

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В. Ланин, В. Томаль,

[vlanin@bsuir.unibel.by](mailto:vlanin@bsuir.unibel.by), [os\\_vt@mail.belpak.by](mailto:os_vt@mail.belpak.by)

**Экологические проблемы в электронике вызвали повышенный интерес к процессам и устройствам ультразвуковой очистки электронных и электронно-оптических изделий. Для удаления стойких загрязнений с поверхностей изделий необходимо создать направленные акустические течения в жидкой среде и обеспечить равномерность кавитационного поля в ультразвуковой ванне.**

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ

Анализ причин отказов изделий электроники показывает, что их четвертая часть приходится на долю плохого качества очистки поверхностей [1]. Моющими веществами в электронике всегда были органические растворители. Ручная очистка приводила к значительному количеству брака, травматизму, выбросам паров растворителей в атмосферу и загрязнению окружающей среды. Общеизвестен основной недостаток спиртов: их пожаро- и взрывоопасность. Хлорированные углеводороды токсичны, обладают канцерогенным и мутагенным действием, образуют смог и требуют утилизации отходов методом захоронения. Хладоны разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект. Поэтому актуальна проблема создания новых безопасных моющих композиций, экологически безопасных технологических процессов и оборудования для очистки изделий.

Альтернативой органическим растворителям и хладагентам является ультразвуковая (УЗ) очистка в водных растворах поверхностно активных веществ (ПАВ). Воздействие УЗ полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн, давления в которых могут достигать  $(1 - 5) \cdot 10^8$  Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности [2]. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефных поверхностей. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты интенсифицируют процесс удаления загрязнений с поверхностей деталей и изделий под действием УЗ поля. Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей [3].

Основными преимуществами УЗ очистки перед другими известными методами удаления загрязнений являются высокая производительность, сочетающаяся с хорошим качеством очистки изделий от любых поверхностных пленок. Развитие технологии УЗ очистки и обезжиривания поверхностей изделий за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины. Для обеспечения высокого качества

очистки необходимо создать направленные акустические течения и обеспечить равномерность распределения интенсивности УЗ поля в объеме жидкости.

## ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

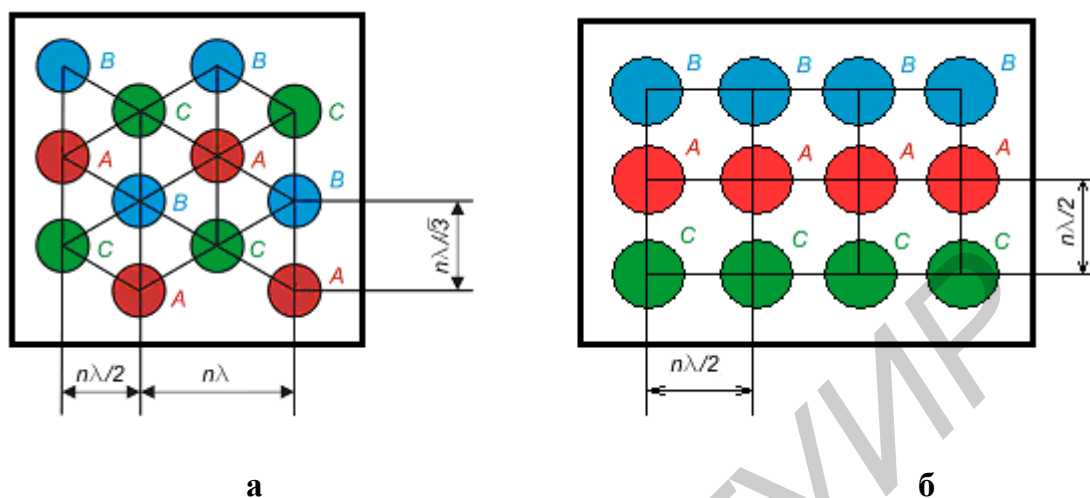
Разрушение поверхностных пленок загрязнений в жидкости происходит в результате кавитации и направленных акустических течений, причем основной вклад дает кавитация. В связи с этим обоснована необходимость обеспечения равномерности кавитационной области. Однако распределение кавитационных пузырьков в кавитационной области в большинстве случаев неравномерно. В жидкой среде количество кавитационных пузырьков существенно превышает число их зародышей. Вокруг захлопывающегося пузырька идет процесс размножения зародышей, в результате чего появляются скопления пузырьков той или иной формы. Наличие таких скоплений существенно нарушает равномерность распределения пузырьков: в скоплениях число их велико, а в пространстве между скоплениями мало. В жидкой среде можно наблюдать скопления кавитационных пузырьков, имеющих форму макропотока, исходящего из одной точки. Конфигурация макропотока существенно меняется при незначительном изменении рабочей частоты, что связано с интерференционной структурой ближнего поля излучателя.

Таким образом, существует проблема получения в технологическом объеме ванн очистки равномерной кавитационной области. В часто используемых конструкциях дном ванны служит излучающая диафрагма магнитострикционного преобразователя типа ПМС-6-22. Распределение акустического давления, создаваемого такими системами, крайне неравномерно – до 50%. В центре ванны над диафрагмой давление принимает максимальное значение и уменьшается к краю мембраны. Иногда для обеспечения равномерности УЗ поля на большой площади используют изгибно-колеблющуюся диафрагму, возбуждаемую системой распределенных магнитострикционных преобразователей, припаянных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины. Такую конструкцию имеет преобразователь ПМС-38. Однако распределение акустического давления в жидкой среде над такой системой имеет максимумы и минимумы, а сборка и настройка таких систем чрезвычайно сложна.

При УЗ очистке электронных и оптико-электронных изделий основным требованием, предъявляемым к УЗ технологическим системам, является высокая равномерность воздействия УЗ колебаний на изделия. Поэтому для возбуждения УЗ колебаний используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей (ППП) мощностью 50 – 100 Вт, закрепленных на боковых стенках и днище ванны в определенном порядке, с параллельным их подключением к генератору [4]. В этом случае эффективность и устойчивость работы преобразователей зависит от ширины полосы преобразования, поскольку в большей степени перекрываются АЧХ отдельных преобразователей, что позволяет скомпенсировать неизбежный разброс их собственных резонансных частот.

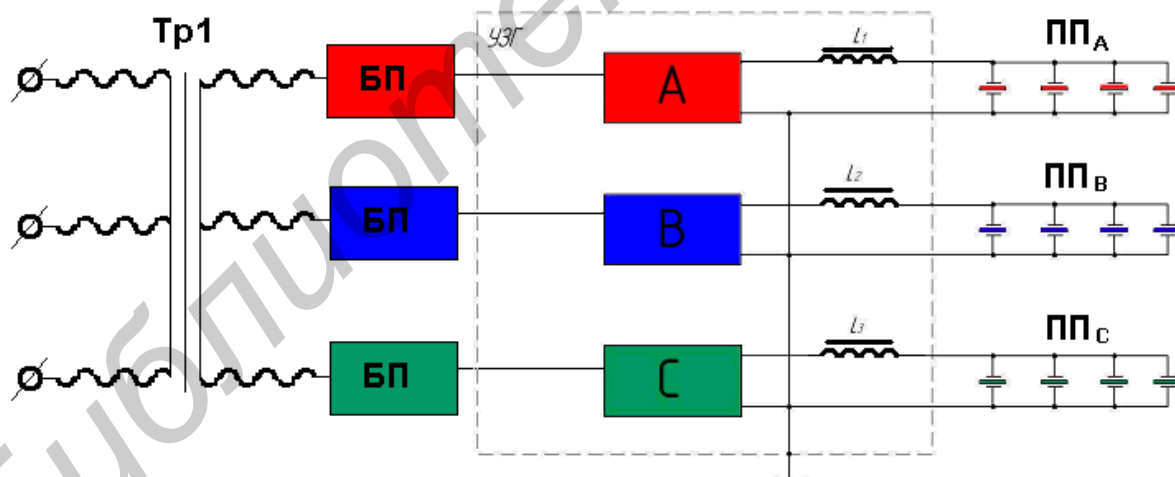
По сравнению с линейным расположением ППП более перспективна модульная система распределенных ППП, установленных в шахматном порядке таким образом, что если мысленно провести прямые через их центры, то образуется решетка треугольной структуры с длиной стороны, кратной  $n\lambda/\sqrt{3}$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\lambda$  – длина УЗ волны в жидкой среде [5] (рис. 1). Такое расположение преобразователей создает

равномерное по площади УЗ поле при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции волн, излучаемых ППП, подключенными к разным каналам УЗ генератора.



**Рис. 1.** Расположение ППП: в шахматном порядке (а), линейное (б), А, В, С – преобразователи, подключенные к каналам А, В и С УЗ генератора

Расстояние между центрами в группе кратно длине волны  $\lambda$  распространяющихся в жидкости УЗ волн. ППП в каждой группе электрически соединены параллельно и подключены к соответствующим каналам А, В или С модульного УЗ генератора (рис.2).



**Рис. 2.** Схема модульного УЗ генератора: А, В, С – каналы;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  – дроссели согласования; ППА...ППС – пьезоэлектрические преобразователи

Канал представляет собой транзисторный автогенератор, выполненный по полумостовой схеме с индуктивной обратной связью по току, работающий в ключевом режиме. Блок питания каждого канала собран по двухполупериодной схеме выпрямления без фильтрации, за счет чего осуществляется амплитудная и частотная модуляция выходного сигнала частотой 100 Гц. При этом выходной сигнал канала представляет собой сумму трех гармонических колебаний с основной частотой  $\omega$  и боко-

выми частотами  $(\omega + 100)$  Гц и  $(\omega - 100)$  Гц. Поскольку автогенераторы питаются пульсирующим напряжением, то наблюдается эффект периодического качания частоты, что дополнительно способствует усреднению ближнего поля в результате периодического изменения интерференционной картины. Полные входные сопротивления групп преобразователей образуют вместе с компенсирующими индуктивностями резонансные контуры, определяющие рабочую частоту соответствующих каналов генератора. В связи с этим все изменения технологических условий (температуры раствора, состава раствора, внесение кассеты с деталями в ванну) приводят к изменению полного входного сопротивления преобразователя, а значит и к изменению частоты генерируемых колебаний.

Выпрямители блоков питания каналов через понижающие трансформаторы подключены к соответствующим фазам трехфазной сети переменного тока, в результате чего сигналы на выходе каналов сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ , а на преобразователи поступают группы импульсов УЗ колебаний, сдвинутые по фазе на тот же угол (рис. 3). Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на преобразователе, последовательно перемещается от преобразователя А к В и от В к С (или наоборот при перефазировке каналов) в каждой группе. В результате возникают направленные потоки жидкости из зоны большего акустического давления в зону меньшего давления.

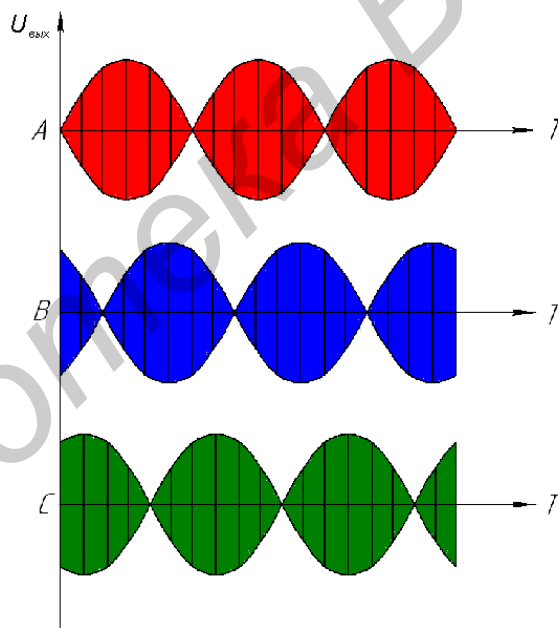
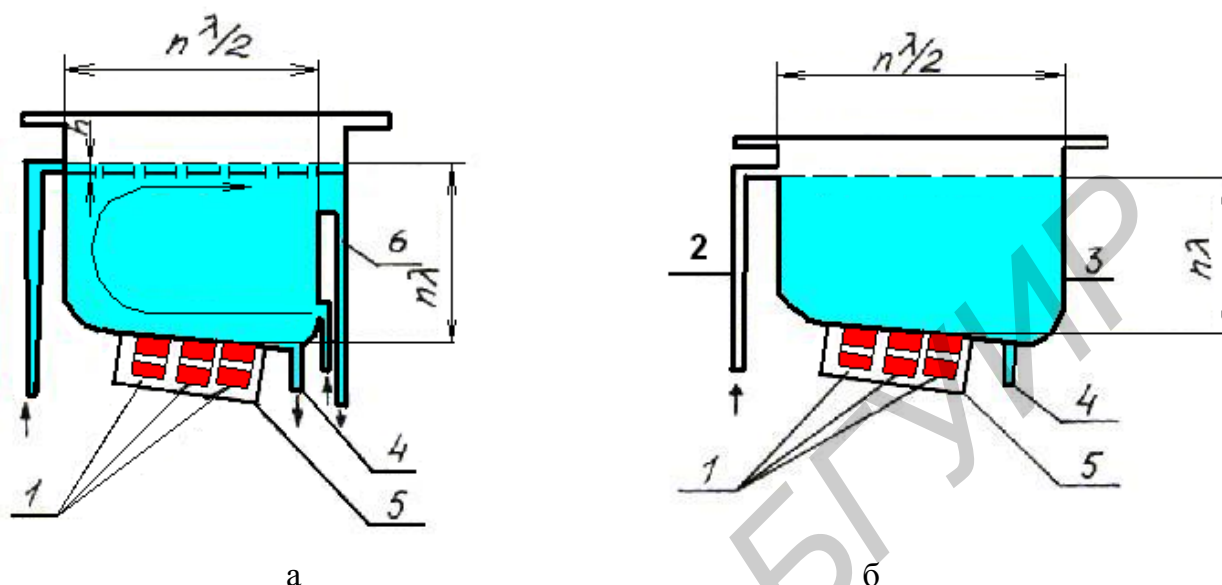


Рис. 3. Форма выходного сигнала каналов А, В, С

Так как движение областей происходит со сравнительно низкой частотой (100 Гц), то в жидкой среде с определенной вязкостью возникают вихревые макропотоки, которые наряду с микропотоками, возникающими в вязком пограничном слое вблизи препятствий, интенсифицируют процессы массопереноса и растворения загрязнений.

УЗ установки для процессов удаления загрязнений включают различные по конструкции ванны, которые используются для очистки как в непроточных средах на основе водных растворов ПАВ, так и в проточной воде. Ванны для очистки в проточных (рис.4, а) и непроточных и моющих средах (рис.4, б) отличаются тем, что первые оснащены переливным карманом. Для повышения эффективности обмена моющей среды в рабочем объеме ванны, подачу свежих порций раствора необходи-

мо осуществлять противотоком сверху и снизу ванны через ряд отверстий небольшого диаметра (3 – 6 мм). Верхний ряд отверстий должен быть затоплен на глубину  $h=8-15$  мм. Такая конструкция ванны для очистки в проточной среде обладает большой равномерностью распределения кавитационного давления, поскольку моющие потоки имеют практически ламинарный характер.



**Рис. 4.** Конструкции УЗ ванн: 1- ППП, 2 – переливной патрубков, 3 – корпус, 4 – сливной патрубков, 5 – экран; 6 – переливной карман

Ёмкость ванн выбирается в зависимости от габаритных размеров обрабатываемой детали или при групповой очистке в зависимости от заданной производительности установки и необходимого времени очистки в каждой ванне. Основное требование, которое необходимо выполнять для обеспечения равномерного воздействия УЗ колебаний на объект очистки – кратность линейных размеров ванны в поперечном сечении  $\lambda/2$ , а оптимальная высота уровня моющей среды кратна  $\lambda$ .

Ответственным моментом при проектировании УЗ ванн является выбор способа крепления ППП к ванне, так как это определяет долговечность ванны и эффективность её работы. ППП могут быть закреплены на стенках ванны с помощью эпоксидного компаунда (рис. 5,а), механически (рис. 5,б), сваркой (рис. 5,в), а также комбинированным способом (рис. 5,г). Наиболее технологичен комбинированный способ, который не создаёт зон скопления загрязнений и обеспечивает наиболее полную передачу УЗ колебаний в моющую среду. Поскольку в этом случае стягивающая шпилька приварена к стенке ванны, клеевой шов механически разгружен.

Стенки ванн, на которых установлены преобразователи, могут совершать изгибные колебания, нарушающие равномерность распределения энергетических характеристик акустического поля. Из теории акустического поля, создаваемого изгибно-колеблющимися упругими пластинами известно, что такая пластина практически не излучает энергии, если длина изгибной волны меньше длины ультразвуковой волны в окружающей среде.

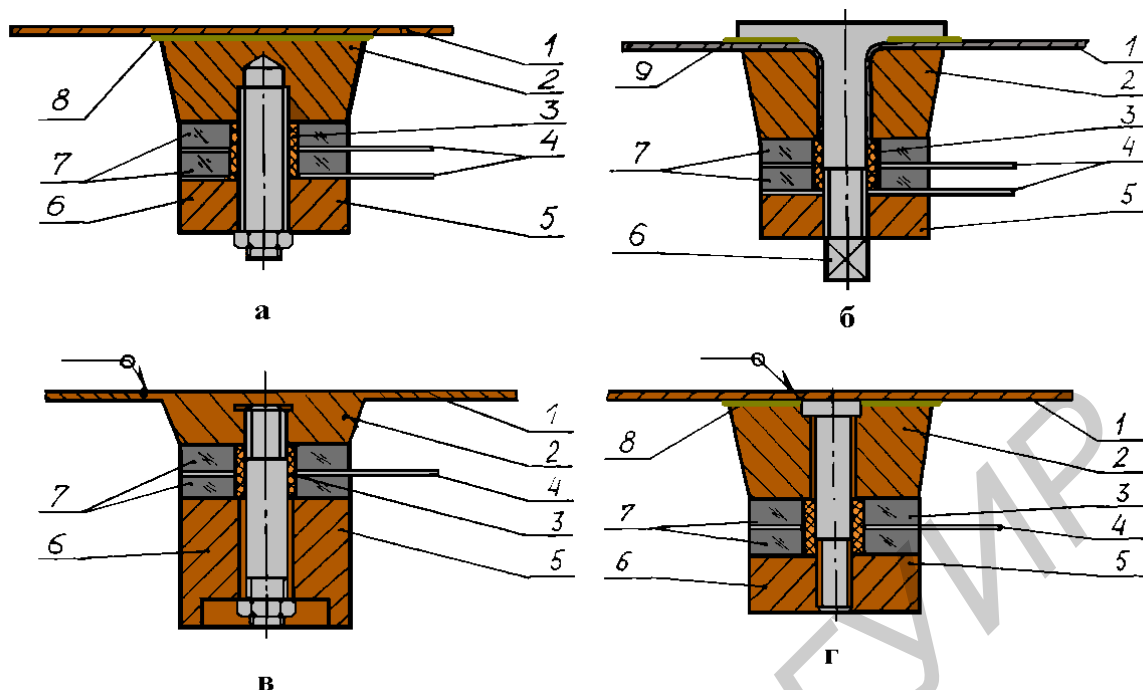


Рис. 5. Способы крепления ППП:

1 – стенка ванны, 2 – излучатель, 3 – изолирующая втулка, 4 – лепесток, 5 – отражатель, 6 – армирующий элемент, 7 – пьезопреобразователи, 8 – клей, 9 – прокладка

Этот феномен называется акустическим коротким замыканием и такая пластина аналогична идеальному жёсткому экрану [5]. Скорость распространения изгибных волн в пластине определяется выражением:

$$C_{изг.} = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 E}{3\rho (1 - G^2)}} \sqrt{d \cdot f}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\rho$  – плотность материала пластины,  $G$  – коэффициент Пуассона,  $d$  – толщина пластины,  $f$  – частота колебаний.

Тогда критерий выбора оптимальной толщины стенок ванны или погружной акустической системы будет иметь вид:

$$d_{opt} \leq \frac{C_{изг.}^2}{\pi \cdot f} \sqrt{\frac{3\rho (1 - G^2)}{E}}. \quad (2)$$

В тех случаях, когда по условиям прочности толщина стенок ванны должна быть больше  $d_{opt}$ , преобразователи необходимо устанавливать на отдельных съёмных панелях или использовать погружные акустические системы.

Как правило, УЗ ванны изготавливают из коррозионно-стойких высоколегированных хромоникелевых сталей марок 12X18H10T, X18H9T или титановых сплавов марок ВТ-3, ВТ-41, которые обладают высокой химической кавитационной стойкостью. Хромоникелевые стали обладают хорошей пластичностью при холодном деформировании и удовлетворительной свариваемостью, что облегчает качественное изготовление ванн, имеющих форму любой степени сложности. Кроме того, они значительно дешевле титановых сплавов и характеризуются большими колебатель-



ными скоростями, а это при постоянном сопротивлении излучения позволяет получать более высокие значения звукового давления в моющей среде.

Для повышения эрозионно-кавитационной стойкости ванн и эффективности преобразования электрической энергии в акустическую, внутренние поверхности стенок ванн полируют, поскольку дефекты на излучающей поверхности являются стабильными центрами адгезии молекул воздуха, которые могут действовать как зародыши кавитации. Шероховатость излучающей поверхности приводит к уменьшению порогового значения колебательной скорости, при которой в моющей среде начинает развиваться кавитация, что снижает эффективность преобразования электрической энергии в акустическую и эффективность установки в целом.

УЗ ванны фирмы Elmasonic (рис. 6) имеют объем от 82 до 180 литров, подогрев жидкости от 30 до 80 градусов, мощность излучателей от 1,8 до 3,2 кВт.



**Рис. 6.** УЗ ванны TI-N-80 (слева) TI-N-160 (справа)

### **КАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВАННАХ**

Для оценки интенсивности кавитации в жидких средах используют методы, основанные на сравнении параметров образцов до и после воздействия на них кавитации; регистрации температурных полей или специальной обработке возникающих акустических сигналов в зоне обработки.

С помощью тестовых образцов, закрепляя их в определенном месте рабочего объема и сохраняя время выдержки постоянным, можно количественно исследовать зависимость эрозии от свойств жидкости и параметров УЗ поля, однако ошибка при исследовании кавитационной области составляет до 25 %. Малая точность метода объясняется неоднородностью кавитационной области, изменением ее расположения в объеме жидкости и другими случайными факторами.

Оценка эрозионной активности кавитационной области значительно облегчается, если в качестве образца используют тонкую алюминиевую фольгу толщиной 0,05 мм. Эрозионную активность оценивают по степени разрушения фольги, помещаемой в УЗ ванну параллельно поверхности излучателя на расстояния 5–10 мм до излучателя. После испытаний фольгу высушивают на воздухе и определяют площадь разрушений емкостным методом. Недостатки метода заключаются в длительности измерений и в отсутствии непрерывного контроля процесса кавитации.

Кавитационное поле в жидкостях имеет сложный спектральный состав, поскольку в случайные моменты времени возникает и захлопывается множество пузырьков и вызванное ими акустическое излучение проявляется в виде широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен Гц до сотен кГц. На фоне сплошного спектра кавитационного шума наблюдаются отдельные дискретные субгармонические компоненты, отражающие частотный спектр поля, что является характерным признаком кавитации и используется для регистрации ее возникновения [6].

Спектральный анализ формы сигналов путем разложения в ряд Фурье позволил выделить спектральные линии, соответствующие основной частоте воздействия, ее гармоникам, субгармоникам и ультрагармоникам колебаний полости. Помимо основной частоты и гармоник высоких частот  $nf_0$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) в спектре содержатся серии субгармоник  $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$  и имеет место сплошной "белый" шум, генерируемый кавитационными пузырьками различных резонансных размеров.

Для спектрального исследования кавитационного шума в диапазоне 20 кГц–50 МГц использован анализатор спектра С4-54. В кавитационную область жидкости в УЗ ванне погружался волноводный датчик, сигнал с которого усиливался и подавался на анализатор. Основная частота колебаний преобразователя контролировалась частотомером ЧЗ-34. Анализ спектрограмм показал, что максимальный прирост в кавитационном спектре при увеличении излучаемой мощности дает сплошной шум, а также субгармоники. Наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты УЗ преобразователя (рис. 7).

При настройке УЗ ванны вначале оценивают амплитуду колебаний каждого УЗ преобразователя с помощью контактного измерителя вибраций (рис.8,а). Для оценки кавитационного давления в жидкой среде измеряют квадратичную величину уровня шумов в диапазоне его наибольшей спектральной плотности с помощью кавитометра [7], состоящего из датчика, полосового фильтра, квадратичного детектора и регистрирующего прибора.

Кавитометр (рис. 8,б) измеряет кавитационные давления от 5 до  $5 \cdot 10^4$  Па в диапазоне частот 18 – 60 кГц с точностью  $\pm 10\%$ . Давление в кавитационной области воспринимается металлическим щупом, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем. Электрический сигнал с преобразователя поступает на усилитель, расположенный в корпусе датчика и служащий для согласования высокоомной цепи преобразователя с входом прибора. Атенюатор на входе измерительного прибора, ослабляет входной сигнал с датчика при большой мощности УЗ. Полосовой фильтр, выполненный по схеме Чебышева третьего порядка, выделяет часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. Далее сигнал через квадратичный детектор, усилитель постоянного тока и подается на стрелочный прибор. Показания прибора регистрируют через 1 – 2 с, когда процесс кавитации принимает устойчивый характер.

Исследованы зависимости кавитационного давления от температуры среды и концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) в растворе. С повышением температуры кавитационное давление уменьшается, поскольку повышается упругость пара в полостях и снижается их кинетическая энергия, что приводит к уменьшению интенсивности ударных волн (рис. 9). Параллельно происходит образование



новых, в основном заполненных паром пузырьков, что приводит к расширению области кавитации и уменьшению неравномерности ее распределения.

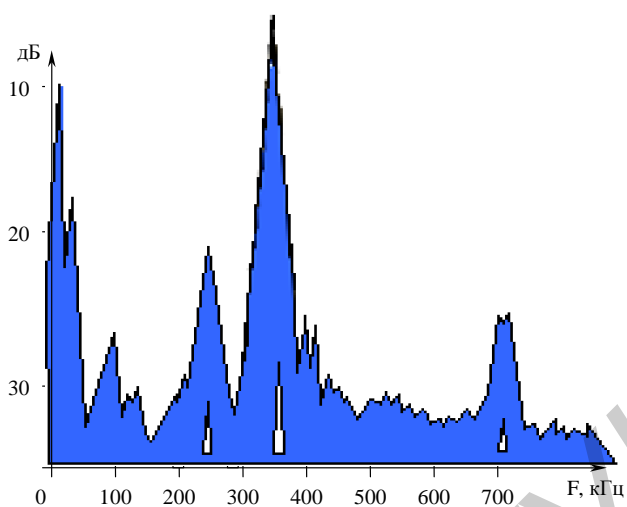


Рис. 7. Спектр кавитационного шума в воде



а

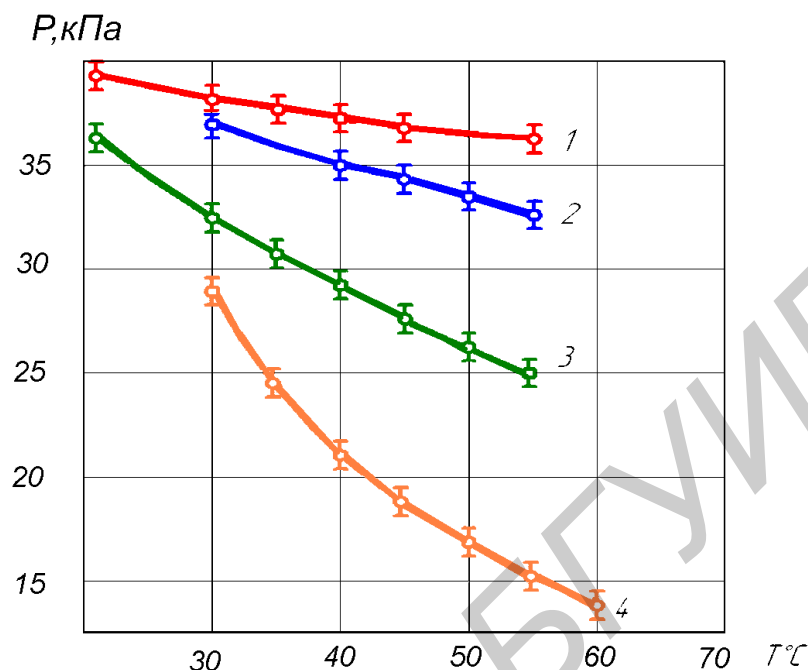
б

Рис. 8. Измеритель УЗ вибраций (а) и кавитометр (б)

Скорость уменьшения кавитационного давления по мере роста температуры моющей среды зависит от ее физико-химических свойств. Так, для чистой воды (зависимости 1 и 2) скорость изменения меньше, чем для водных растворов ПАВ (зависимости 3 и 4). ПАВ уменьшают силу поверхностного натяжения, что приводит к снижению порога кавитации, росту числа кавитационных пузырьков и, следовательно, к повышению равномерности кавитационного поля. Однако уменьшение силы поверхностного натяжения приводит к уменьшению скорости захлопывания кавитационных пузырьков и к снижению микроударного действия кавитации. С ростом температуры влияние ПАВ возрастает (кривые 3 и 4).

С увеличением концентрации ПАВ их влияние усиливается, однако увеличивать ее свыше 10% нецелесообразно ввиду трудности последующего удаления. Таким образом, измеряя кавитационное давление можно устанавливать такие режимы,

при которых эффективность воздействия УЗ колебаний и ПАВ будут оптимальными. Для УЗ очистки оптимальная температура моющих сред на основе водных растворах ПАВ находится в пределах 50–60°C, а концентрация ПАВ– 3-4%.



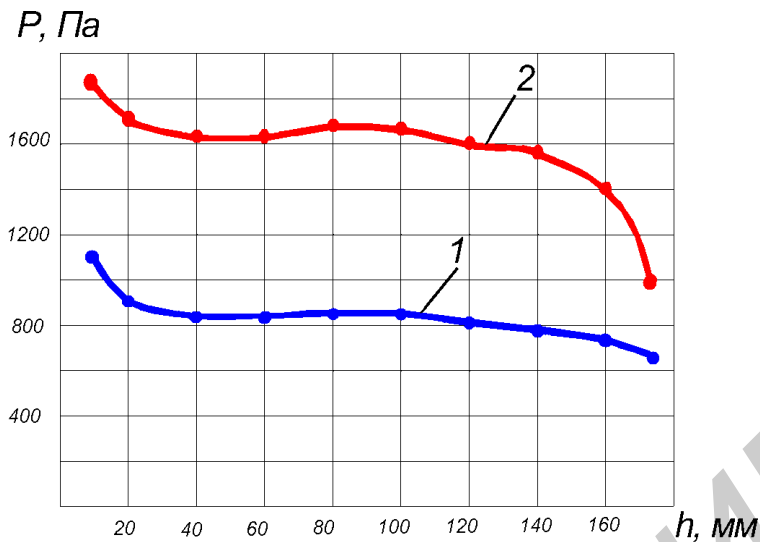
**Рис. 9.** Зависимости кавитационного давления от температуры моющей среды и концентрации ПАВ: 1,2 – 0 %, 3 – 1,5%, 4 – 3%

Оценена неравномерность кавитационного поля в рабочем объеме УЗ ванны с модульным расположением излучающих систем. В качестве показателя неравномерности поля использовано среднеквадратичное отклонение кавитационного давления по площади и глубине ванны, выраженное в процентах.

Площадь ванны разбивалась на участки, в пределах которых измерялось кавитационное давление в пяти точках – в центре и по углам. Измерения проводились в зоне очистки, а также на различных расстояниях от излучателя. Детали располагались перпендикулярно площади излучения. С удалением от излучателя величина кавитационного давления уменьшается (рис.10).

Кассета с изделиями, находящаяся в ванне, уменьшает величину кавитационного давления и снижает неравномерность кавитационного поля. Неравномерность распределения кавитационного поля по площади ванны составляет в среднем 3–5 %, а по глубине 6–10%. Поскольку неравномерность поля по глубине ванны больше, чем по площади, то в установках очистки предусмотрено устройство вертикального циклического перемещения кассеты с изделиями для усреднения воздействия УЗ поля по глубине.

Для поддержания необходимой по технологическому процессу температуры моющего раствора ванны оснащены трубчатыми электронагревательными элементами.



**Рис. 10.** Распределение давления УЗ поля в центре ванны в зависимости от расстояния до излучателя: 1 – при наличии кассеты с деталями; 2 – без нее

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЛИНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Разработанные УЗ ванны применены в механизированных и роботизированных линиях очистки: УП-1, РТКП-1, РТКП-3, «Орфей», что позволило повысить производительность труда, улучшить условия труда, снизить потери и исключить применение пожароопасных веществ. Роботизированный технологический комплекс РТКП-1 (рис. 11) имеет следующие функциональные возможности:

- технологическую гибкостью за счет унификации технологий очистки на основе водных растворов ПАВ с использованием органических композиций;
- программную перенастройку основных и вспомогательных систем и возможностью встраивания в гибкие производственные системы за счет автоматизации всех систем комплекса и управления ими от ПЭВМ;
- автоматическое приготовление моющих растворов, заправку и пополнением уровней в ваннах; фильтрацией, автоматическое смешивание горячей и холодной воды до заданных технологических параметров и подачи в ванны;
- тонкую фильтрацию, подогрев и рециркуляцию воздуха для сушки.

Применение ЭВМ позволило объединить функции аналитического контроля, обработки получаемой информации и управления процессом очистки. Особое внимание уделено удобству обслуживания оборудования и технике безопасности. Значительно сокращена численность обслуживающего персонала, устранен контакт рабочих с моющими растворами. Полностью ликвидирована возможность производственных аварий, связанных с взрыво- и пожароопасностью используемых ранее растворителей, созданы системы регенерации и повторного использования отработанных водных моющих композиций.

Отличительной особенностью РТКП-3 является независимое перемещение при работающем механизме качания, что позволяет производить очистку в ваннах с разными составами и с различным временем. Комбинации модулей и легко перенастраиваемая система управления роботом на микропроцессорной основе позволяют од-

новременно производить очистку поверхности изделий как из химически стойких, так и нестойких материалов.

Для очистки изделий малых серий разработана модульная автоматизированная линия «Орфей», отличительной особенностью которой является оснащение каждого модуля независимыми системами интенсификации технологического процесса и управления, возможностью эксплуатации модулей как порознь, так и в составе технологических линий, высокая производительность, низкое энергопотребление при относительно малой емкости ванн и небольших габаритах. Сравнительные характеристики линий УЗ очистки приведены в табл. 1.



Рис. 11. Роботизированные линии УЗ очистки: РТКП-1 (а) и ОРФЕЙ (б)

Таблица 1. Характеристики автоматизированных линий УЗ очистки

Наименование показателя	УП-1	РТКП-1	РПТК-3	Орфей
Производительность, шт/ч	2800	5500	7800	2500
Диаметр деталей, мм	10-80	10-90	10-220	10-90
Мощность потребляемая, кВт	60	80	28	11
Частота УЗ, кГц	44	44	44	44
Мощность УЗ генератора, Вт	300	300	300	300
Частота качания, Гц	0,5	0,5	0,4	0,4
Амплитуда качания, мм	50	50	50	40
Диапазон температур, °С	20-100	25-100	25-80	20-80
Емкость ванн, л	24	34	50	14
Количество ванн	10	11	10	10
Количество УЗ ванн	5	6	4	5
Габаритные размеры, мм	7,0x3,6x2,6	7,6x4,8x2,6	6,8x1,0x2,0	3,6x0,8x1,2
Масса установки, кг	1800	2800	1200	800

Серийно выпускаемые автоматизированные линии очистки электронных и электронно–оптических изделий позволили существенно повысить производительность труда, улучшить условия труда, снизить потери и исключить применение пожароопасных веществ.

## Литература

1. **Savage T.** Ultrasonic cleaning in industry.– Wire Industry, 2005, №6, p. 424-426.
2. **Fuchs F.J.** The Key to Ultrasonics–Cavitation and Implosion.–Precision Cleaning, 1995, №3(10), p. 13-17.
3. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский, А.П. Достанко, В.С. Томаль.Т.2.–Мн.: Бест-принт, 2003.
4. **Томаль В.С.** Ультразвуковое оборудование для процессов удаления загрязнений с микрорельефных поверхностей электронно-оптических изделий. – Доклады БГУИР, 2006, №3, с.40–45.
5. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната.–М.: Металлургия, 1984.
6. **Пуиhev V.I., Koretz V.L., Melnicov N.P.** Spectral characteristics of acoustic cavitation. – Ultrasonics, 1989, № 27, p. 357-361.
7. **Ланин В.Л., Томаль В.С.** Оптимизация кавитационных полей в ультразвуковых ваннах очистки. – Доклады НАН Беларуси, 2007, Т. 51, №3, С. 119–121.

### КАРТОЧКА АВТОРОВ

- |                    |   |
|--------------------|---|
| 1. Фамилия:        | <b>Ланин</b>  |
| 2. Имя:            | Владимир  |
| 3. Отчество:       | Леонидович  |
| 4. Должность:      | Профессор кафедры “Электронная техника и технология”<br>Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, р. тел. +375-17-239-88-88,<br>E-mail: <a href="mailto:vlanin@bsuir.unibel.by">vlanin@bsuir.unibel.by</a> |
| 5. Ученая степень: | доктор технических наук   |
| 6. Домашний адрес: | 220116, г. Минск, ул. Алибегова, д. 3, кв. 24 тел.  |

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Фамилия:            | <b>Томаль</b>   |
| 2. Имя:                | Владимир  |
| 3. Отчество:           | Степанович  |
| 4. Должность:          | главный инженер РУП “Оптическое станкостроение и вакуумная техника” E-mail: <a href="mailto:os_vt@mail.belpak.by">:os_vt@mail.belpak.by</a> |
| 5. Ученая степень:     | –   |
| 6. Адрес для переписки | ул. Филимонова, 25, 220114, Минск, Беларусь , р. тел. (017)-264-31-80 , 264-03-73   |
| 7. Домашний адрес:     | ул. Кольцова, 38, кв.46, 220131, г. Минск, Беларусь   |