

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ НАПРАВЛЕННЫМ ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)*

Кавитационные процессы в жидких средах, возникающие в мощных ультразвуковых полях, сопровождаются электрическими явлениями. К последним относятся электрические разряды в захлопывающихся полостях, сонолюминесценция и электрокинетические процессы [1–3]. Массоперенос в жидких средах под воздействием ультразвукового (УЗ) поля связан с проявлением электрокинетического эффекта, который заключается в том, что в УЗ поле увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, происходит их направленный массоперенос от излучателя под действием давления УЗ волны [4]. При захлопывании кавитационных полостей возможно образование дополнительных носителей – отрицательно заряженных кавитационных пузырьков, также участвующих в массопереносе. Поскольку в жидкой среде одновременно находятся заряженные частицы различной концентрации и подвижности, то суммарная плотность потока частиц в единицу времени составит:

$$J_{\text{эн}} = \sum_{i=1}^n B_{ui} \cdot C_{ui} \cdot F, \quad (1)$$

где  $B_u$  – подвижность иона,  $C_u$  – концентрация ионов реакционно-активного компонента,  $F$  – сила УЗ поля.

Величина тока, обусловленная возникновением электрического поля в жидкой среде,

$$I = \sum_{i=1}^n B_{ui} \cdot C_{ui} \cdot Q_{ui} \cdot F \cdot S, \quad (2)$$

где  $Q_u$  – заряд иона,  $S$  – площадь сечения действия электрического тока.

Сила УЗ поля, вызывающая движение заряженных частиц, определяется как

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S, \quad (3)$$

где  $\rho c$  – волновое сопротивление среды,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $A$  – амплитуда колебаний.

Тогда величина тока электропереноса в УЗ поле равна:

$$I = \sum_{i=1}^n B_{ui} \cdot C_{ui} \cdot Q_{ui} \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S^2. \quad (4)$$

Полученное выражение не учитывает динамики процесса электропереноса во времени, но позволяет определить максимальную величину тока в зависимости от параметров УЗ поля и свойств жидкой среды. При концентрации ионов водного раствора в зоне воздействия УЗ колебаний до  $3 \cdot 10^5$ , подвижности ионов  $(1,8-3,2) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с·В и амплитуде колебаний 10 мкм величина максимального тока электропереноса в полярных растворах составит 20–30 мА, а в слабополярных – на порядок ниже.

Для исследования электрокинетического эффекта УЗ колебания частотой 22 кГц возбуждались в жидкостях амплитудой 10–12 мкм с помощью излучателя поршневого типа. Величина постоянного тока, возникающего в жидкости, регистрировалась микроамперметром типа Ф116/1, подключенным между излучателем и электродом из нержавеющей стали, расположенным на дне емкости с исследуемой жидкостью. Наибольшее проявление электрокинетического эффекта в виде роста величины постоянного тока наблюдается у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью [5]. Анализ данных (см. таблицу) показывает, что время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости. Максимальный эффект увеличения тока отмечен при расстоянии 5–7 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными

пузырьками (рис. 1). При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях больше 7 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает ввиду ограниченных размеров кавитационной области для данного типа излучателя.

*Характеристики электрокинетического эффекта в жидких средах в УЗ поле*

Жидкая среда	Электросопротивление, Ом·м	Вязкость, Па·с	Изменение тока $\Delta I$ , мА	Время достижения равновесия, с
Масло минеральное	$10^{13}$	3,2–3,3	0	–
Глицерин	$10^{12}$	1,5–1,6	0,06	70
Вода дистиллированная	$10^3$	0,32–0,33	0,6	50
Спирт этиловый	$10^4$	0,24–0,25	1,4	10
Кислота органическая	10	0,24–0,25	2,0	5
Вода с ионами Cl	0,3	0,32–0,33	3,4	3

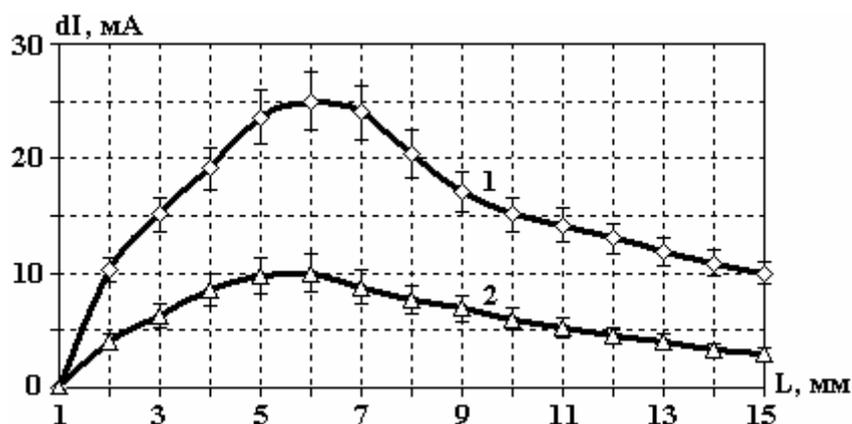


Рис. 1. Зависимости изменения тока в жидкости в УЗ поле от расстояния между электродами: 1 – вода с ионами хлора, 2 – органическая кислота

Протекание постоянного электрического тока через жидкость в УЗ поле можно объяснить тем, что под действием сил поля увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает направленный массоперенос от излучателя под действием УЗ давления, а при захлопывании кавитационных полостей генерируются дополнительные носители – отрицательно заряженные кавитационные пузырьки [6]. Время достижения максимальной величины тока зависит от амплитуды УЗ колебаний, расстояния между электродами и полярности молекул жидкости. Для проверки гипотезы о полярности ионов, участвующих в образовании тока, вблизи излучателя расположили третий электрод в виде сетки, на который подавали постоянное напряжение 400–500 мВ от внешнего источника. Характер изменения тока во времени зависел от потенциала «сетки». При положительном потенциале на сетчатом электроде величина тока возрастала в среднем в три раза. При отрицательном потенциале ток менял направление и падал по амплитуде. Это объясняется тем, что в переносе зарядов участвовали в основном положительные ионы водорода, находящиеся в жидкой среде [7].

Влияние тока электропереноса, возникшего при УЗ активации жидкой среды, на процессы кавитации и диффузии довольно ограничено ввиду малых плотностей тока. Для увеличения интенсивности кавитационных процессов в жидкой среде предложено за счет внешнего электрического источника пропускать электрический ток плотностью 10–100 А/м<sup>2</sup> через жидкую среду в направлении перемещения наиболее подвижных ионов к излучаемой поверхности УЗ инструмента [8]. Под действием постоянного электрического тока в полярной жидкости ускоряется массоперенос ионов, происходит восстановление ионов водорода в виде газовых пузырьков размером 50–100 мкм, которые являются зародышами кавитации. Непрерывное накопление зародышей кавитации в рабочей зоне и их захлопывание под действием УЗ колебаний увеличивают интенсивность кавитационных процессов, что ускоряет процесс разрушения жировых пленок и повышает качество очистки за счет более равномерного распределения зародышей кавитации по всей обрабатываемой поверхности под действием

силовых линий электрического тока.

Для повышения локальности и производительности активации электрическое поле ориентируют таким образом, чтобы ионы водорода устремлялись к излучателю и восстанавливались в виде газовых пузырьков. Вблизи поверхности излучателя ввиду значительных амплитуд колебаний происходит быстрый рост пузырьков до критических размеров и их захлопывание, что сопровождается интенсивными кавитационными явлениями. Величина электрического тока через жидкость зависит от степени ее полярности, размеров обрабатываемой детали. Наибольшее увеличение кавитационного давления (в 2–2,5 раза), измеренного с помощью кавитометра, отмечено при оптимальной плотности тока  $10\text{--}100\text{ А/м}^2$  и отрицательном потенциале на излучателе.

Схемы направленного действия электрического поля при УЗ очистке для металлических (а) и неметаллических материалов (б) приведены на рис. 2. Изделие 1 погружают в жидкость на расстоянии  $h$  от дна ванны 2 и с помощью провода подключают к одному из полюсов внешнего источника тока 3. Другой полюс источника соединяют с ванной. При подаче электрических колебаний от УЗ генератора на преобразователь 4 в нем возбуждаются механические колебания амплитудой  $A_1$ , которые через излучатель 5 диафрагменного типа передаются в ванну. Под действием постоянного электрического тока в жидкости происходит перемещение положительно заряженных ионов в направлении к излучателю, их восстановление, образование газовых зародышей, что ускоряет процесс кавитации.

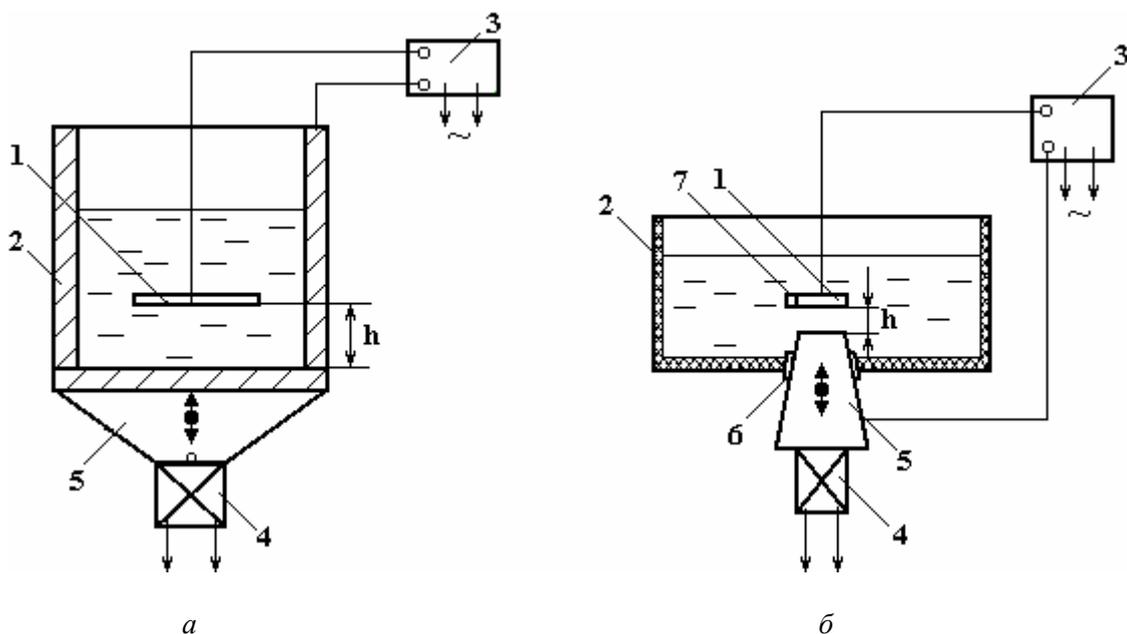


Рис. 2. Схемы совместной активации энергией УЗ и электрических полей

При локальном вводе УЗ колебаний в ванну изделие 1 размещается в ванне 2 на расстоянии  $h$  от рабочего торца излучателя. Неметаллическая ванна 2 имеет в основании отверстие, в котором закреплен излучатель типа конденсатор с помощью уплотнения 6. Контактное кольцо 7 подключается к одному из полюсов внешнего источника 3, а другой полюс соединен с излучателем 5. При возбуждении механических колебаний в преобразователе 4 они усиливаются излучателем до амплитуды  $A_2$  и передаются в жидкую среду. Это значительно повышает интенсивность кавитационных явлений за счет осаждения зародышей кавитации на обрабатываемом изделии и локального ввода УЗ колебаний.

Выбор плотности электрического тока, пропускаемого через жидкую среду, в диапазоне  $10\text{--}100\text{ А/м}^2$  обусловлен необходимостью эффективного перемещения газовых зародышей кавитации в зону обработки и увеличения кавитационного давления при их захлопывании. При плотности тока менее  $10\text{ А/м}^2$  количество перемещаемых ионов водорода недостаточно для ускорения процесса кавитации, при плотности тока более  $100\text{ А/м}^2$  количество зародышей кавитации возрастает в значительной степени, что приводит к их слиянию в более крупные газовые полости, которые при амплитудах колебаний  $10\text{--}15\text{ мкм}$  не захлопываются, а всплывают на поверхность жидкой среды.

В случае, если необходимо ослабить интенсивность кавитации во избежание значительного разрушения обрабатываемой поверхности, изменяют направление пропускаемого тока (положительный полюс на излучатель) и реализуют вариант катодной защиты изделия.

Исследовались зависимости кавитационного давления в жидких моющих средах от частоты колебаний, амплитуды и полярности электрического тока, пропускаемого через среду. Максимальное значение кавитационного давления 1100 Па соответствует частоте 25 кГц в том случае, когда на очищаемый металлический образец подан положительный потенциал. С увеличением и уменьшением частоты значение кавитационного давления уменьшается. При подаче отрицательного потенциала значение давления на резонансной частоте снизилось до 900 Па. Минимум значения давления 850 Па на резонансной частоте наблюдался при отсутствии тока, максимальное кавитационное давление 1100 Па достигается при значении тока, равном 30 мА (рис. 3).

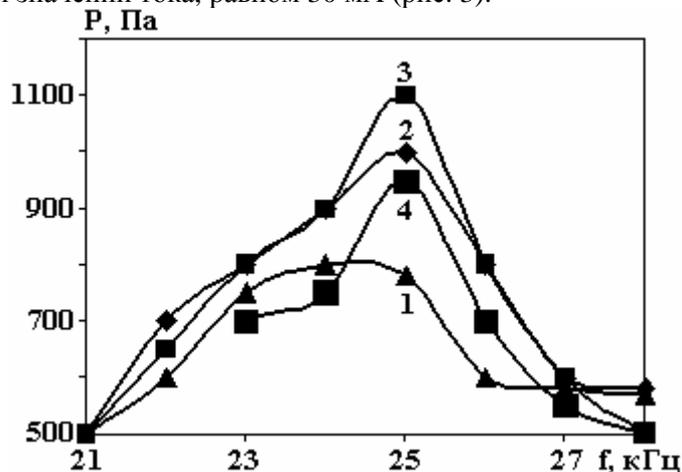


Рис. 3. Частотные зависимости кавитационного давления при различных значениях электрического тока.  $I$ , мА: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 30; 4 – 40

При проведении экспериментальных исследований процесса УЗ очистки исследовались зависимости значений коэффициента разрушения алюминиевой фольги от глубины погружения, полярности тока и от свойств жидкой среды. Максимальные значения коэффициента разрушения были получены при подаче на очищаемое изделие положительного потенциала (рис. 4). С увеличением глубины погружения наблюдалось снижение значения коэффициента разрушения. При подаче отрицательного потенциала значение коэффициента разрушения снизилось на 20–25%, но оставалось относительно постоянным. Таким образом, изменяя направление действия электрического поля, можно в определенной степени управлять интенсивностью кавитационных явлений.

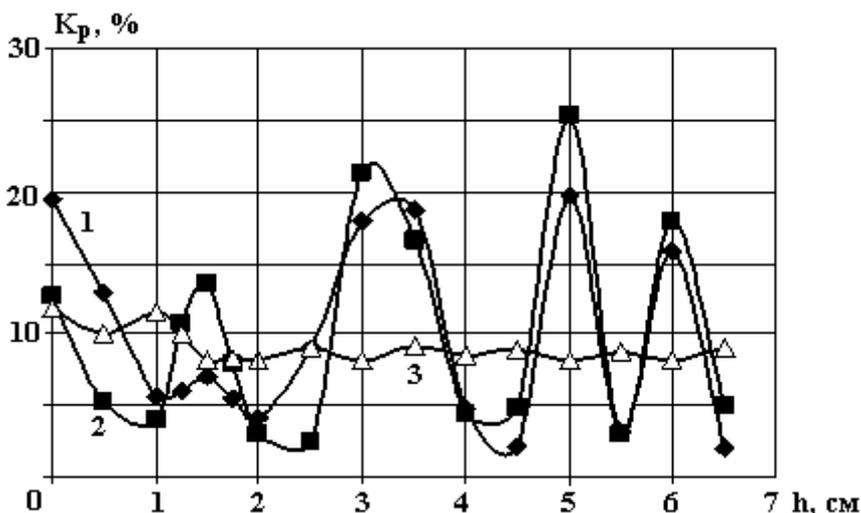


Рис. 4. Зависимости коэффициента разрушения от глубины погружения и плотности тока в воде.  $j$ , А/м<sup>2</sup>: 1 – 0; 2 – 21; 3 – 21

При исследовании зависимости коэффициента разрушения от глубины погружения в воде и водном растворе ПАВ наблюдаемые разрушения в воде были больше, чем в водном растворе ПАВ (рис. 5). В водном растворе ПАВ и при различной плотности тока (рис. 6), так же как и в воде, максимальные значения для коэффициента разрушения были достигнуты при подаче на изделие положи-

тельного потенциала, а при подаче отрицательного потенциала значения оставались относительно постоянными.

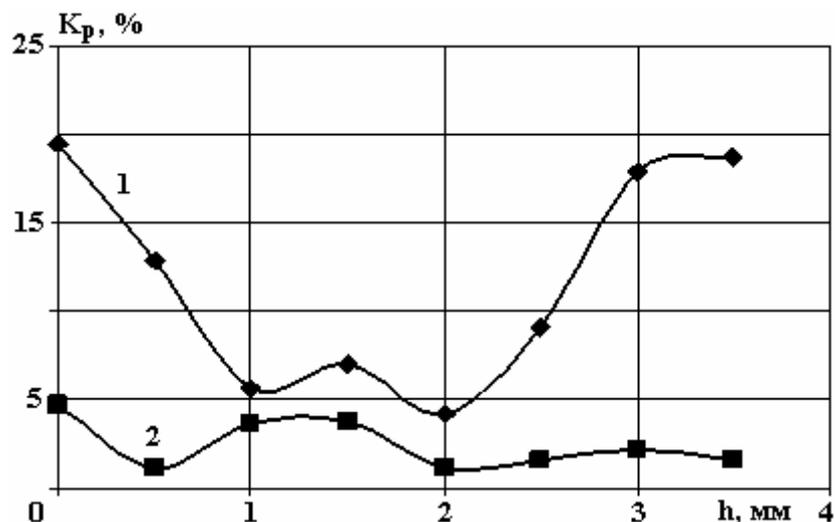


Рис. 5. Зависимости коэффициента разрушения от глубины погружения в различных жидких средах. 1 – вода; 2 – раствор ПАВ

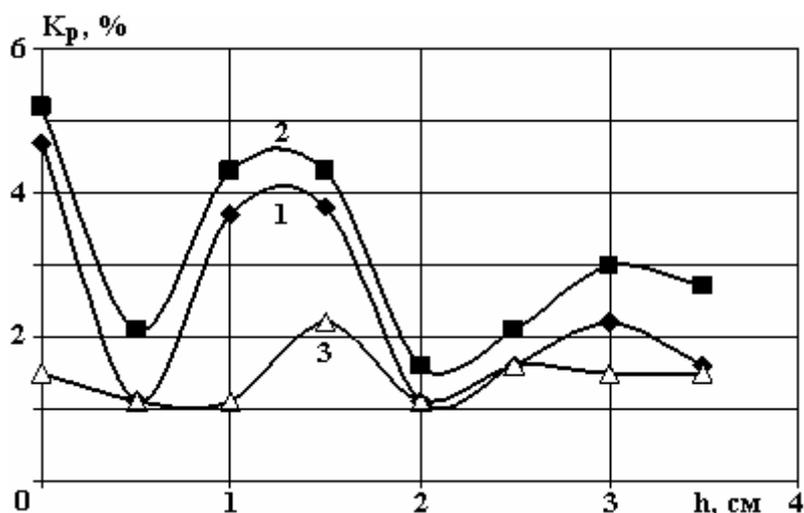


Рис. 6. Зависимости коэффициента разрушения от глубины погружения и плотности тока в растворе ПАВ.  $j, A/m^2$ : 1 – 0; 2 – 21; 3 – 21

Полученные результаты можно объяснить следующими процессами. При обработке поверхности детали большой площади и для повышения равномерности обработки минус от внешнего источника подключают на деталь, а плюс – на излучатель. В полярных жидкостях (водных растворах) ускоряется миграция ионов водорода к обрабатываемой поверхности. Отдавая положительный заряд, ионы выделяются в виде газовых пузырьков атомарного водорода, являющихся зародышами кавитации.

В случае необходимости локальной и более производительной обработки минус от внешнего источника подключают к излучателю УЗ колебаний, а плюс – на деталь. В этом случае ионы водорода устремляются к излучателю, восстанавливаются в виде газовых пузырьков. Вблизи поверхности излучателя ввиду значительных амплитуд колебаний происходят быстрый рост пузырьков до критических размеров и их захлопывание, что сопровождается интенсивными кавитационными явлениями.

Величина электрического тока, пропускаемого через жидкость, зависит от степени ее полярности, размеров обрабатываемой детали. Наибольшее увеличение кавитационного давления (в 2,0–2,5 раза), измеренного с помощью кавитометра, отмечено при оптимальной плотности тока 1–2  $mA/cm^2$  [9].

Таким образом, направленное действие электрического поля на жидкие среды при УЗ обработке позволяет регулировать интенсивность кавитационных процессов, ускорять процессы массопере-

носа и растворения загрязнений и способствует более качественной очистке микрорельефных поверхностей изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Пауков Ю.Н., Болога М.К. Некоторые вопросы физики кавитации // Электронная обработка материалов. 1965. № 2. С. 35–50.
2. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
3. *Maisonhaute E., Prado C.* Surface acoustic cavitation understood via nanosecond electrochemistry // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2002. № 9. P. 297–303.
4. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т.1 / Под общ. ред. А.П. Достанко. Минск, 2002. С. 267–285.
5. Румак Н.В., Бондарик В.М., Ланин В.Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний // Доклады АН Беларуси. 1994. Т. 38. № 2. С. 115–118.
6. *Lanin V.L.* Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing // Proc. 3-rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 13–14 December 2001. Paris, 2001. P. 143–146.
7. Ланин В.Л. Массоперенос в жидких средах при совместном воздействии ультразвуковых и электрических полей // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. Физика. 2005. № 4. С. 117–121.
8. Способ ультразвуковой очистки: пат. 7318 Беларусь, МКИ<sup>7</sup> В 08 В 3/12 /В.Л. Ланин, Л.П. Ануфриев. № А 20020988; заявл. 16.12.2002; опубл. 16.05. 2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. вед. Рэсп. Беларусь. 2005. № 3(46). С. 135.
9. Ланин В.Л., Томаль В.С. Оптимизация кавитационных полей в ультразвуковых ваннах очистки // Доклады НАН Беларуси. 2007. Т. 51. № 3. С. 119–121.

*Поступила 16.01.08*

#### Summary

The directed action of electric field on liquid environments is investigated at ultrasonic clearing that allows to adjust intensity of cavitation process, to accelerate carry processes and pollution dissolution and promotes better clearing of microrelief products surfaces.

---