

Ультразвуковая очистка. Теория и практика

При всей сложности теории ультразвука, разобраться в принципах ультразвуковой очистки поверхностей не так уж сложно. Эта статья адресована тем, кто хочет получить представление об основных явлениях, используемых в акустических технологиях очистки, а главное – понять, “как эта штука работает”, какими критериями можно руководствоваться при выборе оборудования, мощных сред и режимов обработки.

Технологии очистки постоянно совершенствуются. Широко используемая в России спирто-бензиновая смесь для отмывки плат от остатков флюса и технологических загрязнений теряет эффективность по мере уменьшения размеров компонентов. В уменьшающихся пазухах и зазорах нет нужного обмена раствора, чтобы вымыть оттуда технологические загрязнения. Желание улучшить отмывку увеличением ее времени приводит к вымыванию связующего, образованию белесоватого налета на поверхности плат. Практикуемая за рубежом конденсационная очистка, использующая хлорированные и фторированные углеводороды, наносит вред экологии нашей планеты и в перспективе исчезнет. В то же время требования к качеству очистки непрерывно повышаются. Чистота стала актуальным фактором качества во многих отраслях промышленности, чего не было в прошлом. В электронной индустрии, где чистота была всегда важна, она стала еще более критическим фактором в обеспечении состоятельности высоких технологий. Создается впечатление, что каждое усовершенствование технологии требует все большего и большего внимания к чистоте для его реализации. В результате технологии очистки в течение последних нескольких лет были критически пересмотрены. Многие из них теперь основаны на использовании ультразвуковых методов очистки.

Действительно, какие бы эффективные моющие растворы не использовались, без добавления акустической энергии ультразвука нет возможности обеспечить заданный уровень очистки.

Что такое ультразвук?

Ультразвук (УЗ) — упругие колебания и волны, частота которых выше 15...20 кГц. Нижняя граница области ультразвуковых частот, отделяющая ее от области слышимого звука, определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной. Верхняя граница обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться лишь в материальной среде, то есть при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газах или межатомных расстояний в жидкостях и твердых телах. Поэтому в газах верхнюю границу частот УЗ определяют из усло-

вия приблизительного равенства длины звуковой волны и длины свободного пробега молекул. При нормальном давлении она составляет 10^9 Гц. В жидкостях и твердых телах определяющим является равенство длины волны межатомным расстояниям, и граничная частота достигает 10^{12} — 10^{13} Гц. В зависимости от длины волны и частоты УЗ обладает специфическими особенностями излучения, приема, распространения и применения, поэтому область ультразвуковых частот удобно подразделить на три подобласти:

низкие — $1,5$ — $10 \dots 10^5$ Гц;
средние — $10^5 \dots 10^7$ Гц;
высокие — $10^7 \dots 10^9$ Гц.

Упругие волны с частотами $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^{13}$ Гц принято называть гиперзвуком.

Теория звуковых волн

Ультразвук как упругие волны

Ультразвуковые волны по своей природе не отличаются от упругих волн слышимого диапазона, а также от инфразвуковых волн.

Распространение ультразвука подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона частот, обычно называемых звуковыми волнами. К основным законам их распространения относятся законы отражения и преломления звука на границах различных сред, дифракция и рассеяние звука при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах, законы волноводного распространения в ограниченных участках среды.

Специфические особенности ультразвука

Хотя физическая природа УЗ и управляющие его распространением основные законы те же, что и для звуковых волн любого диапазона частот, он обладает рядом специфических особенностей, определяющих его значимость в науке и технике. Они обусловлены его относительно высокими частотами и, соответственно, малой длиной волны. Так, для высоких ультразвуковых частот длины волн составляют:

- в воздухе — $3,4 \cdot 10^{-3} \dots 3,4 \cdot 10^{-5}$ см;
- в воде — $1,5 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ см;
- в стали — $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ см.

Такая разница значений ультразвуковых волн (УЗВ) обусловлена различны-

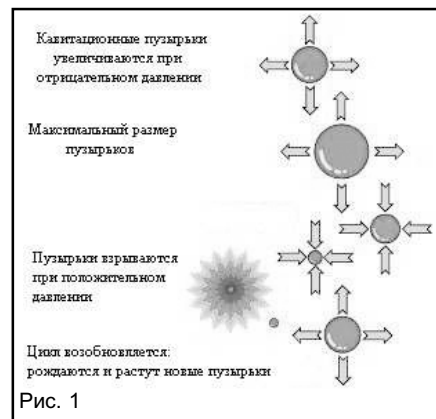
ми скоростями их распространения в различных средах. Для низкочастотной области УЗ длины волн не превышают в большинстве случаев нескольких сантиметров и лишь вблизи нижней границы диапазона достигают в твердых телах нескольких десятков сантиметров.

УЗВ затухают значительно быстрее, чем волны низкочастотного диапазона, так как коэффициент поглощения звука (на единицу расстояния) пропорционален квадрату частоты.

Еще одна весьма важная особенность УЗ — возможность получения высоких значений интенсивности при относительно небольших амплитудах колебательного смещения, так как при данной амплитуде интенсивность прямо пропорциональна квадрату частоты. Амплитуда колебательного смещения на практике ограничена прочностью акустических излучателей.

Важнейшим нелинейным эффектом в ультразвуковом поле является кавитация — возникновение в жидкости массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью. Сложное движение пузырьков, их захлопывание, слияние друг с другом и т. д. порождают в жидкости импульсы сжатия (микроударные волны) и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. Эти эффекты оказывают влияние на вещество: происходит разрушение находящихся в жидкости твердых тел (кавитационная эрозия), иницируются или ускоряются различные физические и химические процессы (рис. 1).

Изменяя условия протекания кавитации, можно усиливать или ослаблять



различные кавитационные эффекты. Например, с ростом частоты УЗ увеличивается роль микропотоков и уменьшается кавитационная эрозия, с увеличением гидростатического давления в жидкости возрастает роль микроударных воздействий. Увеличение частоты обычно приводит к повышению порогового значения интенсивности, соответствующего началу кавитации, которое зависит от рода жидкости, ее газосодержания, температуры и пр. Для воды в низкочастотном ультразвуковом диапазоне при атмосферном давлении оно обычно составляет $0,3$ — 1 Вт/см³.

Источники ультразвука

В природе УЗ встречается в составе многих естественных шумов (в шуме ветра, водопада, дождя, в шуме гальки, перекачиваемой морским прибоем, в звуках, сопровождающих грозовые разряды, и т. д.), а также в мире животных, использующих его для эхолокации и общения.

Технические излучатели ультразвука, используемые при изучении УЗВ и их технических применениях, можно подразделить на две группы. К первой относятся излучатели-генераторы (свистки). Колебания в них возбуждаются из-за наличия препятствий на пути постоянного потока — струи газа или жидкости. Вторая группа излучателей — электроакустические преобразователи: они преобразуют уже заданные электрические колебания в механические колебания какого-либо твердого тела, которое и излучает в окружающую среду акустические волны.

Применение ультразвука

Многообразные применения УЗ, при которых используются различные его особенности, можно условно разбить на три направления. Первое связано с получением информации посредством УЗВ, второе — с активным воздействием на вещество и третье — с обработкой и передачей сигналов (направления перечислены в порядке их исторического становления).

Принципы ультразвуковой очистки

Основную роль при воздействии УЗ на вещества и процессы в жидкостях играет кавитация. На кавитации основан получивший наибольшее распространение ультразвуковой технологический процесс — очистка поверхностей твердых тел. В зависимости от характера загрязнений большее или меньшее значение могут иметь различные проявления кавитации, такие как микроударные воздействия, микропотоки, нагревание. Подбирая параметры звукового поля, физико-химические свойства моющей жидкости, ее газосодержание, внешние факторы (давление, температуру), можно в широких пределах управлять процессом очистки, оптимизируя его применительно к типу загрязнений и виду очищаемых деталей. Разновидностью очистки является травление в ультразвуковом поле, где действие УЗ совмещается с действием сильных химических реагентов. Ультразвуковая металлизация и пайка основываются фактически на ультразвуковой очистке (в т. ч. от окисной пленки) соединяемых или металлизированных поверхностей. Очистка при пайке (рис. 2) обусловлена кавитацией в расплавленном металле. Степень очистки при этом так высока, что образуются соединения неспаиваемых в обычных условиях материалов, например, алюминия с другими металлами,

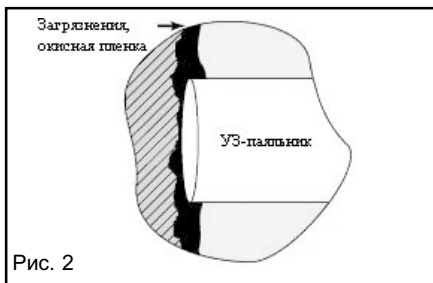


Рис. 2

различных металлов со стеклом, керамикой, пластмассами.

В процессах очистки и металлизации существенное значение имеет также звукокапиллярный эффект, обеспечивающий проникновение мощного раствора или расплава в мельчайшие трещины и поры.

Механизмы очистки и отмывки

Очистка в большинстве случаев требует, чтобы загрязнения были растворены (в случае растворяемых солей), счищены (в случае нерастворимых солей) или растворены, и счищены (как в случае нерастворимых частиц, закреплённых в слое жировых пленок). Механические эффекты ультразвуковой энергии могут быть полезны как для ускорения растворения, так и для отделения частиц от очищаемой поверхности. Ультразвук также можно эффективно использовать в процессе ополаскивания. Остаточные химикаты моющих сред могут быть быстро удалены ультразвуковым ополаскиванием.

При удалении загрязнений растворением, растворителю необходимо войти в контакт с загрязняющей пленкой и разрушить ее (рис. 3, а). По мере того как растворитель растворяет загрязнение, на границе растворитель-загрязнение возникает насыщенный раствор загрязнения в растворителе, и растворение останавливается, поскольку нет доставки свежего раствора к поверхности загрязнения (рис. 3, б).

Воздействие ультразвука разрушает слой насыщенного растворителя и обеспечивает доставку свежего раствора к поверхности загрязнения (рис. 3, в). Это особенно эффективно, в тех случаях, когда очистке подвергаются "неправильные" поверхности с лабиринтом

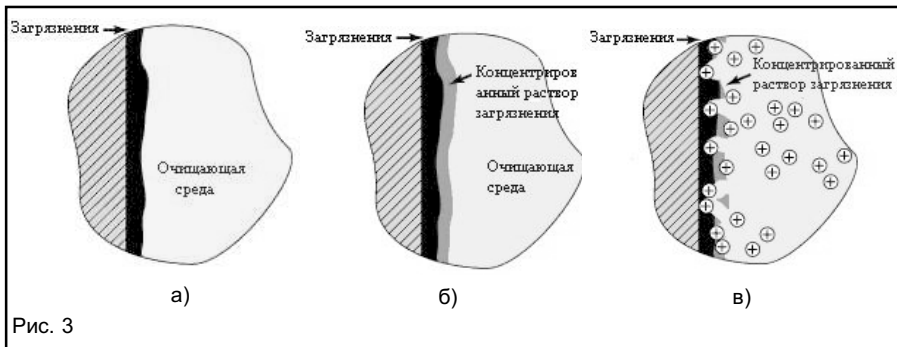


Рис. 3

пазух и рельефа поверхности, к которым относятся печатные платы и электронные модули.

Некоторые загрязнения представляют собой слой нерастворимых частиц, прочно сцепленный с поверхностью силами ионной связи и адгезии. Эти частицы достаточно только отделить от поверхности, чтобы разорвать силы притяжения и перевести их в объем моющей среды для последующего удаления. Кавитация и акустические течения срывают с поверхности загрязнения типа пыли, смывают и удаляют их (рис. 4).

Загрязнения, как правило, многокомпонентны и могут в комплексе содержать растворимые и нерастворимые компоненты. Эффект УЗ в том и состоит, что он эмульгирует любые компонен-

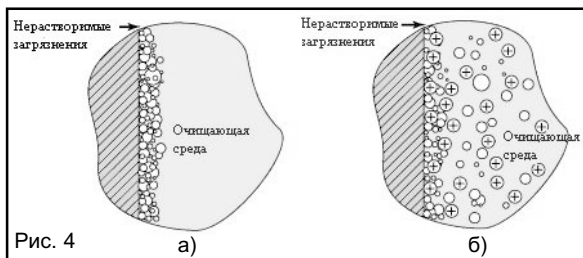


Рис. 4

ты, то есть переводит их в моющую среду и вместе с ней удаляет их с поверхности изделий.

Чтобы ввести ультразвуковую энергию в систему очистки необходим УЗ-генератор, преобразователь электрической энергии генератора в УЗ-излучение и измеритель акустической мощности.

Электрический ультразвуковой генератор конвертирует электрическую энергию сети в электрическую энергию на ультразвуковой частоте. Это выполняется известными способами и не имеет какой-либо специфики. Однако, предпочтительнее использовать цифровую технику генерации, когда на выходе получают прямоугольные импульсы чередующейся полярности (рис. 5). КПД таких генераторов близок к 100%, что позволяет решить проблему энергоёмкости процесса. Использование сигнала прямоугольной формы приводит к акустическому излучению, богатому гармониками. Преимуществом многочастотной системы очистки состоит в том, что в объеме моющей среды не образуется "мертвых" зон в узлах

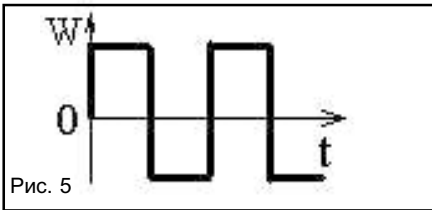


Рис. 5

интерференции. Поэтому многочастотное УЗ-облучение позволяет располагать объект очистки практически в любой зоне УЗ-ванны.

Другим приемом избавления от "мертвых" зон является использование генератора с качающейся частотой (рис. 6). В этом случае узлы и пучности интерференционного поля перемещаются на различные точки очищающей системы, не оставляя без облучения какие-либо участки для очистки. Но КПД таких генераторов относительно низкий.

Имеются два общих типа ультразвуковых преобразователей: магнито-стрикционный и пьезоэлектрический. Они оба выполняют одинаковую задачу преобразования электрической энергии в механическую.

В магнито-стрикционных преобразователях (рис. 7) используют эффект

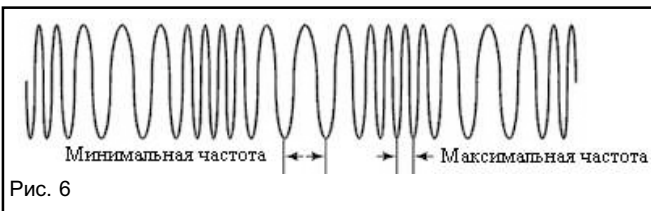


Рис. 6

магнито-стрикции, при котором некоторые материалы изменяют линейные размеры в переменном магнитном поле.

Электрическая энергия от ультразвукового генератора сначала преобразуется обмоткой магнито-стриктора в переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле, в свою очередь, порождает механические колебания ультразвуковой частоты за счет деформации магнитопровода. Поскольку магнито-стрикционные матери-

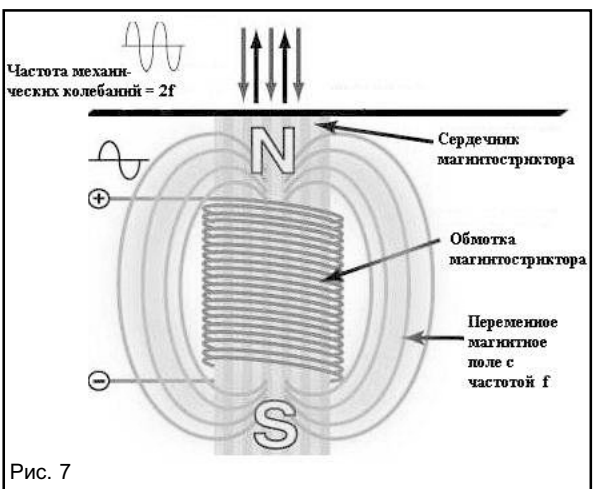


Рис. 7

алы ведут себя подобно электромагнитам, частота их деформационных колебаний в два раза выше частоты магнитного, а, значит, и электрического поля.

Электромагнитным преобразователям свойственен рост потерь энергии на вихревые токи и перематывание с ростом частоты. Поэтому мощные магнито-стрикционные преобразователи редко используют на частотах выше 20 кГц. Пьезо-преобразователи, напротив, могут хорошо излучать в мегагерцовом диапазоне. Магнито-стрикционные преобразователи вообще менее эффективны, чем их пьезоэлектрические аналоги. Это обусловлено, прежде всего, тем, что магнито-стрикционный преобразователь требует двойного энергетического преобразования: из электрического в маг-

нитное и затем из магнитного в механическое. Потери энергии происходят на каждом преобразовании. Это уменьшает КПД магнито-стрикторов.

Пьезо-преобразователи (рис. 8) конвертируют электрическую энергию прямо в механическую за счет использования пьезоэлектрического эффекта, при котором некоторые материалы (пьезоэлектрики) изменяют линейные размеры при приложении электрического поля. Раньше для пьезо-излучателей использовали такие пьезоэлектрические материалы как природные кристаллы кварца и синтезируемый титанат бария, которые были хрупкими и нестабильными, а потому и ненадежными. В современных преобразователях используют более прочные и высокоста-

бильные керамические пьезоэлектрические материалы. Подавляющее большинство систем УЗ-очистки используют сегодня пьезоэлектрический эффект.

Оборудование ультразвуковой очистки

Диапазон используемого оборудования ультразвуковой очистки очень широк: от малых настольных модулей в стоматологии, ювелирных магазинах, электронной индустрии до огромных систем с объемами

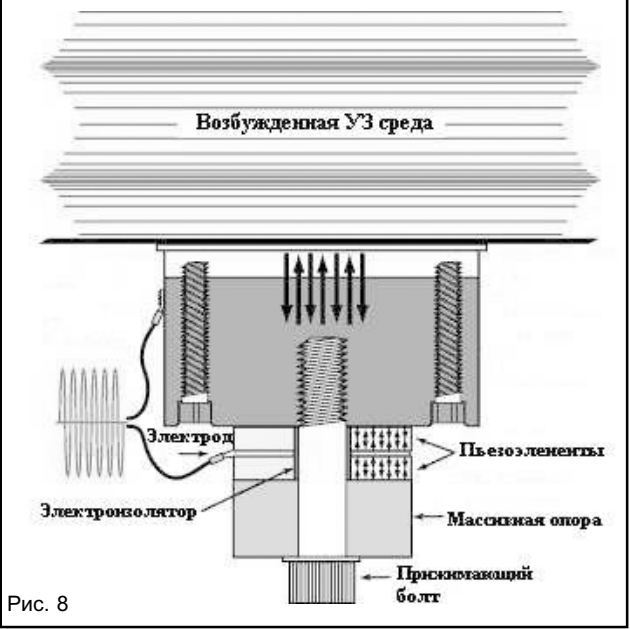


Рис. 8

в несколько тысяч литров в ряде промышленных применений.

Правильный выбор необходимого оборудования имеет первостепенное значение в успехе применения ультразвуковой очистки. Самое простое применение УЗ-очистки может потребовать всего лишь нагретой моющей жидкости. Более сложные системы очистки требуют большого количества ванн, последние из которых должны быть наполнены дистиллированной или деионизированной водой. Самые большие системы используют погружаемые ультразвуковые преобразователи, комбинация которых может облучить ванны почти любого размера. Они обеспечивают максимальную гибкость и легкость в использовании и обслуживании. Ультразвуковые ванны с подогревом моющего раствора наиболее часто применяются в лабораториях, медицине, ювелирном деле.

Линии УЗ-очистки (рис. 9), используемые в крупном производстве, объединяют в одном корпусе электрические УЗ-генераторы, УЗ-преобразователи, транспортную систему перемещения объектов очистки по ваннам и систему управления.

УЗ-ванны могут быть включены в линию химико-гальванической металлизации с использованием модульных погружаемых ультразвуковых преобразователей.

Системы УЗ-очистки

При выборе системы очистки особенно важно обращать внимание на те характеристики, которые позволяют наиболее эффективно использовать ее. В первую очередь важно определить факторы интенсивности ультразвуковой кавитации в моющей жидкости. Температура жидкости – наиболее важный фактор, обеспечивающий интенсивность кавитации. Изменения температуры приводят к изменениям вязкости, растворимости газа в жидкости, скорости диффу-

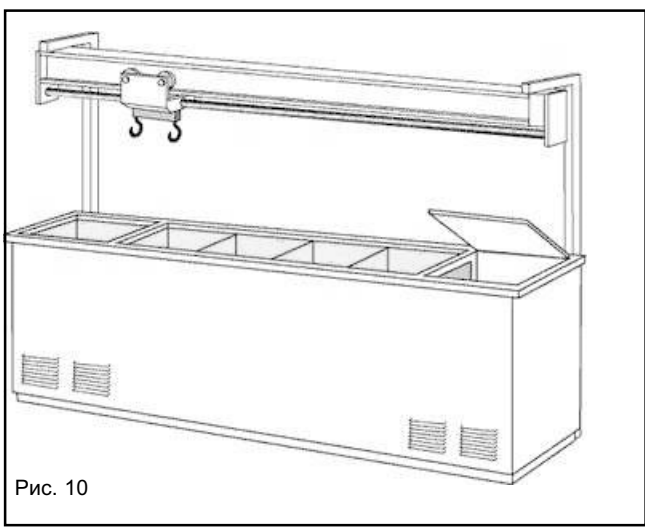


Рис. 10

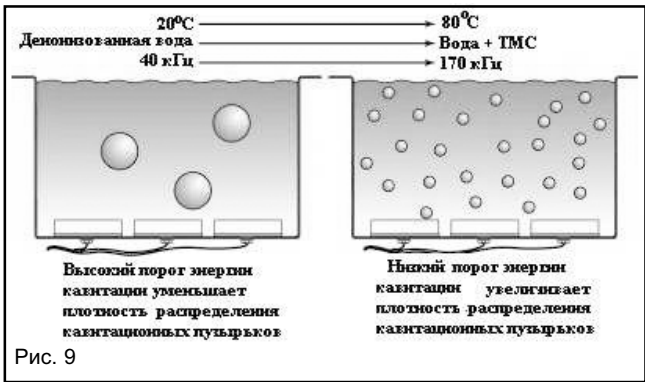


Рис. 9

зии растворенных газов в жидкости и давлении пара. Все они влияют на интенсивность кавитации (рис. 10, 11). Вязкие жидкости инерционны и не могут реагировать достаточно быстро, чтобы формировать кавитационные пузырьки и сильные акустические течения. Для наиболее эффективной кавитации очищающая жидкость должна содержать как можно меньше растворенного газа. Газ, растворенный в жидкости, выходит во время пузырьковой фазы роста кавитации и ослабляет ее взрывной эффект, который необходим для ожидаемого эффекта ультразвукового воздействия. Количество растворен-

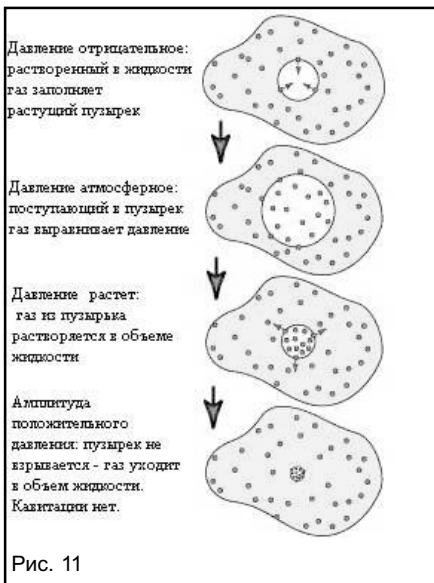


Рис. 11

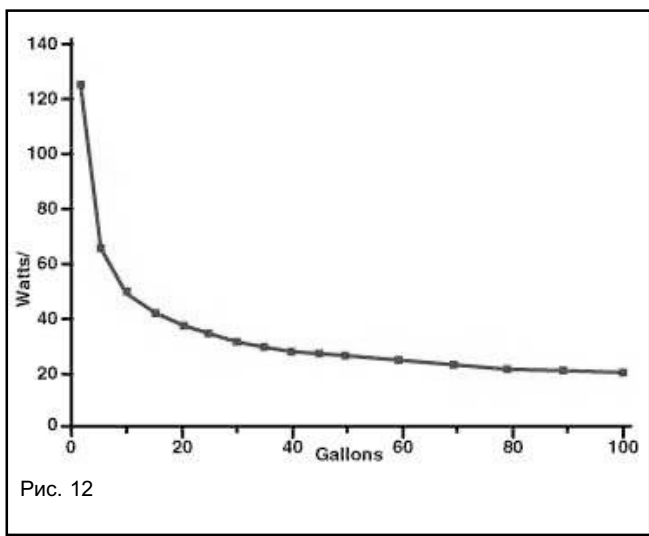


Рис. 12

ного газа в жидкости уменьшается с увеличением температуры. Скорость диффузии растворенных газов в жидкости также увеличивается при более высоких температурах. Поэтому предпочтение отдают очистке в подогретых моющих растворах. Парообразная кавитация, в

которой кавитационные пузырьки заполнены паром жидкости, является наиболее эффективной.

Интенсивность кавитации прямо связана с мощностью ультразвукового облучения. Обычно ее устанавливают выше кавитационного порога. Интенсивность кавитации обратно пропорциональна ультразвуковой частоте: с увеличением ультразвуковой частоты уменьшаются размеры кавитационных пузырьков и их результирующее воздействие на очищаемую поверхность. Компенсировать уменьшение интенсивности ультразвукового воздействия с увеличением частоты можно только увеличением мощности облучения.

Обеспечение максимального эффекта очистки

Удачный выбор моющих сред – залог успеха в процессе ультразвуковой очистки. В первую очередь выбранный состав должен быть совместим с материалами очищаемых поверхностей. Наиболее подходят для этого водные растворы технических моющих средств. Как правило, это обычные поверхностно активные вещества (ПАВ).

Дегазация моющих растворов чрезвычайно важна в достижении удовлетворительных результатов очистки. Свежие растворы или растворы, которые накануне были охлаждены, должны быть дегазированы перед процессом очистки. Дегазация выполняется нагревом жидкости и предварительным об-

лучением ванны ультразвуком. Время, заданное для дегазации жидкости, составляет от нескольких минут для ванн малого размера до часа или больше для большого резервуара. Ненагретый резервуар может дегазироваться несколько часов. Признаком закончившейся дегазации являются отсутствие видимых пузырьков газа, перемещающихся к поверхности жидкости, и отсутствие видимой пульсации пузырьков.

Мощность ультразвукового облучения должна сопоставляться с объемом ванны (рис. 13). Очистка массивных объектов или имеющих большое отношение поверхности к массе, может требовать дополнительной ультразвуковой мощности. Чрезмерная мощность может вызывать кавитационную эрозию или “сжигающий” эффект на мягких поверхностях. Если очищаются объекты с разнородными поверхностями, мощность облучения рекомендуется установить по менее прочному компоненту.

Важно правильно размещать очищаемые объекты в ванне. Погружаемые устройства не должны экранировать объекты от воздействия ультразвука. Твердые материалы обычно обладают хорошей звукопроводностью и не экранируют объект очистки. Вместе с тем, объекты очистки нужно постоянно ориентировать или вращать их во время очистки так, чтобы полностью очистить внутренние пазухи и глухие отверстия.

Должным образом используемая ультразвуковая технология обеспечивает большую скорость и высокое качество очистки поверхностей. Отказ от использования растворителей за счет применения водных сред удешевляет процесс и наиболее эффективно решает экологические проблемы. Ультразвук — это не технология будущего, это технология сегодняшнего дня.

Аркадий Медведев,
 medvedev@main.elserv.ru
 medvedevam@mtu-net.ru