

ных материалов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 7. – С. 87–91.

10. Янюшкин, А.С., Попов, В.Ю., Янюшкин, Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2000. – Т. 1. – С. 189–190.

11. Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В., Архипов, П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 3(45). – С. 22–29.

## REFERENCES

1. Popov, A.Yu., Rechenko, D.S., Vasiliev, E.V., Sergeev, V.S., Koltsov, A.G. Diamond grinding technology for hard alloy products // *Bulletin of Ufa State Aircraft Technical University*. – 2012. – Vol. 16. – № 4 (49). – pp. 24–29.

2. Vasiliev, E.V., Popov, A.Yu., Rechenko, D.S. Diamond grinding of hard alloy plates // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. 32. – № 11–12. – pp. 730–732.

3. Suslov A.G. Improvement and development of competitive techniques ensuring quality increase of engineering products // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2006. – № 2. – pp. 24–29.

4. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Kovalevsky, S.V. Quality increase in preparation of hard alloy tool // *Systems. Methods. Techniques*. – 2009. – № 1. – pp. 95–98.

5. Rychkov, D.A., Skripnyak, V.A., Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V. Cutting edge formation in milling tool for work-

ing laminated composites armored with glass fibers // *Systems. Methods. Techniques*. – 2014. – № 2 (22). – pp. 42–46.

6. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Kuznetsov A.M. Drawbacks in common methods of hard alloy tool sharpening and ways for their improvement // *Proceedings of Bratsk State University. Series: Engineering Sciences*. – 2004. – Vol. 2. – pp. 95–98.

7. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. T. 788. C. 17–21.

8. Arkhipov, P.V., Yanyushkin, A.S., Kovalevsky, S.V. On nature of abrasive disc glazing // *Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. – 2008. – № 2. – pp. 169–174.

9. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Bataev, V.A., Arkhipov, P.V., Medvedeva, O.I. Investigations of diamond disc operational capacity at composites processing // *Systems. Methods. Technologies*. – 2010. – № 7. – pp. 87–91.

10. Yanyushkin, A.S., Popov, V.Yu., Yanyushkin, R.A. Elements of grinding machine updating for electro-diamond processing // *Proceedings of Bratsk State Technical University. Series: Natural and Engineering Sciences*. – 2000. – Vol. 1. – pp. 189–190.

11. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Arkhipov, P.V., Popov V.Yu. Investigations of electric mode impact upon qualitative and economic indices of combined electro-diamond processing of hard alloy materials // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 3(45). – pp. 22–29.

Рецензент д.т.н. П.М. Огар

УДК 621.7.024

DOI: 10.12737/24545

А.Н. Неверов, к.т.н.

(Московский автомобильно–дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Москва, 125319, Ленинградский пр., 64)

E-mail: neverov\_an@mail.ru

## О возможности реализации режима слабой кавитации при ультразвуковой очистке РЭА

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарных кавитационных явлений при ультразвуковой очистке кавитационно нестойких изделий. Наблюдались кратковременные импульсы звукового давления в жидкости и связанные с ними релаксационные колебания питающего электрического напряжения. Показана возможность реализации режима слабой кавитации при ультразвуковой очистке кавитационно нестойких изделий.

**Ключевые слова:** ультразвук; кавитация; колебательная скорость; импульсы; релаксационные колебания; режим слабой кавитации.

## On possibility of realization of weak cavitation mode at electronics ultrasonic cleaning

*The procedure is described and results of the experimental investigation of unsteady cavitation phenomena at ultrasonic cleaning cavitation unstable products are presented. It is established that at certain correlations of parameters of a transmitter and liquid the short-term pulses of acoustic pressure in liquid and connected with them relaxation oscillations of feed electric current are possible. Short-term power pulses of acoustic pressure determine a possibility of damages in parts under cleaning. Maximum values of acoustic pressure are higher greatly than its averages. Acoustic pressure pulsations take place in a certain range of mean amplitudes of an amplitude speed common for any liquid. A possibility is shown for the realization of a weak cavitation mode at ultrasonic cleaning cavitation unstable products.*

**Keywords:** ultrasound; cavitation; oscillation speed; pulses; relaxation oscillations; weak cavitation mode.

Анализ причин отказов блоков, узлов и элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) показывает, что их четвертая часть приходится на неудовлетворительное качество очистки [1].

В прошлом веке эту проблему решали, очищая РЭА в моющих азеотропных композициях на основе хладонов 113 и 114В2 [2]. В НИИ «Импульс» под руководством Ф.А. Бронина были созданы установки УЗВФ-1, УЗВФ-2, УЗВФ-3 для очистки плат печатного монтажа и других элементов РЭА, которые успешно работали на многих предприятиях нашей страны.

Однако в XXI в. применение хладонов было запрещено международными соглашениями, так как они якобы разрушают озоновый слой и усиливают парниковый эффект. Тогда пришлось обратиться к водным растворам поверхностно-активных веществ.

Часто для интенсификации процесса ультразвуковой очистки использовалась амплитудная модуляция выходного электрического напряжения ультразвукового генератора [3 – 5]. Достигается это за счет применения одно- и двухполупериодных схем выпрямления без сглаживающих фильтров.

Однако при осуществлении кавитационной очистки микроударные кавитационные импульсы разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности, но и изменяют в известной степени морфологию самой поверхности [6].

Некоторое время назад для ультразвуковой очистки РЭА технологи пытались использовать режим слабой кавитации, при котором очищаемое изделие не повреждалось бы, а загрязнения удалялись. Эти попытки, кончились неудачей, поверхность изделий успешно повреждалась даже при небольших средних

уровнях звукового давления. Поэтому для очистки узлов и блоков РЭА ныне рекомендуется докавитационный режим [7, 8]. Появились и работы, запрещающие ультразвуковую очистку РЭА [9, 10].

Причины же повреждений узлов РЭА до сих пор предметно не изучались.

Теоретический анализ излучения высокодобротного стержня в жидкость показал, что при одной и той же амплитуде возбуждающей силы в жидкости могут быть реализованы как кавитационный, так и докавитационный режимы. По этой причине при амплитудной модуляции возбуждающей силы в принципе возможны пульсации кавитационных явлений в жидкости и связанные с ними релаксационные процессы в электрических цепях, питающих преобразователь.

Темой настоящей работы является экспериментальная проверка этой гипотезы.

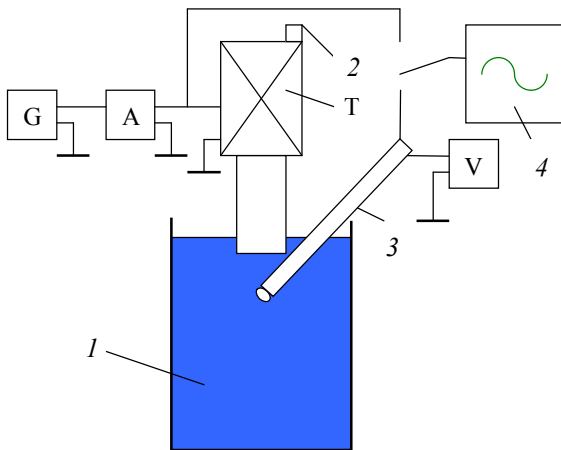
### Экспериментальная установка, исследуемые жидкости

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Установка состоит из задающего генератора G, усилителя A (выходной сигнал усилителя практически не модулирован сигналом промышленной частоты), сосуда с исследуемой жидкостью I, гидрофона Z с частотой пропускания до 200 кГц, вольтметра V.

Амплитуда колебательной скорости оценивалась по сигналу предварительно проградуированного магнитострикционного датчика 2. В качестве излучателей использовались магнитострикционный преобразователь с излучающим полуволновым титановым стержнем с резонансной частотой 22,2 кГц, собственной добротностью 30 и двухполуволновый состав-

ной пьезопреобразователь с резонансной частотой 22,0 кГц и добротностью 70.



**Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:**  
 G – генератор; А – усилитель; Т – излучатель;  
 V – вольтметр; 1 – сосуд с жидкостью; 2 – магнито-  
 стрикционный датчик; 3 – гидрофон; 4 – осциллограф

Средняя амплитуда колебаний пьезопреобразователя и магнито-стрикционного преобразователя фиксировалась предварительно отградуированным магнито-стрикционным датчиком. Контроль напряжения на преобразователе осуществлялся через высокоомный делитель. Форма сигналов электрического напряжения на входе преобразователя фиксировалась на экране запоминающего осциллографа.

Излучающий торец магнито-стрикционного преобразователя и пьезоэлектрического преобразователя опускался в цилиндрический сосуд емкостью 1,0 л. Звуковое давление в жидкости во всех экспериментах фиксировалось гидрофоном с полосой пропускания до 200 кГц, сигнал которого поступал на запоминающий осциллограф.

Напряжение на входе преобразователя было модулировано низкочастотным сигналом промышленной частоты 50 Гц; глубина модуляции составляла при этом 8...13 %.

В качестве нагрузки использовались вода, четыреххлористый углерод, хладон 114В2, жидкость МД-2Ф. Их физико-химические характеристики приведены в табл. 1. Температура жидкостей поддерживалась в пределах  $20 \pm 2$  °С.

В качестве нагрузки использовались вода, четыреххлористый углерод, хладон 114В2, жидкость МД-2Ф. Их физико-химические характеристики приведены в табл. 1. Температура жидкостей поддерживалась в пределах  $20 \pm 2$  °С.

**1. Физико-химические характеристики исследуемых жидкостей**

Параметр	Вода	Четырех- хлористый углерод	Хладон 114В2	МД-2Ф
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1595	2181	2130
Скорость звука, м/с	1430	940	596	564
Удельное волновое сопротивление, 10 <sup>-6</sup> кг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,43	1,50	1,30	1,20
Поверхностное натяжение, Н/м	0,0727	0,0268	0,0181	0,0150
Динамическая вязкость, мПа·с	1,002	0,97	0,72	–
Температура кипения, °С	100	76,7	47,3	46

**Кавитационные пульсации при излучении в воду**

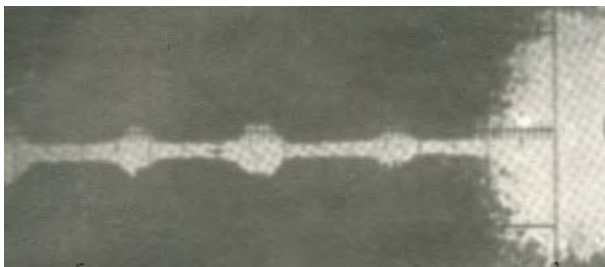
При средней амплитуде колебательной скорости около 7 см/с низкочастотного ( $Q = 30$ ) магнито-стрикционного преобразователя в водопроводной отстоявшейся воде возникла устойчивая кавитация практически без пульсаций.

При излучении в воду высокочастотного ( $Q = 70$ ) составного пьезопреобразователя при той же средней амплитуде колебательной скорости 7 см/с гидрофон фиксировал порог кавитации, возникающей в максимумах модулированного сигнала (рис. 2, а).

Осциллограмма акустического давления в воде (рис. 2, б) соответствует средней амплитуде колебательной скорости примерно 8 см/с, несколько превышающей пороговое значение. Здесь наряду с пороговыми импульсами видны и довольно мощные импульсы звукового давления, амплитуда которых значительно превосходит уровень модуляции входного электрического сигнала. Это обстоятельство вполне может свидетельствовать о пульсирующей кавитации, являющейся следствием триггерного режима работы колебательной системы.

При дальнейшем повышении амплитуды колебательной скорости высокочастотного

пьезопреобразователя ( $v_{cp} \approx 9$  см/с) кавитационные пульсации становятся очевидными (рис. 3, а). Огибающая выходного напряжения ультразвукового генератора (т.е. входного электрического напряжения преобразователя) имеет при этом ярко выраженный релаксационный характер, ясно видимый на фоне модулированного сигнала (рис. 3, б) и обусловленный, по мнению автора, реакцией генератора на скачок амплитуды колебательной скорости. Скачки, подобные приведенным на рис. 3, б, характерны для триггерного режима работы колебательных систем.



а)



б)

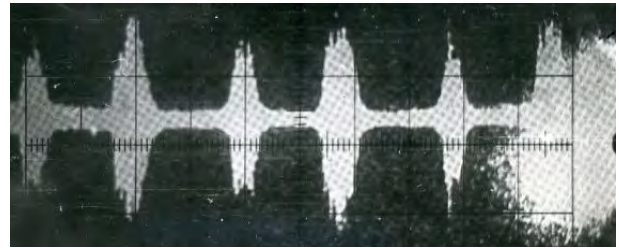
Рис. 2. Осциллограммы звукового давления в воде при излучении высокочастотного пьезопреобразователя:

а –  $v_{cp} \approx 7,0$  см/с; б –  $v_{cp} \approx 8,0$  см/с

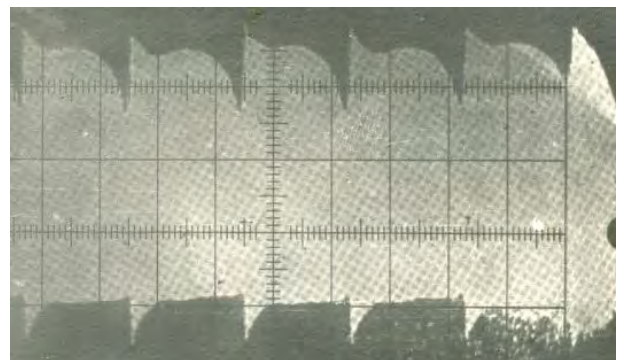
При излучении в воду низкочастотного магнитострикционного преобразователя при той же средней амплитуде колебательной скорости ( $v_{cp} \approx 9$  см/с) кавитация была непрерывной с едва различимой модуляцией, но без пульсаций, характерных для триггерного режима (рис. 4).

На рис. 5 показана осциллограмма звукового давления в воде при средней колебательной скорости 9,0 см/с, но временной масштаб здесь существенно больше (0,5 с/деление), чем на рис. 3. При таком масштабе кавитация кажется непрерывной, но в какой-то момент скачок колебательной скорости может привести к мощному кавитационному импульсу.

В описанных экспериментах звуковое давление в пиках пульсаций значительно превышает его среднее значение. Такое явление вполне может иметь место в промышленных технологических установках при ультразвуковой очистке кавитационно нестойких элементов, блоков и узлов РЭА в режиме слабой кавитации. Даже при относительно небольших значениях возбуждающего электрического сигнала и звукового давления в моющей жидкости очищаемые детали могут быть повреждены.



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы акустического давления (а) и электрического напряжения (б) на высокочастотном пьезопреобразователе ( $v_{cp} \approx 9,0$  см/с)

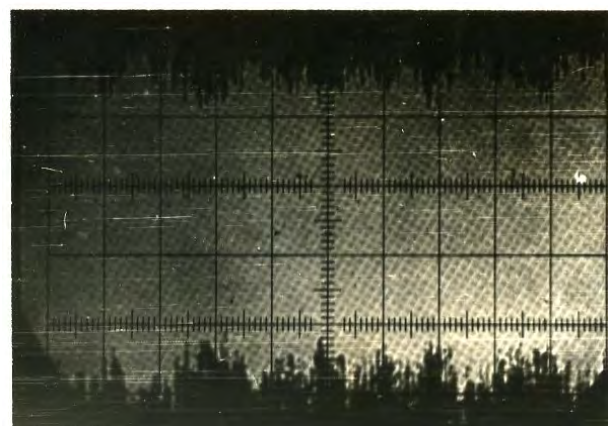


Рис. 4. Осциллограмма звукового давления в воде при излучении низкочастотного магнитострикционного преобразователя ( $v_{cp} \approx 9,0$  см/с)

На осциллограмме ясно виден кавитационный «удар», такие удары вполне могут обусловить весьма существенные повреждения очищаемых деталей. Эти удары, как следует из осциллограммы рис. 5, происходят нечасто и не всегда могут быть зарегистрированы.

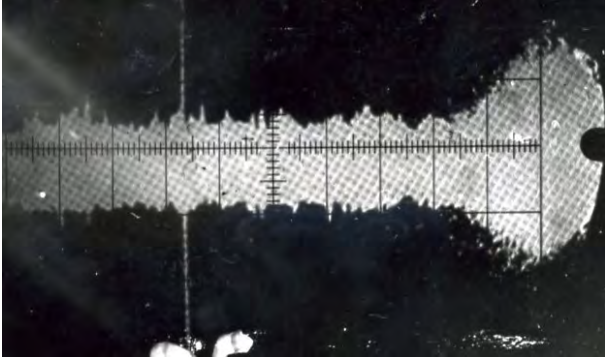


Рис. 5. Осциллограмма звукового давления в воде при излучении составного пьезопреобразователя ( $Q \approx 70$ ) при средней амплитуде колебательной скорости  $v_{ср} \approx 9,0$  см/с

Режим слабой кавитации, свободный от разрушительных кавитационных ударов, может быть реализован при использовании низкочастотного ультразвукового излучателя при достаточном запасе мощности генератора.

Таким образом, излучатели, колеблющиеся с одинаковой средней амплитудой колебательной скорости, величина которой несколько превышает значение, соответствующее порогу кавитации в озвучиваемой жидкости, совершенно по-разному реагируют на амплитудную модуляцию возбуждающего сигнала в зависимости от своей добротности.

### Кавитационные пульсации при излучении в другие жидкости

На рис. 6 приведены осциллограммы звукового давления при излучении высокочастотного пьезопреобразователя в четыреххлористый углерод при различных значениях средней амплитуды колебательной скорости.

Эволюция осциллограмм при увеличении средней амплитуды колебательной скорости весьма напоминает то, что мы видели при наблюдении пульсаций кавитационных явлений в воде.

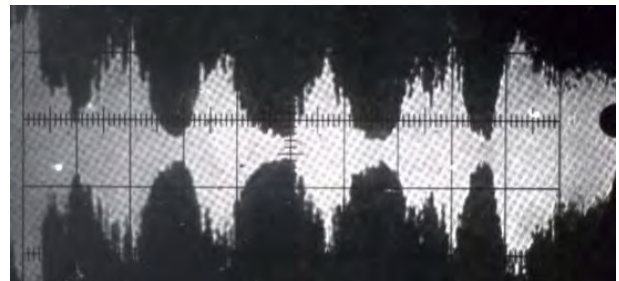
При амплитуде около 6,5 см/с пульсации давления едва заметны. При повышении амплитуды колебательной скорости растет как амплитуда кавитационных импульсов, так и степень заполнения периода кавитационными

импульсами. Это ясно видно при сравнении осциллограмм при средних амплитудах колебательной скорости 6,5; 7,5 и 8,0 см/с (рис. 6, а – в). При средней амплитуде колебательной скорости более 8,0 см/с кавитация была сплошной, хотя амплитуда звукового давления была модулирована (рис. 6, г).

Релаксационность огибающей питающего электрического напряжения при этом была едва заметной, а коэффициент модуляции увеличился, по сравнению с сигналом ненагруженного излучателя.



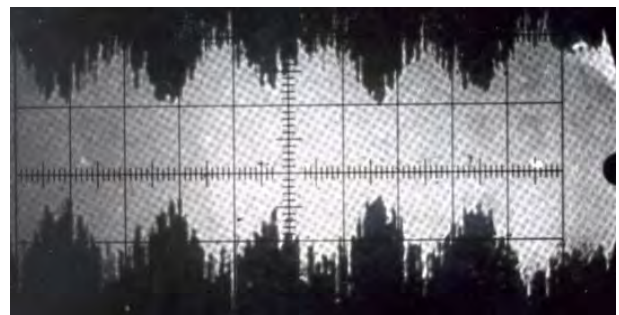
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Осциллограммы акустического давления на высокочастотном пьезопреобразователе при излучении в четыреххлористый углерод:

а –  $v_{ср} \approx 6,5$  см/с; б –  $v_{ср} \approx 7,0$  см/с; в –  $v_{ср} \approx 8,0$  см/с; г –  $v_{ср} \approx 8,5$  см/с

На рис. 7 приведены осциллограммы звукового давления при излучении высокочастотного пьезопреобразователя в хладон 114В2 при различных значениях средней амплитуды колебательной скорости.

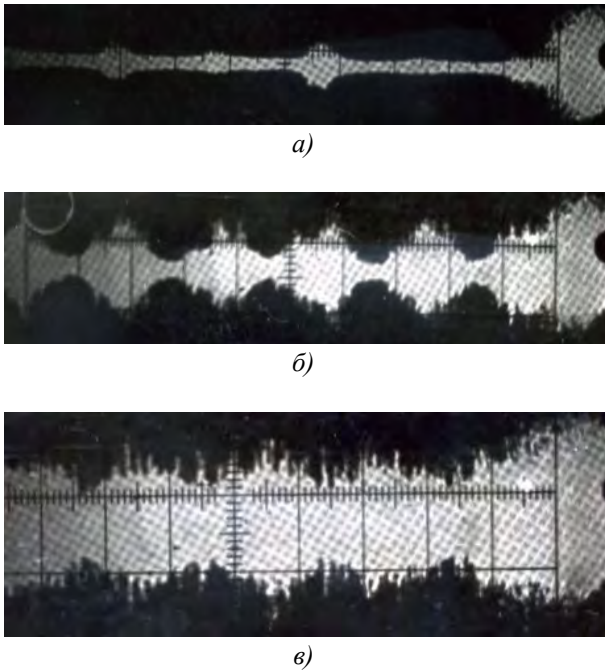


Рис. 7. Осциллограммы акустического давления на высокочастотном пьезопреобразователе при излучении в хладон 114В2:

$a - v_{cp} \approx 7,0 \text{ см/с}$ ;  $b - v_{cp} \approx 8,0 \text{ см/с}$ ;  $v - v_{cp} \approx 9,0 \text{ см/с}$

При амплитуде колебательной скорости около  $7,0 \text{ см/с}$  пульсации давления еле заметны. При повышении амплитуды колебаний амплитуда кавитационных импульсов и степень заполнения периода кавитационными импульсами возрастают (рис. 7, *a*, *b*). При средней амплитуде колебательной скорости более  $8,0 \text{ см/с}$  кавитация была сплошной, хотя амплитуда звукового давления была модулирована (осциллограмма рис. 7, *v*).

Релаксационность огибающей питающего электрического напряжения при этом была меньше, чем при излучении в воду (см. рис. 3, *b*), а коэффициент модуляции увеличился по сравнению с сигналом ненагруженного излучателя.

Пульсирующая кавитация в воде, четыреххлористом углероде и во фреоне 114В2 имеет качественно одинаковый характер.

– При излучении высокочастотного пьезопреобразователя наблюдаются кавитационные пульсации в воде при средних амплитудах колебательной скорости от  $7,0$  до  $9,5 \text{ см/с}$ ; в четыреххлористом углероде – от  $6,5$  до  $8,0 \text{ см/с}$ ;

во фреоне 114В2 – от  $7,0$  до  $8,0 \text{ см/с}$ .

– Пульсации звукового давления имеют место в некотором диапазоне средних амплитуд колебательной скорости, характерном для каждой жидкости.

– Огибающая мгновенных значений электрического напряжения на входе преобразователя имеет при этом разрывный характер.

– Максимальные значения звукового давления существенно больше его средних величин.

– При превышении некоторого значения амплитуды колебательной скорости кавитация становится непрерывной, огибающая электрического напряжения теряет релаксационный характер.

В жидкости МД-2Ф пульсации звукового давления наблюдались лишь при средней амплитуде колебательной скорости  $6,5 \text{ см/с}$ , релаксационность огибающей электрического напряжения была практически незаметной. При дальнейшем повышении амплитуды колебательной скорости кавитация становилась непрерывной.

Отметим, что поведение жидкостей со сходными физико-химическими свойствами (хладон 114В2 и МД-2Ф) в динамическом режиме оказалось совершенно различным.

## Выводы

– Пульсирующая кавитация может иметь место в ультразвуковых технологических установках с амплитудной модуляцией выходного электрического сигнала ультразвукового генератора.

– Установлено, что при некоторых соотношениях параметров излучателя и жидкости возможны кратковременные импульсы звукового давления в жидкости, обуславливающие повреждения очищаемых узлов, и связанные с ними релаксационные колебания питающего электрического напряжения.

– Режим слабой кавитации, свободный от разрушительных кавитационных ударов, может быть специально организован при использовании низкочастотного ультразвукового излучателя при достаточном запасе мощности генератора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Savage T. Ultrasonic Cleaning in Industry. Wire Industry. 2006, № 6, pp. 424–426.
2. Бронин, Ф.А., Чернов, А.П. Ультразвуковая очист-

ка во фреоновых композициях. – М: Машиностроение, 1978. – 48 с.

3. Келлер, О.К. Ультразвуковые генераторы на транзисторах и тиристорах. – М.: Машиностроение, 1979. – 47 с.

4. А.с. 850231 СССР МКИ В 06 В 1/06. Ультразвуковая установка / И.В. Петушко, Ю.В. Холопов (СССР). – № 2799800/18-10; заявл. 20.07.79; опубл. 30.07.81, Бюл. № 28.

5. Петушко, И.В. Оборудование для ультразвуковой очистки. – СПб: «Андреевский издательский дом», 2004. – 150 с.

6. Ланин, В.Л., Томаль, В.С. Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 8. Режим доступа свободный. [http://tech-e.ru/2007\\_8\\_60.php](http://tech-e.ru/2007_8_60.php)

7. Ланин, В.Л., Томаль, В.С. Ультразвуковая очистка микрорельефных поверхностей оптоэлектронных изделий // Фотоника. – 2007. – № 4. – С. 35–40.

8. Fuchs F.J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion. Precision Cleaning. 1995, № 3 (10), pp. 13-17.

9. Бреславец, А.В., Хуторненко, В.Д. Ультразвуковая очистка радиоаппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 80 с.

10. Ультразвуковая очистка РЭА и приборов / М.Д. Тявловский, Е.П. Фастовец, В.М. Алефиренко; под ред. А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1984. – 239 с.

## REFERENCES

1. Savage T. Ultrasonic Cleaning in Industry. Wire Industry. 2006, № 6, pp. 424–426.

2. Bronin, F.A., Chernov, A.P. *Ultrasonic Cleaning in Freon Compositions*. – М: Mechanical Engineering, 1978. – 48 с.

3. Keller, O.K. *Ultrasonic Generators on Transistors and Thyristors*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 47.

4. Author's certificate 850231 USSR ICI B 06 B 1/06. Ultrasonic Plant / I.V. Petushko, Yu.V. Kholopov (USSR). – № 2799800/18-10; applied. 20.07.79; published 30.07.81, Bulletin № 28.

5. Petushko, I.V. *Equipment for Ultrasonic Cleaning*. – S-Pb: “Andrey Publishing House”, 2004. – pp. 150.

6. Lanin, V.L., Tomal, V.S. Technology and equipment of ultrasonic cleaning of electronics // *Electronics Technologies*. – 2007. – № 8. Free access mode. [http://tech-e.ru/2007\\_8\\_60.php](http://tech-e.ru/2007_8_60.php)

7. Lanin, V.L., Tomal, V.S. Ultrasonic cleaning of micro-relief surfaces in optoelectronic products // *Photonics*. – 2007. – № 4. – pp. 35–40.

8. Fuchs F.J. The Key to Ultrasonics-Cavitation and Implosion. Precision Cleaning. 1995, № 3 (10), pp. 13-17.

9. Breslavets, A.V., Khutornenko, V.D. Ultrasonic cleaning radio equipment. – М.: *Soviet Radio*, 1974. – pp. 80.

10. Ultrasonic Cleaning of Radio Electronic Equipment and Appliances / M.D. Tyavlovsky, E.P. Fastovets, V.M. Alefirenko; under the editorship of A.V. Stepanenko. – Minsk: *Science and Engineering*, 1984. – pp. 239.

Рецензент д.т.н. Д.И. Фатюхин

УДК 621.789

DOI: 10.12737/24546

А.В. Королев, д.т.н.,

А.Ф. Балаев, к.т.н.,

Т.А. Балтаев, аспирант

(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: bandrey.sc@gmail.com

## Технология ультразвуковой стабилизации геометрических параметров упругих пластин

Описана технология стабилизации геометрических параметров упругих пластин на основе релаксации остаточных напряжений под действием ультразвуковых колебаний. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде графиков зависимостей остаточной деформации от технологических факторов.

**Ключевые слова:** ультразвуковые колебания; технология; остаточная деформация; стабилизация.