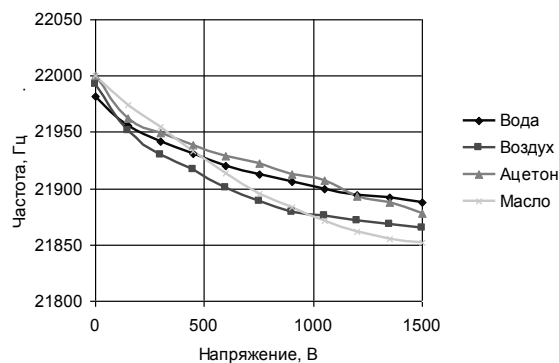


Рисунок 3 - Зависимости тока механической ветви и резонансной частоты колебательной системы от напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы при использовании цилиндрических инструментов.

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 см². Очевидно, что чем меньше площадь акустического контакта с обрабатываемой средой, тем меньше ее влияние на механические и электрические параметры колебательных систем. Тем не менее, из полученных кривых видно, что

Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие среды

различные технологические среды, при использовании цилиндрических рабочих инструментов, оказывают разное влияние на величину тока механической ветви.

Вместе с тем, при использовании УЗКС с малой площадью акустического контакта излучающей поверхности колебательной системы с обрабатываемыми средами, импеданс колебательной системы при обработке различных технологических сред меняется не существенно. Именно по этой причине, при обработке используемых в эксперименте сред происходит незначительное изменение резонансной частоты колебательной системы практически в одинаковых пределах (рисунок 3).

Работа генератора в случае использования рабочих окончаний с малой площадью излучения, при обработке рассмотренных выше технологических сред, должна обеспечивать перестройку частоты в пределах не менее 0,2 кГц.

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

На рисунке 4 представлены зависимости тока механической ветви (при работе УЗКС на резонансной частоте) и резонансной

частоты колебательной системы от напряжения на ее пьезокерамических элементах при осуществлении ультразвукового излучения в различные технологические среды через грибовидный рабочий инструмент диаметром 25 мм.

Анализ полученных 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 21900 Гц - 21990 Гц (не превышает 90 Гц).

2. При осуществлении ультразвукового воздействия на водную среду наблюдается увеличение резонансной частоты, диапазон изменения которой лежит в пределах от 21098 Гц до 21890 Гц (составляет около 800 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 на 800 Гц.

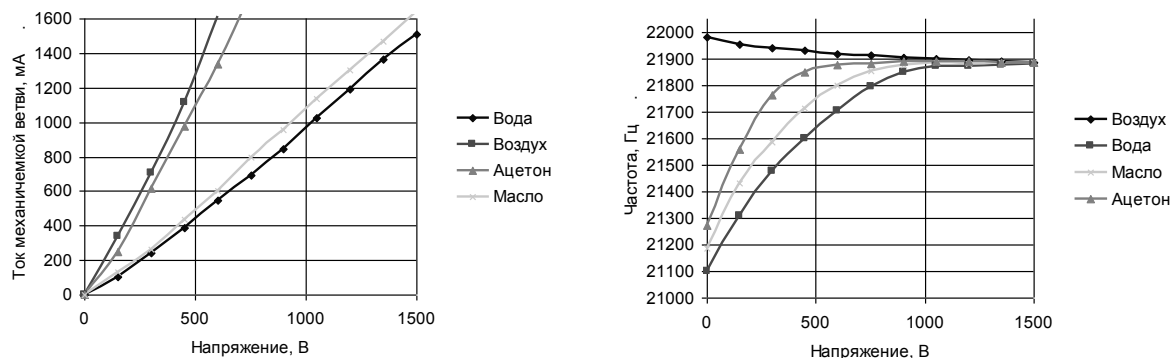


Рисунок 4 – Зависимости тока механической ветви и резонансной частоты колебательной системы от напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы при использовании при использовании грибовидного рабочего инструмента диаметром 25 мм

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 насыщают водную среду в

непосредственной близости рабочего инструмента, изменяя тем самым свойства жидкой среды - ее волновое сопротивление. При напряжении 1000 В резонансная частота колебательной системы достигает своего максимального значения 21890 Гц и соответствует резонансной частоте

колебательной системы в воздушной среде. При дальнейшем увеличении напряжения резонансная частота колебательной системы остается постоянной. Это говорит о том, что при напряжении 1000 В, в обрабатываемой водной среде устанавливается режим «развитой кавитации», который характеризуется устойчивым кавитационным облаком в области излучателя. Этот факт имеет большое практическое значение, поскольку может быть использован в качестве критерия настройки на режим «развитой кавитации».

3. Кривые зависимостей тока механической ветви колебательной системы от напряжения при обработке различных технологических сред имеют разную зависимость. Это, как было показано выше, обусловлено различными волновыми сопротивлениями обрабатываемых технологических сред. Однако при использовании рабочего инструмента в виде грибка, 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 обуславливается тем, что грибовидный рабочий инструмент диаметром 25 мм имеет поверхность акустического контакта с обрабатываемой средой $3,2 \text{ см}^2$. В связи с этим изменение технологической среды (изменение импеданса нагрузки) при использовании инструментов с развитой поверхностью акустического контакта оказывает большее влияние на величину электрического импеданса ультразвуковой колебательной системы.

Для подтверждения влияния изменяющегося волнового сопротивления жидкой среды, непосредственно контактирующей с излучающей поверхностью, на резонансную частоту УЗКС, были проведены дополнительные исследования по УЗ воздействию на водную среду, находящуюся под статическим давлением 0,7 МПа (рисунок 5).

Таблица 1 – Резонансные частоты УЗКС

	$S_{изл} = 1,7 \text{ см}^2$	$S_{изл} = 3,2 \text{ см}^2$	$S_{изл} = 5,37 \text{ см}^2$	$S_{изл} = 11 \text{ см}^2$	$S_{изл} = 18 \text{ см}^2$
Воздух	22000	22000	22000	22000	22000
Ацетон	22000	21272	20806	19828	19557
Масло	22000	21185	20665	19571	19171
Вода	22000	21098	20527	19321	18799

Наличие статического давления в водной среде сдвигает порог зарождения кавитации в область больших амплитуд механических колебаний. Отсутствие кавитации при обработке воды, находящейся под статическим давлением 0,7 МПа, 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 УЗКС при обработке водных сред при нормальном и избыточном давлениях на малых напряжениях питания (при отсутствии кавитации в обоих случаях) равны друг другу.

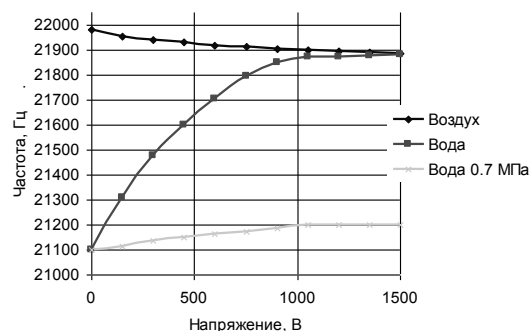


Рисунок 5 - Зависимость резонансной частоты от напряжения питания УЗКС

Многочисленные исследования по определению зависимостей параметров УЗКС при воздействии на различные жидкие среды были проведены с использованием грибовидных рабочих инструментов с диаметрами излучающей поверхности 30мм, 35мм и 40мм. В таблице 1 представлены результаты измерения резонансных частот УЗКС, полученные для систем с различной площадью излучения при работе в докавитационном режиме в различных технологических средах.

Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие среды

Полученные данные об изменении резонансной частоты УЗКС, вследствие присоединения к излучающей поверхности массы обрабатываемой среды, позволяют определить толщину слоя жидкости, которая определяет изменение резонансной частоты и должна быть учтена при расчетах. Для случая $S_{ИЗЛ} = 3,2 \text{ см}^2$ толщина присоединенного слоя жидкости составляет $h = 1,3 \text{ см}$. Расчет толщины слоя жидкости производился из условия соответствия массы эквивалентного участка, удлиняющего резонансный размер УЗКС, массе присоединенной жидкой среды.

Таким образом, при расчетах, резонансная частота полуволновой колебательной системы, с грибовидным инструментом, площадь излучения которого $S_{ИЗЛ}$, в докавитационном режиме определяется из следующего выражения:

$$f = \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta)}, \quad (1)$$

где l – резонансный размер колебательной системы; Δ – эквивалентное приращение резонансного размера УЗКС за счет присоединения массы жидкой среды, равное:

$$\Delta = \frac{S_{ИЗЛ} h \rho_{ж}}{S_{УЗКС} \rho_{УЗКС}}, \quad (2)$$

где $S_{УЗКС}$ – площадь сечения УЗКС присоединяемая к рабочему инструменту; $\rho_{ж}$ – плотность среды; $S_{ИЗЛ}$ – площадь излучающей поверхности; $\rho_{УЗКС}$ – плотность материала колебательной системы.

Использование формул (1) и (2) позволяет осуществлять расчет резонансной частоты колебательной системы при использовании рабочих инструментов различного диаметра при работе в средах в докавитационном режиме.

На рисунке 6 представлены расчетные зависимости резонансной частоты колебательной системы с рабочими инструментами различного диаметра при

работе в докавитационном режиме в трех жидких средах.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные данные, был выявлен корректировочный коэффициент K_F , позволяющий производить определение резонансной частоты колебательной системы при различной площади поверхности излучения. На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента K_F от площади поверхности излучения.

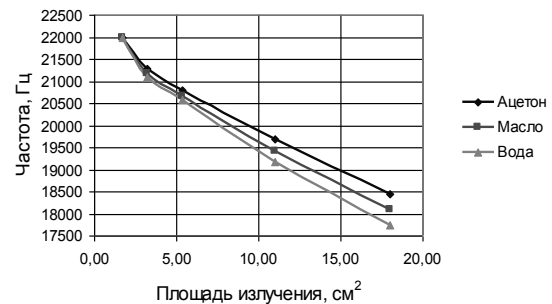


Рисунок 6 – Расчетная зависимость резонансной частоты колебательной системы от площади поверхности излучения

Поэтому, для практических расчетов, формула (1) должна быть уточнена и представлена в следующем виде:

$$f = K_F \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta)}, \quad (3)$$

где $K_F = f(S_{ИЗЛ})$.

Таким образом, при использовании рабочих инструментов с развитой поверхностью излучения следует учитывать необходимость увеличения диапазона перестройки по частоте электронного УЗ генератора, а для оценки этого диапазона использовать выражение 3 и зависимость коэффициента K_F от площади излучения (рисунок 7).

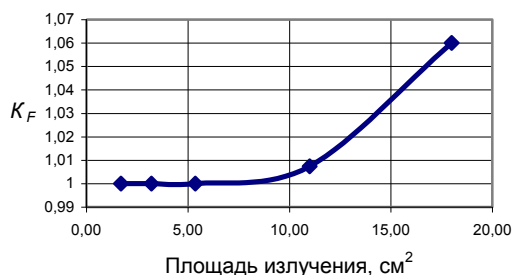


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента K_F от площади поверхности излучения

5. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований влияния обрабатываемых технологических сред на электрические параметры пьезоэлектрических колебательных систем и определения диапазонов этого влияния установлено следующее:

1. Для повышения эффективности ультразвукового воздействия при реализации различных технологических процессов в жидких и жидко – дисперсных средах необходимо обеспечивать непрерывную перестройку электрических параметров ультразвуковых электронных генераторов (амплитуда и частота напряжения питания колебательных систем) в соответствии с изменениями электрических параметров ультразвуковых колебательных систем (ток механической ветви, резонансная частота, электрическая добротность), обусловленными изменениями свойств обрабатываемых технологических сред.

2. Повышение эффективности УЗ технологических процессов за счет увеличения вводимой в среды энергии УЗ колебаний при увеличении излучающей поверхности колебательных систем усиливает зависимость электрических параметров ультразвуковых колебательных систем от свойств обрабатываемых сред и обуславливает расширение диапазона необходимой перестройки параметров электронных генераторов.

3. Повышение эффективности технологических процессов за счет реализации режима «развитой кавитации» должно осуществляться при непрерывном контроле влияния реактивной эквивалентной массы присоединенного объема жидкой среды, непосредственно контактирующего с

излучающей поверхностью рабочего инструмента.

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.