

СОВМЕЩЕНИЕ ПОДВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА И СОБСТВЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ. ЧАСТЬ 1 (Исследование физической эффективности генерирования импульсного акустического поля)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Повышение эффективности электровзрывной обработки материалов при одновременном снижении энергозатрат процесса является актуальной задачей. Одним из направлений ее решения может стать совместное электровзрывное и ультразвуковое воздействие на объект обработки, причем энергией для возбуждения ультразвукового поля является последствие подводного электрического взрыва – генерируемый им гидросток [1]. С технической точки зрения это попытка повысить энергонапряженность процесса при одновременном снижении расхода энергии на единицу меры процесса обработки.

Известно также, что в технологических целях подводный электрический взрыв осуществляют в среде, содержащей большое количество газовых пузырьков [2]. При этом для активизации пульсации пузырьков важно влияние на них упругих колебаний с частотой, близкой к резонансной, зависящей от размеров пузырька [3].

Явление возникновения акустического излучения при набегании гидросточка на специальные гидродинамические излучатели изучено и находит практическое применение, однако при этом используются стационарные потоки жидкости, набегающие на излучатель со скоростью 25 – 40 м/с [4]. Таким образом, в гидродинамических преобразователях образование звука происходит за счет механической энергии струи жидкости [5].

Наибольшее распространение получили преобразователи с пластинчатыми или стержневыми колебательными устройствами, а также вихревыми и роторными. Первые два типа работают по принципу резонансных колебаний пластин или стержней при воздействии на них струи жидкости, вытекающей под давлением из сопла. Пластины или стержни имеют клиновидную заточку. Струя жидкости, попадая на препятствие необтекаемой формы, срывается и образует вихри, следующие один за другим. Периодически изменяющееся давление в зоне вихревого движения влечет за собой возникновение акустических волн.

Если подобрать форму, размеры, свойства материала, способ крепления пластин так, чтобы резонансные частоты их изгибных колебаний совпадали с частотой следования вихрей, то интенсивность генерируемой звуковой волны резко увеличивается.

Таким образом, используя интенсивные гидросточки, возникающие при подводном электрическом взрыве, и направляя их на гидродинамические излучатели, можно дополнительно к чисто электровзрывному воздействию получить мощные импульсные ультразвуковые поля, которые будут способствовать возникновению, развитию и интенсификации процессов электровзрывной кавитации. К сожалению, не известны результаты взаимодействия электровзрывных высокоскоростных струй жидкости с гидродинамическим излучателем.

Методика экспериментальных исследований

Исследования выполнялись в акустическом реакторе, конструктивная схема которого приведена на рис. 1. Обработка жидкости в реакторе производилась как при ее непрерывной прокачке, так и в дискретном режиме.

Генератор импульсных токов, к которому подключался реактор, позволял формировать импульсы тока при $U_0 = 50$ кВ и в соответствии с изменением величины емкости накопителя с энергией

в импульсе $W = 2,4; 1,25; 0,625$ кДж. Частота посылок импульсов была соответственно $f = 1; 2; 4$ Гц. Как показано на рис. 1, акустический реактор снабжался электродной системой направленного воздействия (см. рис. 1 (2, 3) тремя типоразмерами гидродинамических излучателей и устанавливаемыми в их плоскости гидрофонами.

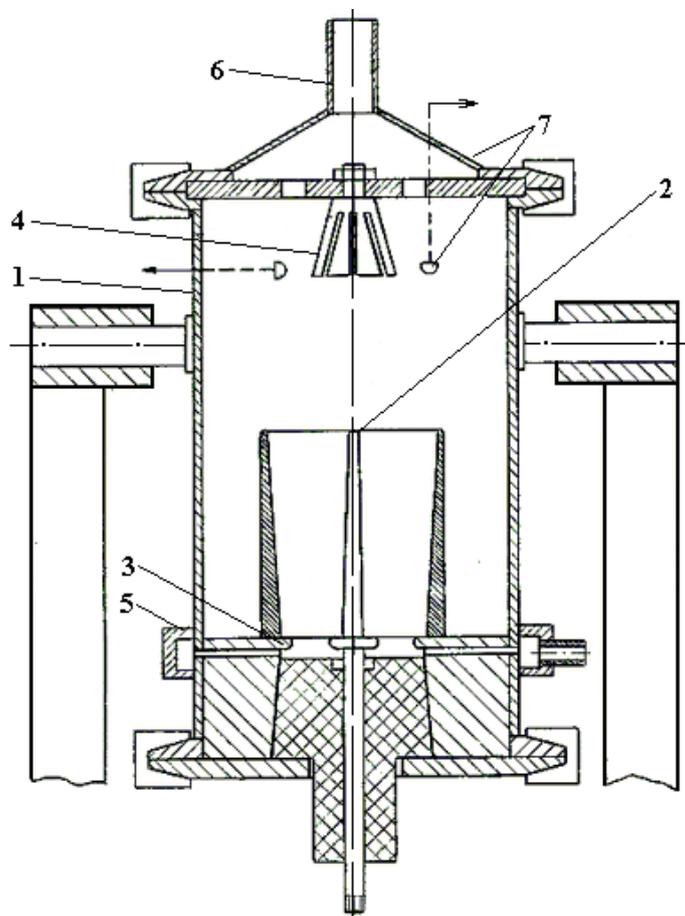


Рис. 1. Экспериментальная электроразрядная камера

*1 – корпус; 2 – электрод-анод; 3 – электрод-катод; 4 – гидродинамический излучатель;
5 – коллектор подачи жидкости; 6 – патрубок отводящий; 7 – гидрофон*

При проведении исследований использовались измерительные системы акустических параметров фирмы "Брюль и Кьер" (В&К). Перечень приборов приводится в табл. 1.

При проведении данных исследований постоянными принимались параметры: рабочее напряжение – $U_0 = 50 \pm 2,5$ кВ; индуктивность разрядного контура $L = 4 \pm 0,5$ мкГ;

Варьируемыми параметрами принимались: энергия единичного импульса – W ; частота следования импульсов – f ; типоразмер гидродинамического излучателя.

Была использована конструкция конического разрядного резонатора переменного сечения с консольным закреплением по оси разрядной камеры. Использовались три типоразмера с различной толщиной торцевой кромки (1; 2; 4 мм), что позволяло определить влияние конусности корпуса резонатора и толщины торцевой кромки на характер акустического возмущения, а также на результат его воздействия на объект обработки. Численные значения этих трех параметров приведены в табл. 2.

Для измерения генерируемых импульсов давлений использовался широкополосный датчик давления, чувствительный элемент которого представлял собой цилиндр из пьезокерамики ТВК-5 диаметром и высотой 8 мм. Перед проведением исследований измерительный датчик давления калибровался на установке для абсолютной градуировки гидрофонов типа УГГ, разработанной и аттестованной в качестве образцового средства измерений ВНИИФТРИ, в полосе частот от 1 Гц до 10 кГц. Неисключенная систематическая погрешность градуировки составляет менее 1дБ при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 1. Перечень использованных приборов

Прибор	Тип	Пределы измерений	Погрешность, %; класс	Стандартные технические условия
1. Сосуд для измерения электропроводности растворов мостовым методом	X-38	$30 - 3 \cdot 10^4$ Ом	± 10 %	ТУ25.04.1089-73
2. Мост реохордный	P-38	$30 - 3 \cdot 10^4$ Ом	$\pm 1,5$ %	ТУ25.04.1099-73
3. Секундомер механический	СОСпр26	60 мин; 60 с	Кл.3	ГОСТ 5072-79
4. Осциллограф	C8-14	Не более 500 В	± 2 %	ТУ2.044.080
5. Счетчик импульсов	СИ206-1	0 – 999999	–	ТУ25.01.888-78
6. Штангенциркуль	ШЦ-160	0 – 100 мм	0,05 мм	ГОСТ 166-89
7. Киловольтметр	C 100	0 – 75 кВ	Кл.1,5	ТУ25.04.902-73
8. Цилиндр с пробкой		0 – 100 мл		ГОСТ 1770-74
9. Стакан лабораторный		0 – 100 мл		ГОСТ 10384-72
10. Весы лабораторные	T-5000		Кл.2	
11. Гидрофон	1П08	1 Гц – 40 кГц	± 1 дБ	V&K
12. Предусилитель	2650	3 Гц – 200 кГц	0,25 %	V&K
13. Анализатор спектра	2033	0 – 20 кГц	$\pm 0,2$ %	V&K
14. Цифровой магнитофон	7400		1ош на 10^9 отсчетов	V&K
15. Самописец	2308		0,2 %	
16. ЭВМ-анализатор	IN-110	0 – 50 кГц		"Интертекник"

Таблица 2. Варьируемые параметры

Энергия, кДж	Частота, Гц	Излучатель	Энергия, кДж	Частота, Гц	Излучатель	Энергия, кДж	Частота, Гц	Излучатель
0,625	4	1	1,25	2	1	2,5	1	1
0,625	4	2	1,25	2	2	2,5	1	2
0,625	4	3	1,25	2	3	2,5	1	3

Калибровка датчика давления проводилась в соответствии с методикой измерений МИ 2040–89 [6].

Частотная характеристика чувствительности используемого в эксперименте приемника давлений в полосе 1 Гц – 10 кГц приведена в табл. 3.

Градуировка датчика давления в диапазоне частот от 10 до 40 кГц проводилась на маятниковой установке для динамической калибровки широкополосных приемников [7]. Чувствительность гидрофона в этом диапазоне частот приведена в табл. 3. Среднеквадратичное значение погрешности калибровки на указанной установке составляет не более 2,5%.

Измерение спектрально-временных параметров волн давления, генерируемых электровзрывным устройством, осуществлялось при помощи спектроанализатора типа 2023 фирмы V&K, на который сигналы поступали через усилитель зарядов типа 2650 или непосредственно с измерительного гидрофона. Результаты регистрации заносились на цифровой магнитофон типа 7400 и в дальнейшем использовались для детальной статистической и спектральной обработки на ЭВМ IN-110 французской фирмы "Интертекник".

Регистрация и спектральный анализ временных параметров процесса проводились в полосе от 0 до 20 кГц, что определялось заданной областью измерений и соответствующими техническими возможностями используемой аппаратуры. Характерный размер приемника давления d в наших ис-

следованиях принят 8 мм, следовательно, длину волны $\lambda_с$ в жидкости на верхней частоте рабочего диапазона $f_с = 20$ кГц можно определить по формуле $\lambda_с = C/f_с = 75$ мм.

Таблица 3. Частотная характеристика приемника давлений

Частота, Гц	Чувствительность, мкВ/Па						
1	7,5	16	7,7	250	7,9	4000	8,0
1,25	7,5	20	7,6	315	7,9	5000	7,9
1,6	7,5	25	7,6	400	7,8	6300	7,9
2	7,5	31,5	7,7	500	7,9	8000	7,9
2,5	7,5	40	7,6	630	8,0	10000	7,9
3,15	7,5	50	7,7	800	8,0	12500	7,8
4	7,5	63	7,8	1000	8,0	16000	7,7
5	7,5	80	7,9	1250	8,0	20000	7,8
6,3	7,6	100	7,9	1600	8,0	25000	7,7
8	7,6	125	7,8	2000	8,0	31600	7,5
10	7,7	160	7,8	2500	8,0	40000	7,4
12,5	7,7	200	7,8	3150	8,0		

Таким образом, для выбранного диапазона частот регистрации импульсов давления, генерируемых электроразрядным устройством, выполняется условие $d \ll \lambda_с$, что позволяет утверждать о корректности измерения спектрально-временных параметров исследуемого процесса в диапазоне частот до 20 кГц [8].

Размещение датчика давления показано на рис. 1. В процессе экспериментальных исследований датчик вводился в камеру как параллельно оси с расположением рабочей части датчика от среза лепестка гидродинамического излучателя на расстоянии 10 мм, так и перпендикулярно оси через корпус камеры на таком же расстоянии от ГДИ. Датчик был снабжен дополнительной диэлектрической втулкой для крепления на элементах конструкции разрядной камеры.

Результаты исследований

Основные исследования выполнялись на стенде с использованием гидродинамического излучателя ГДИ-3, частота собственных колебаний которого при обтекании стационарным потоком жидкости составляет 15 кГц [9]. Параметры разрядного контура выбраны по результатам прикладных исследований технологий, результаты которых изложены во второй части данной статьи.

На рис. 2 приведены характерные временные реализации импульсного давления, регистрируемого в исследуемой разрядной камере без ГДИ. Для них характерно наличие трех равноотстоящих пиков давления (А, В, С) в фазе сжатия. Их появление вызвано отражением первого импульса сжатия от граничных поверхностей камеры и опорной решетки с отверстиями

Необходимо отметить, что в форме регистрируемой волны давления нет интенсивного пика, вызванного первым схлопыванием пульсирующей после разрядной парогазовой полости, характерного для электрического взрыва в свободном объеме жидкости. Конструкция камеры и ее электродная система предусматривала именно обеспечение такого режима электрического взрыва.

На рис. 3 представлены зависимости давление-время, зарегистрированные измерительным гидрофоном при установке на предусмотренное место ГДИ. Кривые характеризуются наложением высокочастотных колебаний на экспоненциально затухающую часть положительной фазы давления, а также отсутствием пиков А и В, имеющихся в сигналах, генерируемых электрическим разрядом в камере без ГДИ. Высокочастотные пульсации давления (на рис. 3 указаны стрелками) имеют характерную длительность, равную приблизительно $70 \cdot 10^{-6}$ с, то есть частоту $f = 14,3$ кГц. Точность вычисления частоты колебаний определялась интервалом дискретизации Δt аналого-цифрового преобразователя (АЦП) анализатора на частоте 20 кГц, составляющем $19,53 \cdot 10^{-6}$ с. Отмечено также то, что в диапазоне малых амплитуд давлений проявляется пик давления, вызванный отражением от граничных поверхностей камеры, аналогичный такому же в волне давления, регистрируемой гидрофоном в разрядной камере без ГДИ.

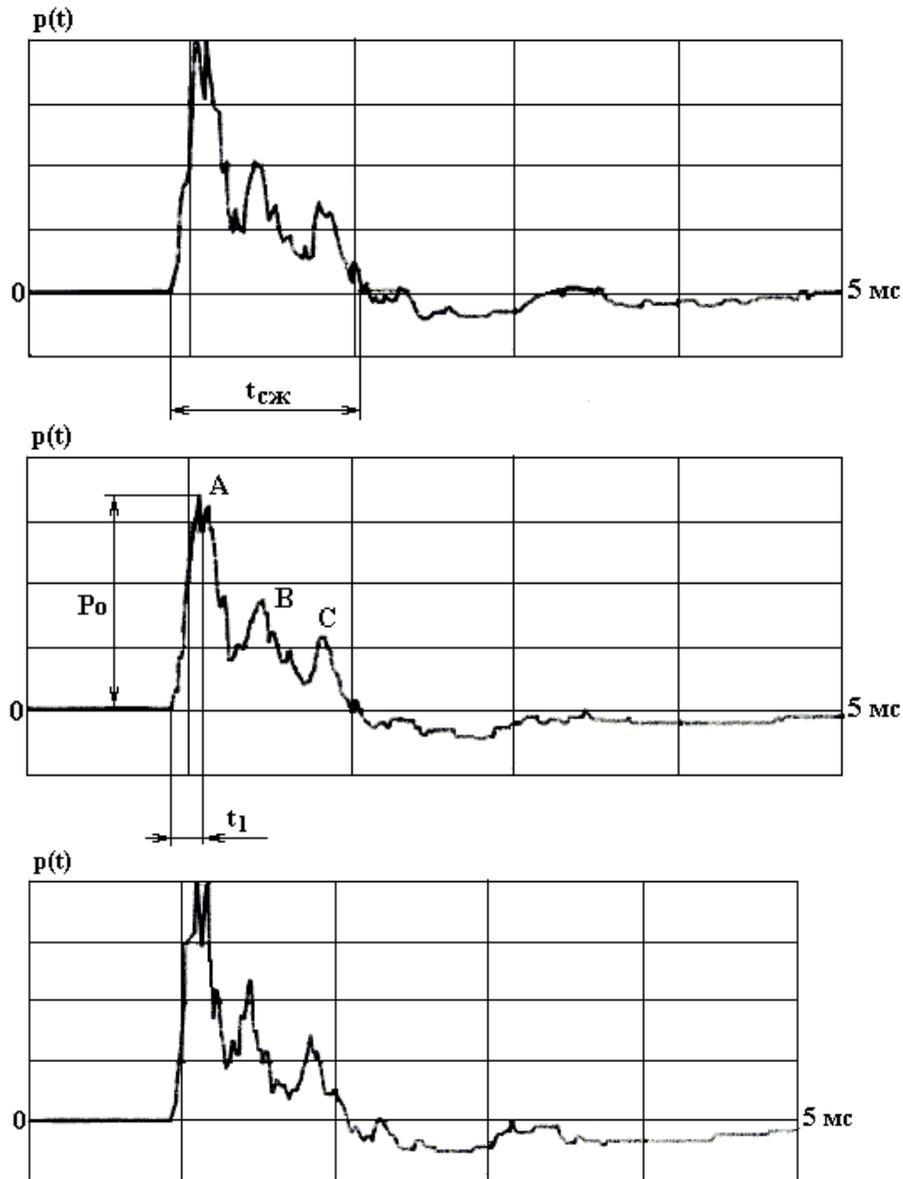


Рис. 2. Зависимость давления во времени для различных разрядов в камере без ГДИ

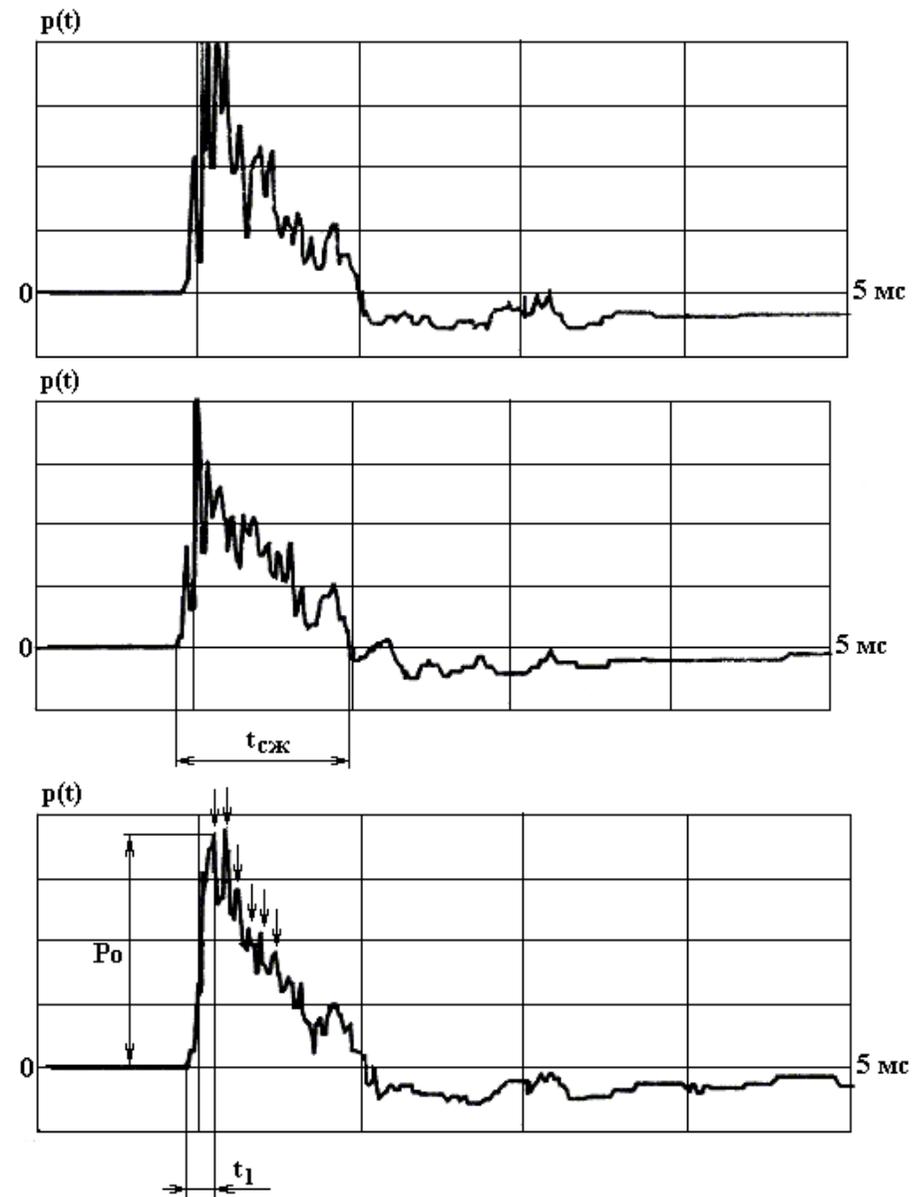


Рис. 3. Зависимость давления во времени для различных разрядов в камере с ГДИ

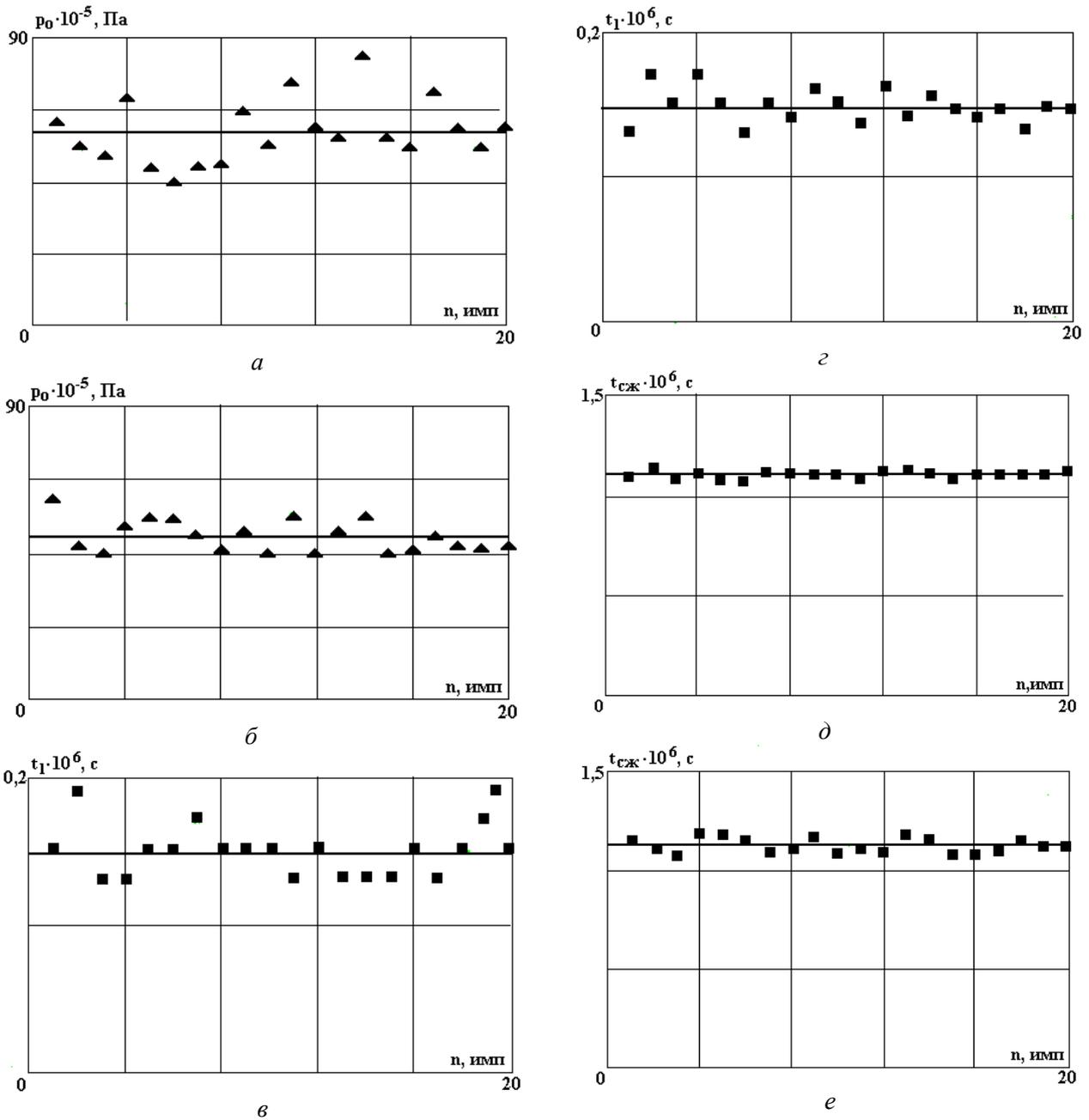


Рис. 4. Экспериментальные и среднестатистические значения: амплитуды давления p_0 ; времени нарастания давления от нуля до максимума t_1 ; длительности положительной фазы давления $t_{сж}$ (с ГДИ – а, в, д; без ГДИ – б, г, е)

На рис. 4, а, в, д и 4, б, г, е приведены экспериментальные и среднестатистические значения амплитуд давления p_0 , времени нарастания давления от нуля до максимума t_1 , времени положительной фазы давления $t_{сж}$ при наличии ГДИ в разрядной камере и его отсутствии соответственно. Здесь экспериментально полученные значения указанных параметров изображены треугольниками и квадратами, а их усредненные по 20 измерениям значения – сплошной линией. Усредненные значения t_1 и $t_{сж}$ практически в обоих случаях не отличаются, а значение амплитуды давления p_0 в случае использования ГДИ увеличивается с $50 \cdot 10^5$ до $60,2 \cdot 10^5$ Па.

На рис. 5, а–г приведены спектральные плотности амплитуд (СПА) характерных электрических сигналов, поступающих с датчика давления в децибеллах. Анализ спектрограмм показывает для данных параметров и конструкции ГДИ повышение звукового давления в диапазоне частот от 8 до 16 кГц с последующим снижением в области более высоких частот. Характерной особенностью полученных спектров сигналов является наличие узкополосного подъема в районе 14 кГц, что подтверждает данные анализа временных реализаций процесса – наличие пульсаций давления с частотой 14,3 кГц (см. рис. 3).

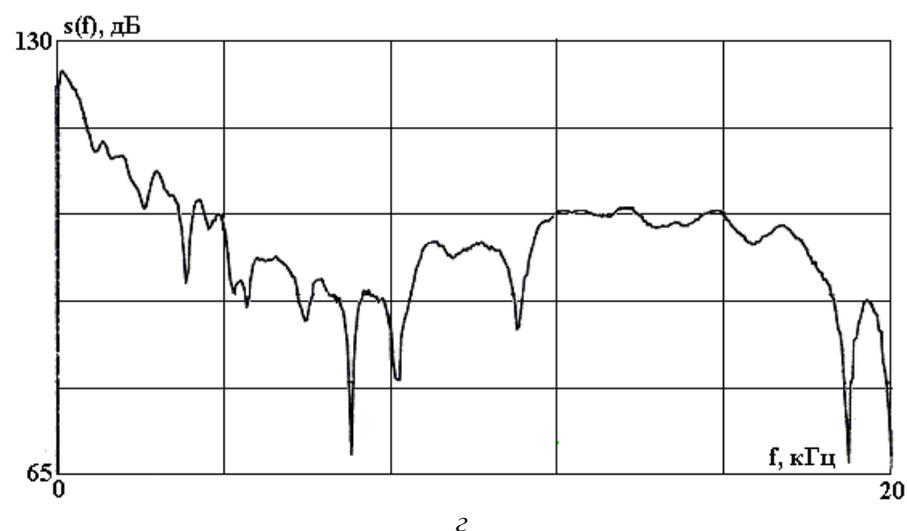
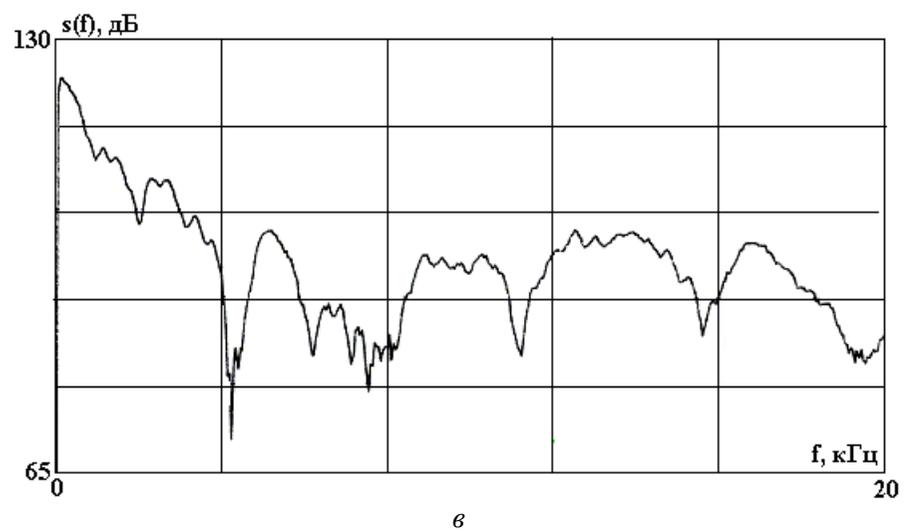
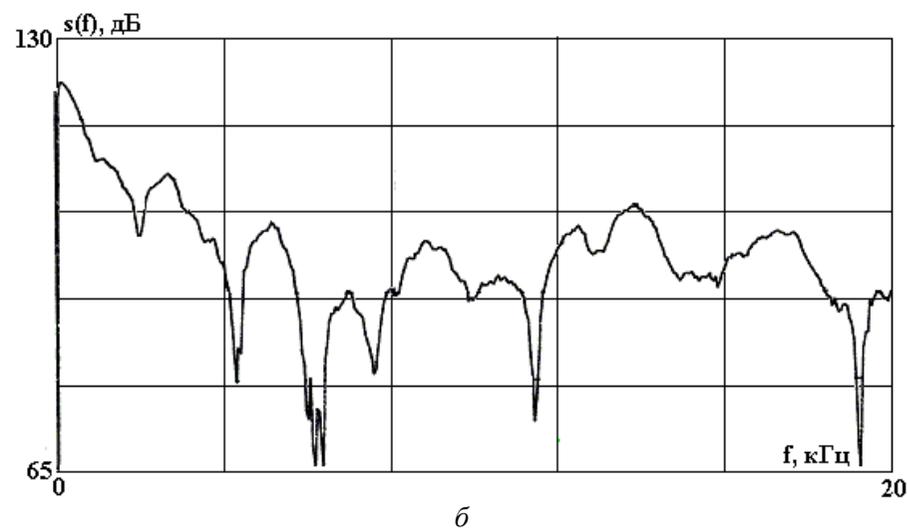
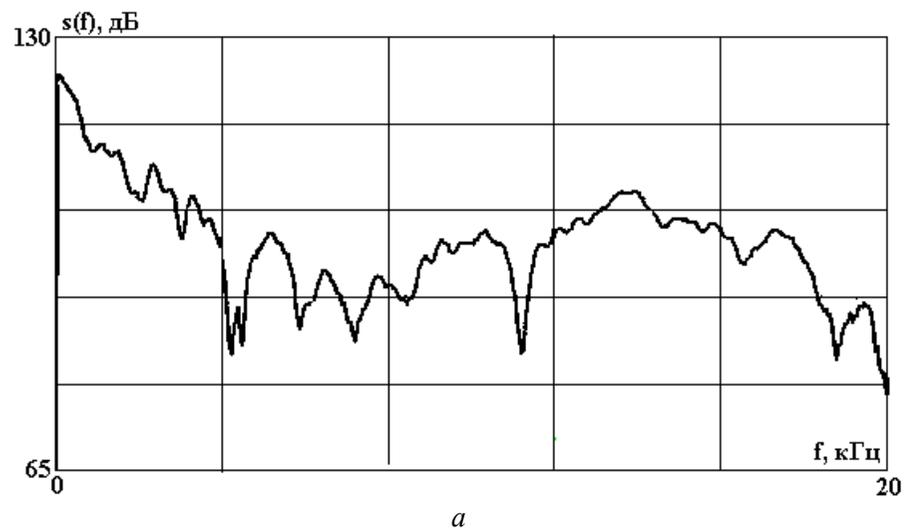


Рис. 5. Характерные спектрограммы импульса в камере с ГДИ для различных режимов разрядов

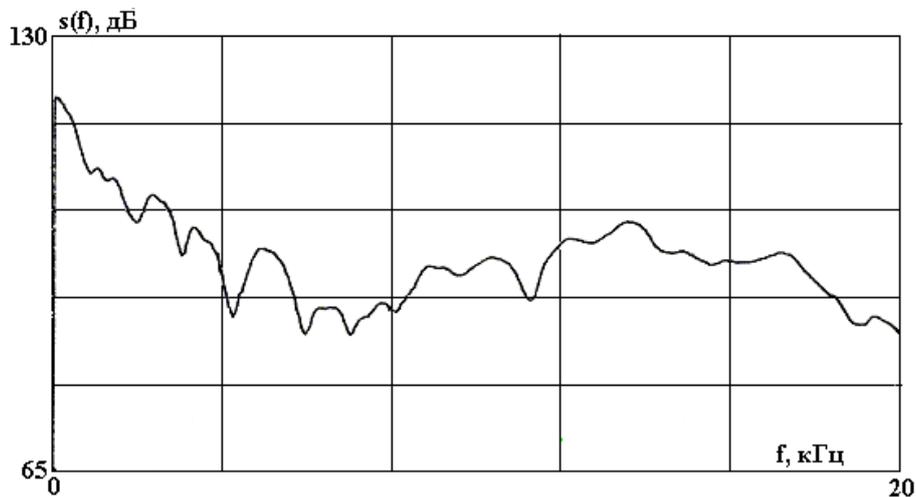


Рис. 6. Результаты статистического спектрального анализа импульса в камере с ГДИ

Нестабильность спектральных характеристик по форме и амплитуде вызвана флуктуациями амплитудно-временных параметров исследуемых импульсов от разряда к разряду.

С целью получения статистически достоверных данных о спектральных характеристиках процесса использовалось усреднение по 32 реализациям отдельно взятых импульсов. Результаты статистического спектрального анализа приведены на рис. 6. Как видно из представленного анализа, уровень звукового давления в полосе частот 14 кГц достигает вполне значительной величины порядка 100 децибел, снижаясь в область более высоких частот. Таковы результаты взаимодействия электро-взрывных импульсных высокоскоростных струй жидкости с гидродинамическим излучателем.

Таким образом, экспериментально доказано, что, используя интенсивные гидропотоки, возникающие при подводном электрическом взрыве, и направляя их на гидродинамические излучатели, можно дополнительно к чисто электровзрывному воздействию получить мощные импульсные ультразвуковые поля, которые будут способствовать возникновению, развитию и интенсификации процессов электровзрывной кавитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П.П. Источник генерируемых электрическим разрядом жидкостных струй // Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев, 1977.
2. Малюшевский П.П., Федосеев В.И., Юцишина А.Н., Петриченко Л.А. Использование импульсного электрического пробоя в газожидкостной среде как нового способа обеззараживания воды // Электронная обработка материалов. 1999. № 3. С. 25 –29.
3. Малюшевский П.П., Катаев Н.М., Малюшевская А.П. Установление акустических характеристик подводных электрических разрядов и среды // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 31 – 34.
4. Назаренко А.Ф., Слиозберг Т.М., Касьяков А.Н., Краковский И.А. Об одном способе генерирования колебаний гидродинамической излучающей системой //Акустика и ультразвуковая техника. 1985. Вып.20. С. 3 – 7.
5. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М., 1976.
6. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений МИ 2040-89. Установки образцовые для градуировки измерительных гидроакустических приемников. М., 1989.
7. Теляшев Л.Л. Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления //Физические основы электрогидравлической обработки материалов. Киев, 1978.
8. Боббер Р.Дж. Гидроакустические измерения. М., 1974.
9. Назаренко А.Ф. Анализ акустических полей гидродинамических излучателей в замкнутых объемах // Акустика и ультразвуковая техника. 1985. Вып.20. С. 9 – 13.

Поступила 3.07.02

Summary

The concept, affirmed actual applied researches encompassing by volume is set up that at fulfilment of an electrode system of the electroexplosive installations working in liquids, by the way of underwater acoustic projector, in an acoustic spectrum of discharge, reproduced by her, there is a well-marked spike of acoustic radiation on frequency of this built-in radiator. The efficiency of conversion of energy entered into discharge, thus is essentially augmented.