

# Ультразвуковая очистка в технологии электроники

Владимир Ланин [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)

Николай Дежкунов [dnv@bsuir.edu.by](mailto:dnv@bsuir.edu.by)

Алексей Ковальчук

Эффективность ультразвуковой очистки в жидких средах зависит от выбора многих параметров: удельной акустической мощности, частоты колебаний, температуры жидкости, геометрических факторов ванн и др. С помощью кавитометра установлены закономерности распределения активности кавитации в рабочем объёме жидких сред.

## Введение

Среди всех технологических процессов, протекающих в жидких средах с воздействием ультразвука, очистка поверхностей твёрдых тел получила наибольшее применение в электронной промышленности. Анализ причин отказов изделий электроники показывает, что их четвертая часть приходится на долю плохого качества очистки поверхностей [1]. Ультразвуковая очистка в жидких средах основана на использовании нелинейных эффектов, возникающих в жидкости под действием ультразвуковых (УЗ) колебаний. Среди этих эффектов, таких как акустические течения, звуковое давление, звукокапиллярный эффект, главное значение имеет кавитация.

Кавитация ускоряет протекание ряда физико-химических процессов. Причиной исключительной эффективности кавитации является то, что захлопывание пузырьков начинается у очищаемой поверхности. Кавитация сопровождается возникновением очень высоких мгновенных гидростатических давлений, которые отрывают прилипшие к очищаемой поверхности частицы загрязнений. При достаточно высокой амплитуде УЗ колебаний и переходе из зоны положительного в зону отрицательного давления происходит захлопывание вакуумных кавитационных пузырьков микронного размера в большом количестве, вызывающее ударную волну, скорость которой достигает 400 км/ч.

Благодаря сочетанию давления (до 700 атмосфер), температуры (около 5000°C) и скорости ударной волны, струя освобождает поверхность от загрязняющих веществ [2]. Вследствие небольшого размера струи и относительно большой энергии, УЗ очистка может происходить в очень малых зазорах.

Введение ультразвуковых колебаний в моющие растворы позволяет не только ускорить процесс очистки, но и получить более высокую степень чистоты поверхности. При этом в большинстве случаев удаётся исключить пожароопасные и токсичные органические растворители и использовать исключительно водные растворы технических моющих средств. Это ведёт к улучшению условий труда рабочих, повышению культуры производства, а также позволяет частично решить вопросы экологической безопасности.

Учитывая природу загрязнений и характер их связи с поверхностью, различают следующие основные виды загрязнений [3]:

неорганические:

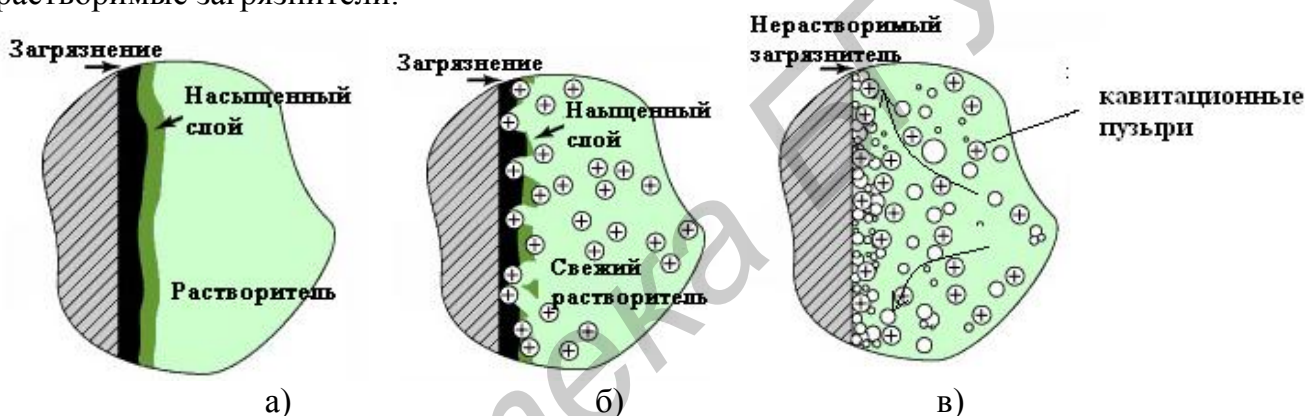
- механически слабо связанные с поверхностью (пыль, опилки, металлическая и неметаллическая стружка, сажа и т. п.);
  - механически шаржированные в поверхность (зерна абразивов, минеральные или металлические частицы);
  - осажденные на поверхность (солевые корки, накипь и т. п.);
- органического характера:

- механически слабо связанные с поверхностью (пыль, пластмассовые опилки и стружка, сажа, уголь, кокс);
- обладающие небольшой степенью адгезии к поверхности (жировые и масляные пленки и смазочные материалы, шлифовальные, полировальные и притирочные пасты);
- прочно сцепленные с поверхностью (смола, лак, клей, краска и т. п.).

При химической очистке путем растворения загрязнений реагент вступает в прямой контакт с загрязнителем. Когда химический очиститель растворяет загрязнения, на границе развивается насыщенный слой и очищающее действие останавливается (рис. 1,а).

Ультразвуковая кавитация и взрывы микропузырьков эффективно вытесняют насыщенный слой, позволяя свежей порции химического реагента соприкоснуться с загрязнителем. Это особенно полезно, когда необходимо очистить неровные поверхности или внутренние полости (рис. 1,б).

Некоторые типы загрязнений состоят из нерастворимых частиц, удерживающихся на поверхности с помощью ионных сил. Для удаления этих частиц достаточно их смещения, чтобы разорвать силы притяжения с поверхностью. Этому способствуют кавитационные пузырьки (рис. 1,в). Эффект ультразвука, по существу, создает механическое микроперемешивание, которое эффективнее удаляет растворимые и нерастворимые загрязнители.



**Рис. 1.** Схемы очистки поверхности от загрязнений: а – химическая очистка, б – УЗ очистка, в – УЗ очистка нерастворимых загрязнений

Ультразвук применяют для очистки от загрязнений, возникающих как при изготовлении изделий, так и при их эксплуатации. Особенно полезна УЗ очистка при подготовке поверхностей перед нанесением покрытий и при очистке сложных полостей и каналов в изделиях. Ультразвук широко используют для очистки проволоки, металлической ленты, форсунок, кабеля и др. К специальным применениям технологии УЗ очистки можно отнести очистку порошков, радиоактивно загрязнённых поверхностей, регенерацию керамических фильтров. УЗ очистка хорошо зарекомендовала себя во многих областях промышленности, таких как [4]:

- машиностроение – перед и после обработки деталей и узлов, перед консервацией и после расконсервации деталей, после сварки, шлифования, полировки, для удаления оксидных пленок, снятия заусенцев с деталей;
- приборостроение – очистка после полировки оптических изделий, деталей точной механики, фильер;
- электроника – удаление загрязнений с подложек интегральных схем, печатных плат, трафаретов для нанесения паяльных паст;
- медицина – стерилизация и очистка хирургических инструментов, ампул, в стоматологии и фармацевтической промышленности;

- ювелирное производство – очистка ювелирных изделий после обработки;
- производство изделий из полимеров - очистка фильер и т.п.

Эффективность УЗ очистки зависит от выбора многих параметров, в том числе и физико-химических свойств моющей жидкости. Для правильного выбора растворов необходимо учитывать характер загрязнений: степень их адгезии к очищаемой поверхности, химическое взаимодействие с моющим раствором, способность противостоять микроударным нагрузкам (кавитационную стойкость). Предварительная классификация загрязнений важна для того, чтобы определить, по какому из признаков легче удалить их с поверхности. Определив этот признак, можно правильно выбрать технологию ультразвуковой очистки (моющие среды и параметры звукового поля).

Органические растворители (бензин Б-70, фреон-113, четыреххлористый углерод, трихлорэтилен, ацетон, дихлорэтан и т.д.) эффективно очищают поверхности деталей от полировочных паст, масел (минеральных, растительных и животных), вазелина, парафина, гудрона. Они не вызывают коррозии металла, обладая малым поверхностным натяжением, легко проникают в отверстия и щели и растворяют в них загрязнения, однако отличаются токсичностью и пожароопасностью.

Альтернативой органическим растворителям и хладагентам является УЗ очистка в водных растворах поверхностно-активных веществ. Правильный выбор моющей среды является основным и решающим фактором, влияющим на качество и время ультразвуковой очистки. В качестве моющей среды для ультразвуковой очистки применяют различные растворы и растворители. Применяются в ультразвуковых установках различные щелочные растворы для обезжиривания деталей, очистки от смазки, полировочных паст, металлической пыли, абразивов и т.д.

### **Выбор режимов ультразвуковой очистки**

При выборе режима различают низкоамплитудную и высокоамплитудную очистку. Низкоамплитудная очистка характеризуется амплитудами колебаний источником ультразвука 2–3 мкм и удельной акустической мощностью 2–3 Вт/см<sup>2</sup>. При этой очистке используют магнестрикционные преобразователи с большой излучающей поверхностью, монтируемые в дно или боковые стенки ванн. Данное оборудование характеризуется большой неравномерностью кавитационного поля в жидкой среде [5].

Высокоамплитудная очистка осуществляется при амплитудах колебаний 10–15 мкм и удельной акустической мощности 10–20 Вт/см<sup>2</sup>. В этом случае используют стержневые колебательные системы, обеспечивающие высокую плотность кавитационного поля в рабочей зоне.

Для достижения необходимого режима УЗ очистки большое значение имеет также выбор оптимального значения частоты колебаний. Большинство установок УЗ очистки работает в диапазоне частот от 18 до 44 кГц.

При одновременном воздействии на жидкость УЗ полей двух различных частот  $f_1$  и  $f_2$  одна из которых значительно выше другой наблюдается эффект значительного повышения интенсивности кавитации. При одновременном воздействии полей, к пульсациям и захлопыванию кавитационных пузырьков, обусловленным полем низкой частоты, добавляются интенсивные осцилляции, обусловленные полем высокой частоты. При этом амплитуда и скорость осцилляции более значительны, чем при воздействии каждого из УЗ полей в отдельности, так как поле высокой частоты не способно вообще породить ультразвуковую кавитацию, а поле низкой частоты не способно породить осцилляции при возникновении кавитации.

Можно также полагать, что при возбуждении кавитации одновременно УЗ полями обеих частот возникают не только кавитационные пузырьки, но и значительные по интенсивности микропотоки и крупномасштабные акустические течения. Кавитационные пузырьки малых размеров, возникающие в поле высокой частоты, под действием акустических течений перемещаются в зоны развитой кавитации поля низкой частоты. При этом пульсирующие пузырьки приобретают свойства кавитирующих с выделением значительной энергии и, следовательно, индекс кавитации в рабочем объеме жидкости увеличивается.

Экспериментально установлено существенное повышение эффективности УЗ очистки при одновременном озвучивании жидких сред с двумя различными частотами, одна из которых является обычно применяемой для таких процессов частотой, а другая превышает её на 1–2 порядка [6].

Таким образом, совместное действие кавитации, интенсивных осцилляций и акустических течений при одновременном наложении УЗ полей низкой и высокой частоты приводит к существенному повышению эффективности ультразвукового воздействия на процессы в жидкостях.

### **Оборудование ультразвуковой очистки**

Конструктивно УЗ установки состоят из генератора соответствующей мощности и ванн различных рабочих объемов. В дно ванн вмонтированы пьезокерамические преобразователи, которые акустически связаны с дном ванны. Ультразвуковые ванны – это ёмкости с УЗ излучателями, предназначенные, главным образом, для очистки предметов в моющих жидкостях (вода, растворы ТМС, разнообразные растворители).

Установки для УЗ очистки проволоки от волоочильной смазки, обмазок, графита, органических и других загрязнений, встраивают в технологические линии производства проволоки из черных и цветных металлов. Такая установка состоит из ультразвуковой ванны, модуля подготовки моющего раствора и блока управления [7].

Проволока проходит через УЗ ванну, где непрерывно очищается. Моющий раствор постоянно перекачивается насосом из ванны в модуль подготовки и обратно. В модуле раствор подогревается до нужной температуры. Здесь же он очищается — для этого применяются камеры отстаивания, фильтры грубой и тонкой очистки, а в сложных случаях — и центрифуги для отделения масла.

Более сложные системы УЗ очистки включают одну или несколько емкостей для полоскания, дополнительные ванны очистки, осушители с горячим воздухом, систему автоматизации. В установках используют погружные ультразвуковые преобразователи, которые устанавливаются на нижней или боковых частях емкостей. Погружные преобразователи обеспечивают максимальную простоту установки и обслуживания.

Сравнительно недавно появились новые технологии, которые могут повысить эффективность УЗ очистки. К ним относятся квадратные звуковые волны, пульсирующая УЗ энергия и регулируемая частота на выходе генератора. Современные УЗ генераторы имеют автоматическую регулировку параметров вывода для настройки выхода УЗ энергии. Применение прямоугольного сигнала позволяет создать на выходе широкий спектр сигнала. В результате получается многочастотная система УЗ очистки, которая одновременно вибрирует на нескольких частотах.

В импульсном режиме УЗ энергия включается и выключается каждые несколько секунд или нескольких сотен раз в секунду. При медленных скоростях импульсов происходит более быстрая дегазация рабочей жидкости, пузырькам воздуха

предоставляется возможность подняться к поверхности жидкости в течение времени, когда ультразвук выключен.

Регулируемая частота также может быть модулирована от одного раза в несколько секунд до нескольких сотен раз в секунду. Регулирование частоты может потребоваться для предотвращения повреждения чувствительных деталей.

Применяемые в УЗ установках магнитострикционные преобразователи из-за механических ограничений по размерам аппаратных средств, а также сложности генерирования магнитного поля высокой мощности редко работают на частотах выше 22 кГц. Пьезоэлектрические преобразователи могут работать наилучшим образом в диапазоне от 44 кГц до 1,0 МГц. Подавляющее большинство преобразователей, применяемых сегодня для УЗ очистки, работают на пьезоэлектрическом эффекте.

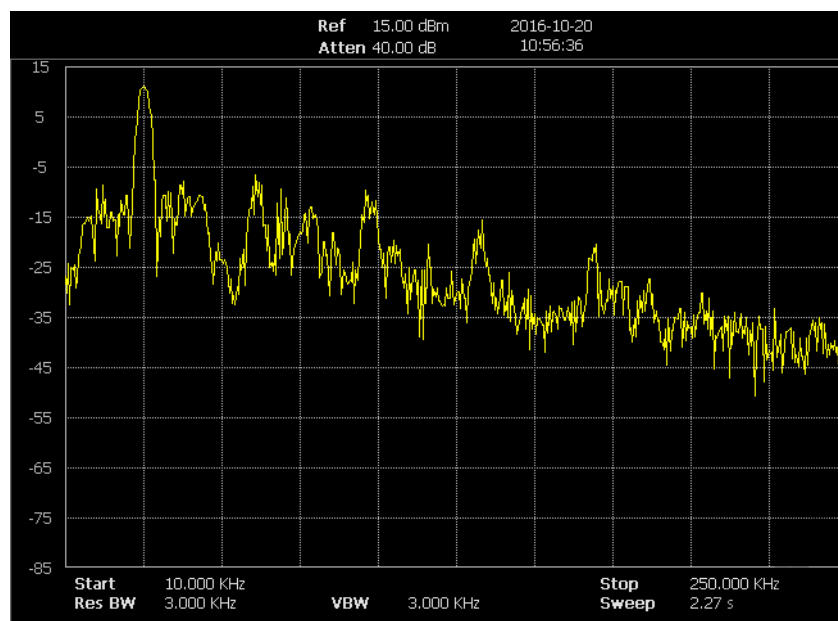
Пьезоэлектрические преобразователи также имеют недостатки. Наиболее распространенной проблемой является то, что производительность пьезоэлектрического преобразователя со временем ухудшается по причине деполяризации кристалла с течением времени и при длительной эксплуатации. Кроме того, такие преобразователи часто закрепляются в емкости на эпоксидном клее, который проявляет усталостное разрушение на высоких частотах ультразвука и при высокой температуре.

### **Исследование активности кавитации в жидких средах**

Исследование активности кавитации в неоднородном УЗ поле в жидкостях представляет собой сложную задачу, так как процесс образования и схлопывания пузырьков происходит с большой скоростью и размер пузырька предельно мал. Усложняет задачу исследований тот факт, что активность кавитации зависит от множества факторов, что сказывается на плохой воспроизводимости кавитационных режимов обработки ультразвуком. Поэтому надежно установить с какой точностью требуется поддерживать тот или иной параметр для обеспечения заданного уровня активности кавитации на основании известных данных не представляется возможным.

Анализ показал, что кавитационный шум наиболее удобен для использования в качестве индикатора активности кавитации, поскольку акустический сигнал может быть достаточно просто преобразован в электрический. На рис. 2 приведен спектр кавитационного шума в емкости резонатора, наполненного жидкостью.

Метод оценки активности кавитации прибором «Кавитометр» (рис. 3) основан на спектральном анализе акустического шума, так как все остальные известные методы оценки активности кавитации, как, например, эрозионный тест, йодная проба, измерение интенсивности звуколюминесценции имеют ограниченные области применения и не позволяют осуществлять непрерывный контроль в процессе производства [8]. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности применения мощного ультразвука в технологии электроники.



**Рис. 2.** Спектр кавитационного шума в емкости резонатора



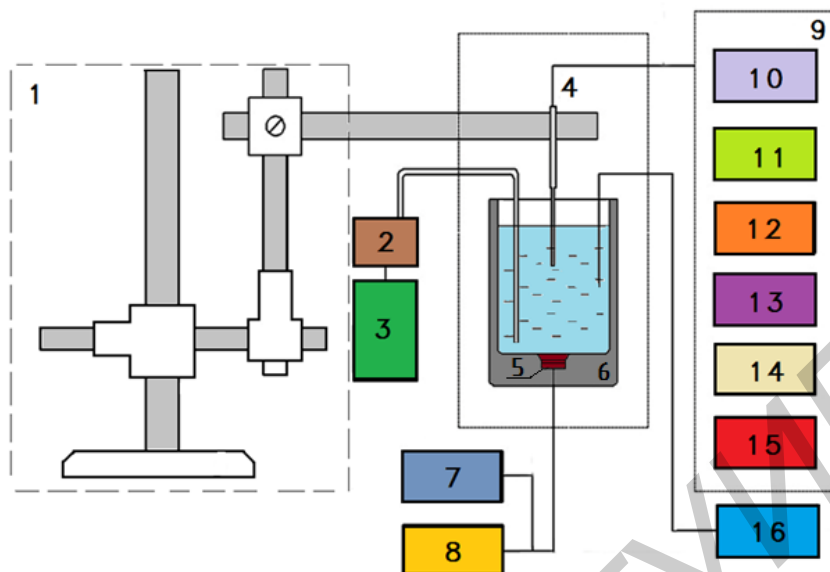
**Рис. 3.** Прибор для оценки активности кавитации

Исследования активности кавитации проводились согласно схеме (рис. 4). С генератора подается сигнал на пьезокерамический преобразователь, который преобразует электромагнитный сигнал в акустический, возбуждающий ультразвуковые колебания в объеме жидкости. Для измерений активности кавитации использовался кавитометр ИСА-3М (Беларусь) [9].

В качестве рабочей ёмкости использовалась прямоугольная ванна из нержавеющей стали с толщиной стенок 0,5 мм. Высота ванны – 95 мм, ширина – 100 мм, длина – 120 мм. Пьезокерамический излучатель НЧ диаметром 50 мм прикреплен к днищу стакана с тыльной стороны клеем на эпоксидной основе. Ёмкость заполнялась жидкостью из вспомогательного резервуара через сливную трубку в ламинарном режиме, чтобы предотвратить захват пузырьков газа в процессе заполнения. Кавитация возникала в ультразвуковом поле на частоте 34,45 кГц, генерируемой ультразвуковым генератором.

На рис. 5 представлены результаты исследования распределения активности кавитации в круглом резонаторе. Датчик двигался сверху – вниз по центру

звукохимического реактора вблизи поверхности жидкости (2–3 мм). В этом случае расстояние от датчика до излучателя практически равно высоте столба жидкости.

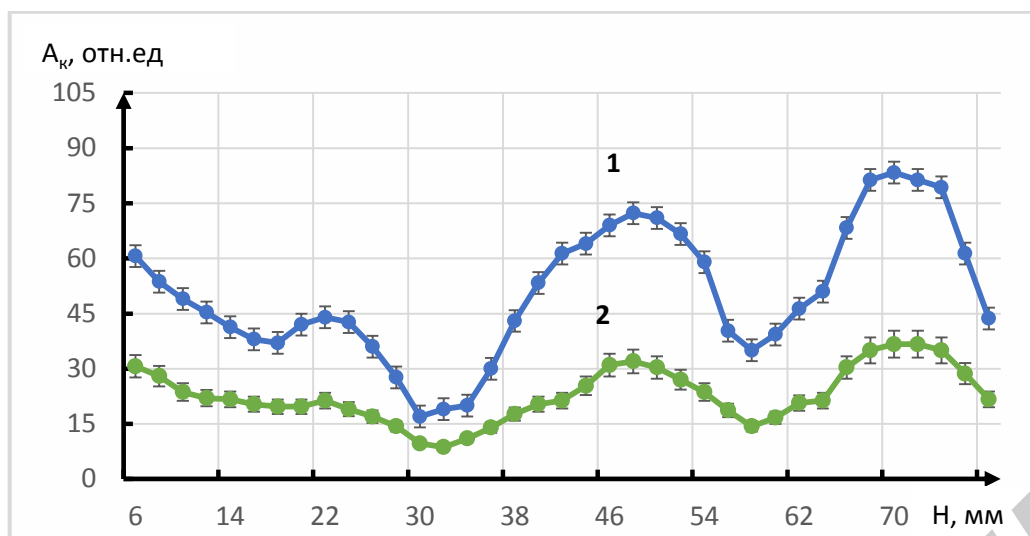


**Рис. 4.** Схема измерений: 1– позиционирующее устройство, 2– насос, 3- емкость для слива жидкости, 4 – датчик, 5 – пьезокерамический излучатель, 6 – УЗ ванна, 7 - частотомер, 8 – УЗ генератор, 9 - кавитометр, 10 - модуль "Н", 11 - модуль "1", 12 - модуль "2", 13 - модуль "3", 14 – модуль "4", 15 – модуль "5", 16 – электронный термометр

Распределение активности кавитации включает максимумы и минимумы, расстояние между которыми равно примерно  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина звуковой волны. Однако характер распределения существенно отличается от теоретического. Наиболее интенсивный максимум наблюдается вблизи границы раздела жидкость-газ. Кроме того, максимум на расстоянии  $\lambda/4$  от излучателя практически отсутствует.

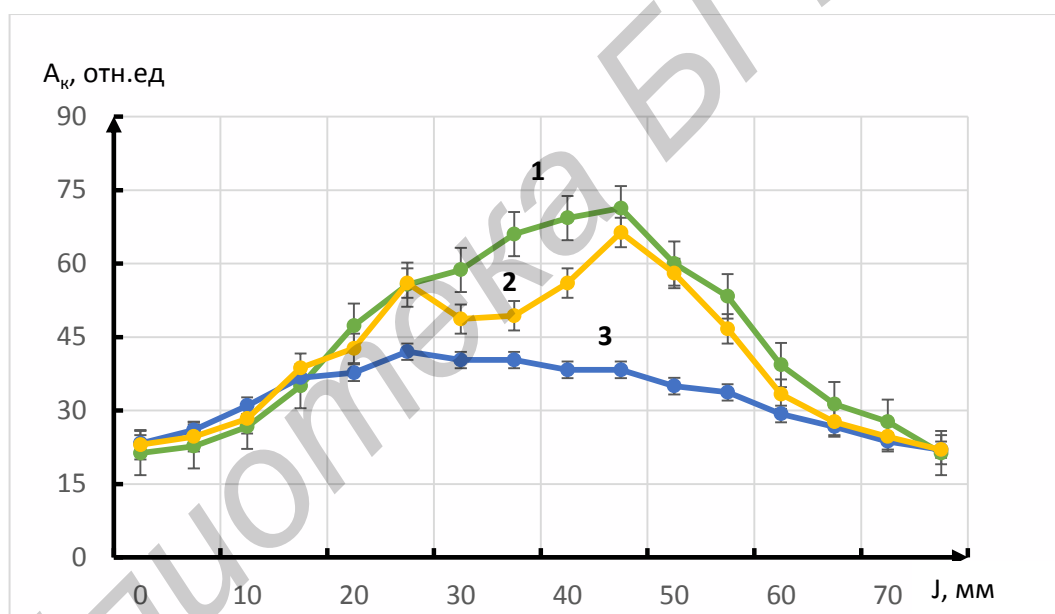
Это обусловлено следующими факторами. Во-первых, условия отражения не являются идеальными, поскольку высота столба жидкости не равна строго кратному числу  $(n+1)\lambda/4$ , где  $n$  – целое число. Во-вторых, измерения выполнялись при интенсивности ультразвука существенно выше порога кавитации. В кавитационной области ультразвук интенсивно поглощается, поэтому давление в отраженной волне заведомо меньше давления в падающей. В результате суммарное поле включает кроме стоячей компоненты также и бегущую [10].

На рис. 6 представлены зависимости полной активности кавитации от расстояния  $J$  до стенки емкости при перемещении датчика по диаметру емкости в плоскости на различных расстояниях от излучателя. Распределение активности кавитации в жидкой среде – неоднородное, максимум наблюдается в центре. На краях звукового поля, т.е. на расстоянии 35–40 мм от оси емкости измеренные величины почти в 3 раза меньше, чем в центре. Таким образом, активность кавитации падает сильнее при перемещении от центра ванны к краю. Данная закономерность сохраняется для всех режимов измерений и на всех расстояниях до излучателя.



**Рис. 5.** Зависимости активности кавитации от расстояния до излучателя: 1 – полная активность кавитации, 2 – активность нестационарной кавитации

Исследована активность кавитации в зависимости от уровня жидкости в ванне при положении датчика на 10 мм ниже поверхности воды (рис. 7).



**Рис. 6.** Зависимости полной активности кавитации от расстояния до стенки ёмкости: 1 – 70 мм от излучателя, 2 – 60 мм от излучателя, 3 – 50 мм от излучателя

Полученные значения на 78 мм – первый максимум, и на 81 мм – значение первого минимум, использовались для исследования зависимости влияния температуры на интенсивность кавитации.

На рис. 8 представлены зависимости активности кавитации от температуры для расстояний от излучателя, соответствующих максимуму и минимуму на рис. 7. Данные получены при медленном нагреве жидкости вследствие преобразования энергии ультразвука в тепловую энергию.

Зависимости активности кавитации от температуры существенно различаются при разных уровнях жидкости. В точке максимума (кривая 1) активность кавитации растет с ростом температуры и достигает максимума при 55–60°C, а в точке минимума (кривая 2) – активность кавитации постоянно снижается.



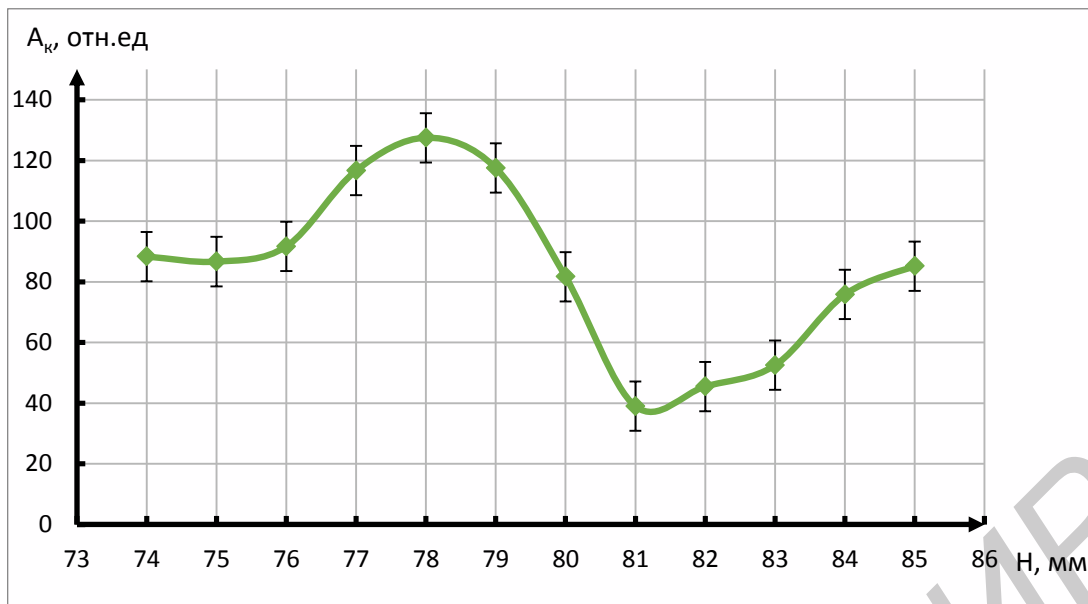


Рис. 7. Зависимость активности кавитации от уровня жидкости

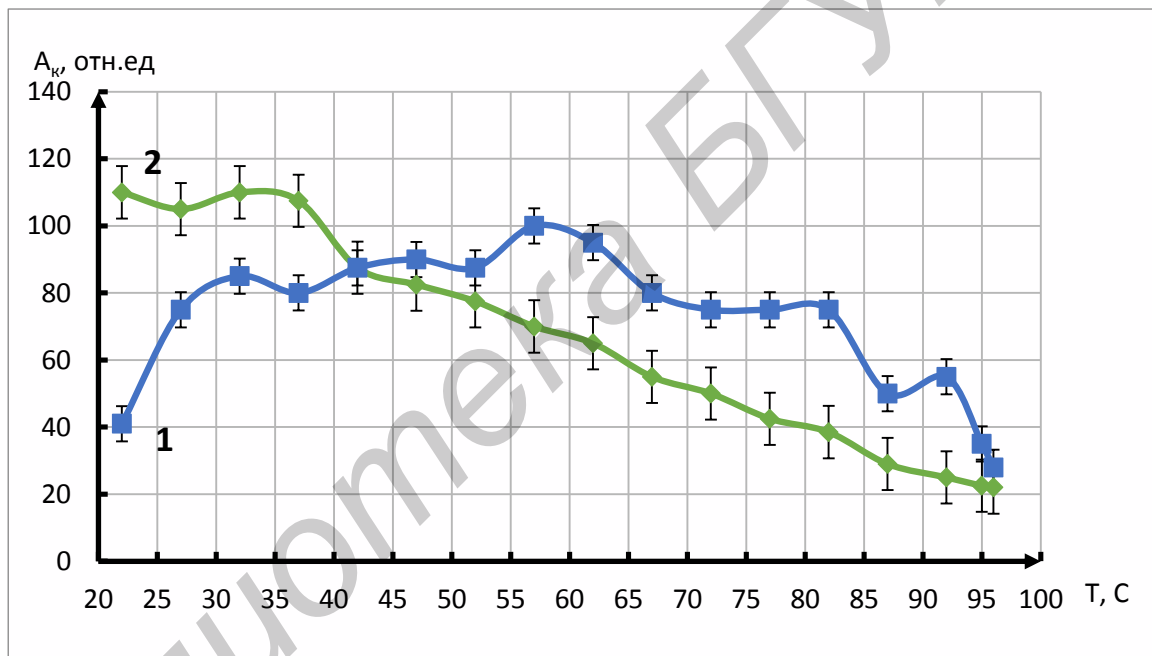


Рис. 8. Зависимости активности кавитации от температуры: 1 – уровень жидкости 78 мм, 2 – уровень жидкости 81 мм

Вблизи минимумов звукового давления на активность кавитации оказывают воздействие два конкурирующих фактора: увеличение концентрации кавитационных полостей, с одной стороны, и уменьшение эффективности их захлопывания вследствие снижения поверхностного натяжения жидкости и повышения давления насыщенного пара.

Характер зависимостей на рис. 8 позволяет предположить, что при низких температурах ( $\leq 60^\circ\text{C}$ ) преобладающим является первый фактор и активность кавитации в этом диапазоне растет с ростом температуры. При высоких температурах все большую роль играет уменьшение скорости захлопывания пузырьков, это, в свою очередь, будет вызывать уменьшение интенсивности ударных волн, генерируемых при захлопывании пузырька, а следовательно – и уменьшение активности кавитации.

В областях, соответствующих максимумам звукового давления, кавитационная область близка к состоянию насыщения пузырьками уже при низких температурах. Дальнейшее увеличение их количества приводит уже не к увеличению, а снижению активности кавитации вследствие упомянутых выше взаимодействий пузырьков и изменений свойств жидкости.

### **Заключение**

Анализ спектральных составляющих кавитационного шума позволяет получать важную информацию о протекании кавитационных процессов и с определённой долей точности диагностировать наличие кавитации и определить её активность. Установлены закономерности распределения активности кавитации в рабочем объёме жидкости. Исследования показали, что ультразвуковые волны распространяются неравномерно в жидких средах, следовательно, и сама кавитация распределяется также неравномерно.

Показано, что характер зависимости активности кавитации от температуры существенно зависит от того, на каком уровне жидкости проводятся измерения. Анализ изменения свойств жидкости, влияющих на динамику кавитационных полостей, позволяет сделать вывод, что основными факторами, определяющими характер зависимости активности кавитации от температуры, является увеличение давления насыщенного пара, уменьшение поверхностного натяжения жидкости и уменьшение растворимости газа в жидкости с ростом температуры.

### **Литература**

1. Contamination of Electronic Assemblies / M. Pecht, M. Bumillier, A. Douthit, J. Pecht. N.Y.: CRC Press. 2003.
2. Leighton T. G. Acoustic Bubble . London.: Academic press, 1995.
3. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. М.: Металлургия, 1984.
4. <http://www.ultrasonic.com.ua/rus/technology/cleaning.htm>
5. Панов А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. М.: Машиностроение, 1984.
6. Хавский Н.Н. Технологический эффект одновременного воздействия ультразвуковых колебаний различных частот в жидкостях // Акустический журнал, 1979, т. 25, №1.
7. [http://www.alexplus.ru/ультразвуковая\\_очистка.html](http://www.alexplus.ru/ультразвуковая_очистка.html)
8. Ланин В.Л., Томаль В.С. Оптимизация кавитационных полей в ультразвуковых ваннах очистки // Доклады НАН Беларуси/ 2007. Т.51. № 3.
9. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 8.
10. Активность кавитации в неоднородном поле звукохимического реактора / И.П. Белоцкий [и др.] // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы. Материалы конф. 26–29 сентября 2015. Витебск. Беларусь. С. 97–99.