

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ РАЗРЯДОВ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ
В АКВАТОРИЯХ**

**OPTIMIZATION OF THE PERIODICITY OF DISCHARGES
OF AN ELECTROHYDRAULIC INSTALLATION TO MAINTAIN
THE REQUIRED SOUND PRESSURE LEVEL IN WATERS**

По представлению академика РАН М.В. Сильникова

К.С. Кулаков, И.К. Бородин, В.С. Помазов

АО «НПО Спецматериалов»

K.S. Kulakov, I.K. Borodin, V.S. Pomazov

В данной статье представлены результаты численного моделирования распространения волны давления, создаваемой электрическим разрядом в жидкости. На основе теоретических и экспериментальных данных определен радиус парогазовой сферы в момент ее схлопывания и отрыва акустической волны давления. Решение уравнения диффузионной акустики с учетом термовязкостного затухания позволило предсказать параметры импульса давления в точках на различных расстояниях от места электрического разряда. Также с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье получены значения амплитуд высших гармоник одиночного импульса. Проанализировав длительность затухания, было определено максимальное время между последовательными электрическими импульсами для поддержания необходимого звукового шума в акваториях.

Ключевые слова: диффузионная акустика, электрический разряд в жидкости, преобразование Фурье, периодичность разрядов.

This article presents the results of numerical simulation of measuring the pressure of a discharge source in a liquid. On the basis of theoretical and experimental data, the range of the plasma boundary at the moment of its collapse and separation of the acoustic pressure wave is determined. The solution of the equation of diffusion acoustics, taking into account the thermoviscous attenuation of the signal, to predict the parameters of the pressure pulse at points on various impacts from the place of occurrence of the discharge. Also, using the fast Fourier transform algorithm, the values of the spectrum of a single pulse were obtained. After analyzing the attenuation duration, the maximum time between successive electrical impulses was determined to maintain the necessary sound noise in the water areas.

Keywords: diffusion acoustics, electric discharge in a liquid, Fourier transform, periodicity of discharges.

Создание устройства для генерации акустического шума является важной частью многих прикладных задач [1]. Упруго связанные молекулы воды в отличие от воздуха имеют свойство распространять звуковые колебания на очень

большие расстояния [2]. Электромагнитные волны под водой быстро затухают.

На распространение звуковых волн в водной среде влияет множество факторов: частота и амплитуда звуковой волны, температура, соленость,

глубина, участки с турбулентностью, пузырьки. Таким образом, сканируя акустическими волнами толщу воды, можно получить много полезной информации.

В основе работы большинства эхолотов лежит пьезоэлектрический эффект [3]. К керамической пластине подводят переменное электрическое напряжение частотой близкой к резонансной. Возбужденные механические колебания вызывают акустические волны в среде.

К достоинствам пьезоэлектрического способа получения акустических волн можно отнести небольшие габариты и возможность регулировки излучаемой частоты [4]. К недостаткам относят сильную зависимость свойств преобразователя от температуры и сравнительно слабый пьезоэлектрический эффект [5].

Одним из альтернативных способов возбуждения акустических волн высокой амплитуды является электрогидравлический эффект [6]. Электрогидравлический эффект представляет собой высоковольтный электрический разряд в жидкой среде. При формировании электрического разряда в жидкости выделение энергии происходит в течение достаточно короткого промежутка времени. Мощный высоковольтный электрический импульс с крутым передним фронтом вызывает появление сверхвысоких импульсных гидравлических давлений. На рис. 1 представлена типичная схема электрогидравлической установки.

Работа установки предполагает относительно медленный заряд накопительного конденсатора от источника питания высокого напряжения, затем, при достижении напряжения

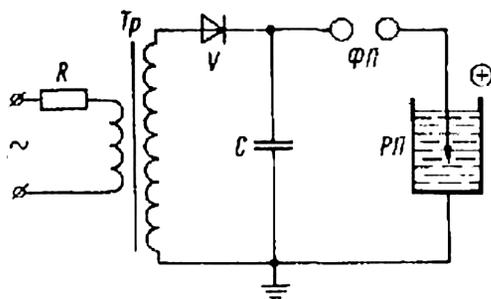


Рис. 1. Электрическая схема для воспроизведения электрогидравлического эффекта, где R — зарядное сопротивление, Tr — трансформатор, V — выпрямитель, C — конденсатор, $\Phi\Pi$ — формирующий промежуток (газовый разрядник), $P\Pi$ — рабочий (искровой) промежуток в жидкости

пробоя разрядника, происходит быстрый разряд конденсатора на разрядный промежуток в жидкости.

Таким образом, актуальной задачей является определение максимального времени заряда и, соответственно, периодичности срабатывания для поддержания необходимого уровня звукового шума в точках на различном удалении от источника.

Начальные условия при численном решении распространения волны давления определяются по формуле [7].

$$E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho \cdot \left(\frac{R_0}{\tau} \right)^2 / (\gamma - 1),$$

где E — запасенная энергия в конденсаторе; R_0 — конечный радиус плазменного канала в сферическом приближении; ρ — плотность жидкости; τ — характерное время ввода энергии в плазменный канал; γ — эффективный показатель адиабаты для плазмы.

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{LC},$$

где C — емкость конденсатора; L — индуктивность контура.

Давление в плазменном канале P перед отрывом ударной волны можно оценить по формуле.

$$P = \rho \cdot \left(\frac{R_0}{\tau} \right)^2.$$

Таким образом, имея конденсаторную батарею емкостью 280 мкФ с запасенной энергией 40 кДж, индуктивность кабельной трассы около 1 мкГн и учитывая, что эффективный показатель адиабаты примерно равен 1,26, можно определить, что конечный радиус плазменного канала будет равен 23 мм, с давлением 210 МПа, что соответствует плотности энергии 807 МДж/м³.

Модель распространения волны давления основывается на решении диффузионного уравнения [8, 9] акустики с учетом термовязкостного затухания в воде.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla w) + c m w = q(x, t),$$

где w — плотность акустической энергии; D — коэффициент диффузии; c — скорость звука в среде; m — коэффициент вязкостного затухания; $q(x, t)$ — функция, описывающая

распределение источников звука в пространстве и времени.

На рис. 2 представлены результаты численного расчета давления в точках непосредственно рядом с местом разряда.

Можно видеть, что время, за которое амплитуда импульса давления падает в 10 раз, составляет примерно 20–50 миллисекунд.

По данным рис. 3 можно сделать вывод, что время спада амплитуды давления в 10 раз сильно зависит от удаленности контрольной точки от источника ударной волны. Частота основной гармоники обратно пропорциональна расстоянию от точки измерения до источника ударной волны. Таким образом, актуальной задачей является определение интенсивности кратных гармоник с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На рис. 4 представлен спектр сигнала импульса давления, рассчитанного в точке на расстоянии 4 метра от источника взрыва, длительностью $T \approx 50$ мкс.

Проверка правильности разложения импульса звукового сигнала в спектр заключается в подстановке значений квадратов амплитуд гармоник в равенство Парсеваля.

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 dt = \frac{A_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2,$$

где T — длительность импульса давления, описываемого функцией $f(t)$, A_n^2 — квадрат амплитуды n -й гармоники в полученном спектре.

На рис. 5 представлен график уровня звукового шума L , полученный путем преобразования значений давления P по формуле.

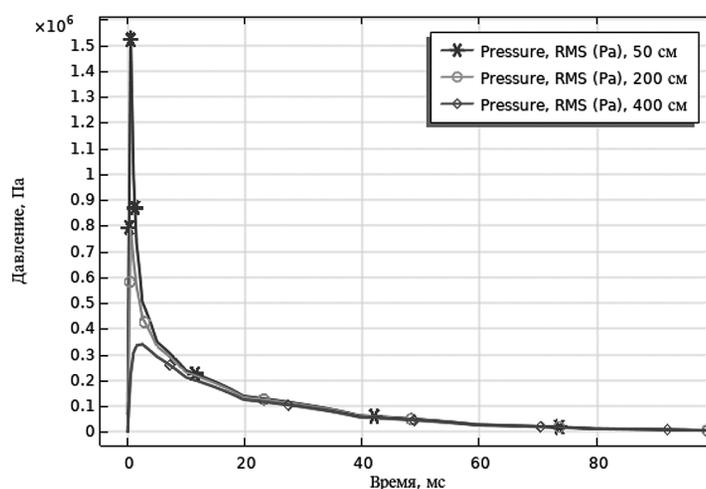


Рис. 2. Рассчитанные импульсы давления в точках на расстояниях 50, 200 и 400 см от искрового промежутка

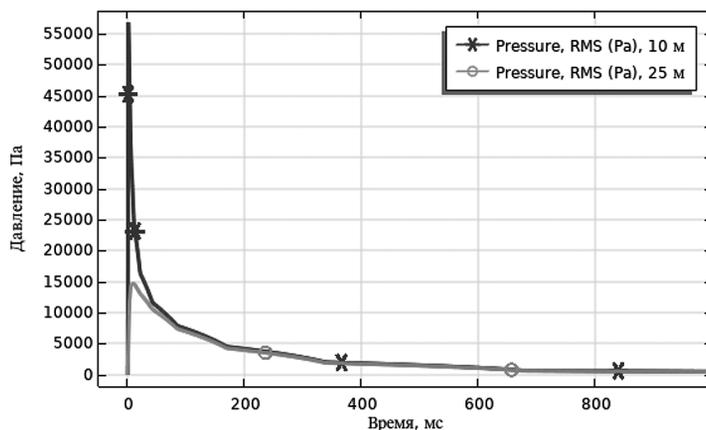


Рис. 3. Рассчитанное давление в точках на расстояниях 10 и 25 метров от искрового промежутка

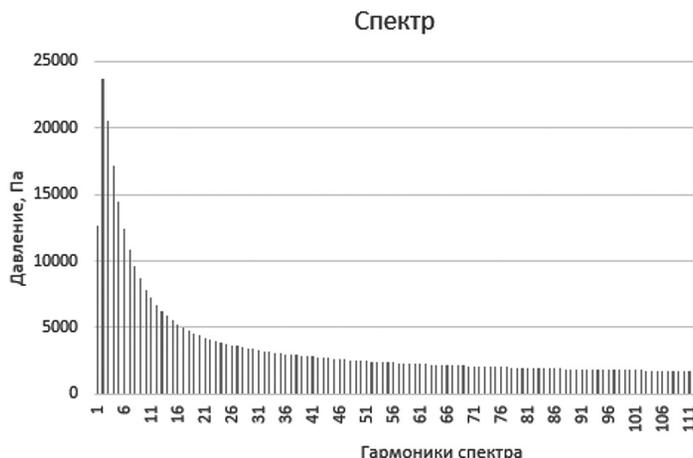


Рис. 4. Спектр импульса, полученного с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, $f_1 \approx 20$ Гц

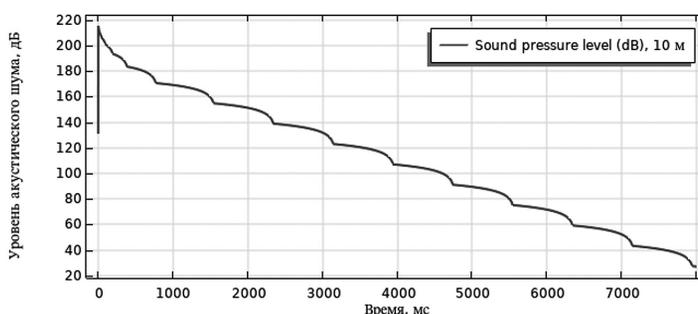


Рис. 5. Временная зависимость уровня звукового шума на расстоянии 10 метров от источника разряда

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{P}{1[\text{мкПа}]} \right).$$

Определение времени спада уровня звукового шума позволяет максимизировать период работы разрядной установки. Тем самым увеличить срок ее эксплуатации и обеспечить оптимальное энергопотребление [10].

Выводы

Создана динамическая модель распространения волны давления.

Выявлена зависимость между частотой основной гармоники спектра сигнала и удаленности точки измерения от источника электрического разряда.

С помощью быстрого преобразования Фурье получен спектр одиночного импульса давления с потерями менее 10 % высших гармоник.

Определено время спада уровня звукового шума в различных точках акватории относительно источника разряда.

Литература

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидролокатор>
2. <https://habr.com/ru/post/191594/>
3. <https://piezo.ucoz.ru/index/0-29>
4. Физическая акустика, под ред. У. Мэзона, пер. с англ., т. 1, ч. А. — М., 1966;
5. Матаушек И., Ультразвуковая техника, пер. с нем. — М., 1962.
6. Ультразвуковые преобразователи, пер. с англ., под ред. Е. Кикучи, — М., 1972.
7. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. — Л.: Машиностроение, 1986.
8. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. — М.: Издательство Наука. 1971.
9. <https://www.comsol.ru/blogs/sweet-dreams-with-diffusion-acoustics/>
10. Агошков В.И., Дубовский П.Б., Шутяев В.П. Методы решения задач математической физики. — М.: Изд. ИВМ РАН, 2001
11. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита стационарных объектов. — СПб., 2021.