

УДК 534.1

© Е. А. Красюков, Т. Г. Демьянов, В. В. Петросьянц, 2024

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УДАРОМ

Разработана экспериментальная установка генератора мощных гидроакустических сигналов на основе эффекта электрогидродинамического удара. Экспериментальная установка рассчитана на создание разрядов в жидкости с импульсной мощностью более 10 МВт и частотой следования разрядных импульсов до 30 Гц. Предложены две конструкции гидроакустических антенн с ударным возбуждением в форме двух параллельных пластин и цилиндра. Проведено моделирование процессов распространения ударных волн в этих антеннах. Обоснован выбор цилиндрической конструкции гидроакустической антенны с ударным возбуждением. На основе экспериментальных данных построена диаграмма направленности цилиндрической антенны и предложена ее математическая модель. Найдена зависимость мощности излучения антенны с ударным возбуждением от расстояния. Разработана методика расчета таких антенн. Показана возможность использования гидроакустических антенн с электрогидравлическим ударом в системах дальней подводной связи.

Кл. сл.: электрогидравлический удар, звуковое давление, диаграмма направленности, коэффициент усиления, добротность, частота колебаний

ВВЕДЕНИЕ

Явление электрогидравлического удара (ЭГУ) широко используется в промышленности для технологических целей: для дробления горных пород [1, с. 63], штамповки металла, в химических процессах и т.д. В медицине это явление используется для дробления камней в почках, а в военных целях для отпугивания водолазов, т.к. оно способно создавать на небольших расстояниях сверхмощное звуковое давление [2, с. 94]. Известны работы, где данное явление используется в целях профилирования рельефа дна [3, с. 167], для чего формируют энергию электрогидравлического взрыва от 500 до 24 000 Дж. Способность ЭГУ создавать большие значения звуковых давлений может быть использована для создания мощных гидроакустических излучателей (антенн) для нужд связи.

Целью данной работы является разработка и исследование гидроакустического излучателя с электрогидравлическим ударом направленного действия.

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С УДАРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На рис. 1 приведена функциональная схема установки.

Давление на фронте ударной сферической волны в морской среде определяется по формуле [4, с. 6]:

$$P \approx 121.6 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\eta \cdot C \cdot U^2}}{r} \right)^{1.13},$$

где: P — давление, формируемое ударной волной, Па; C — емкость конденсатора, Ф; U — напряжение на конденсаторе, В; η — коэффициент преобразования электрической энергии разряда в механическую энергию ударной волны ($0 < \eta < 0.35$); r — расстояние от стенки излучателя до эпицентра взрыва, м.

Так как на излучатель действует высокое давление, материал излучателя должен быть достаточно прочным и упругим. Такими характеристиками обладает твердый полиэтилен [5, с. 731]. Цилиндрическая жесткость стенок излучателя из полиэтилена находится по следующей формуле:

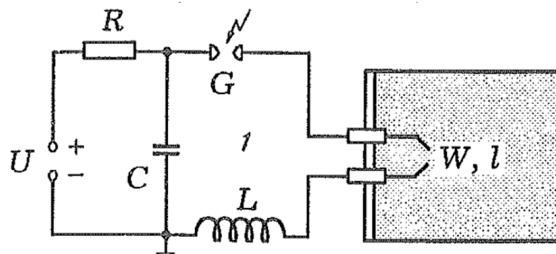


Рис. 1. Функциональная схема установки

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

где: D — цилиндрическая жесткость стенок; h — толщина стенок излучателя, м; E — модуль Юнга для полиэтилена, Па; ν — коэффициент Пуассона для полиэтилена.

Безразмерный коэффициент α , характеризующий прогиб пластин (Приложение, рис. П1) излучателя, находится по формуле:

$$\alpha = \frac{P \cdot h \cdot L^2}{\pi^2 \cdot D},$$

где: L — длина излучателя, м.

Частота колебаний пластин излучателя при нормальном атмосферном давлении [6, с. 601] рассчитывается по формуле:

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{n^4 \pi^4 D}{\rho_{\text{полиэт}} h L^4}},$$

где: $\rho_{\text{полиэт}}$ — плотность полиэтилена, кг/м³; g — гравитационное ускорение, 9.8 м/с²; n — номер гармоники (в данном случае ограничимся только первой).

Частота колебаний пластин излучателя под действием избыточного давления находится по формуле:

$$\omega_1 = \Omega_1 \cdot \sqrt{\alpha}.$$

Исходные данные для расчета излучателя приведены в табл. 1.

Результаты расчета параметров излучателя отображены в табл. 2.

Табл. 1. Исходные данные для расчета излучателя

Параметр, ед. изм.	Значение
C , мкФ	0.4
U , кВ	7
η	0.3
r , м	0.025
h , м	0.003
E , Па	$2.6 \cdot 10^8$
ν	0.5
L , м	0.1
$\rho_{\text{полиэт}}$, кг/м ³	$0.93 \cdot 10^3$

Табл. 2. Результаты расчета параметров излучателя

Параметр, ед. изм.	Значение
P , атм	151
P , МПа	15.3
E , Дж	9.8
D	0.8
α	59.7
Ω_1 , кГц	0.52
ω_1 , кГц	4.0

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка представлена на рис. 2 [7, с. 187].

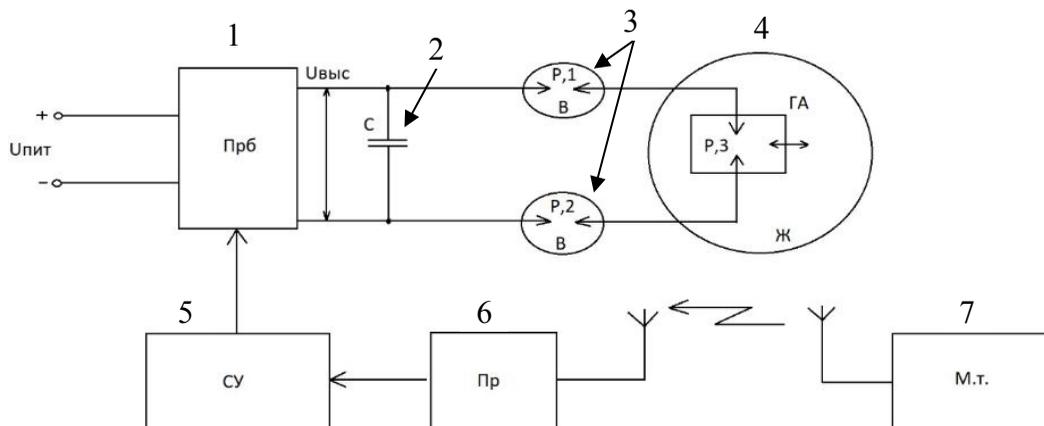


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Структурная схема гидроакустической установки с ударным возбуждением:

- 1 — повышающий преобразователь напряжения;
- 2 — накопительный конденсатор;
- 3 — высоковольтные разрядники;
- 4 — гидроакустический излучатель;
- 5 — система управления;
- 6 — Bluetooth-модуль;
- 7 — передатчик управляющих сигналов.

Преобразователь напряжения 1 питается от аккумуляторной батареи 24 В. Максимальное напряжение на выходе преобразователя может достигать 30 кВ. Система управления 5 на базе микроконтроллера позволяет регулировать амплитуду заряда накопительного конденсатора C 2 и частоту разрядных импульсов f_p [8, с. 98]. В разрядном контуре применены два разрядника 3. Второй разрядник необходим для увеличения крутизны разрядных импульсов, чтобы ударный эффект был максимальным [9, с. 261]. Гидроакустический излучатель с ударным возбуждением 4 состоит из высоковольтного разрядника и антенны. В качестве антенны использовались два типа излучателей: в форме двух параллельных пластин и цилиндра.

Установка управляется дистанционно с помощью Bluetooth-модуля 6. В качестве передатчика управляющих сигналов 7 используется мобильный телефон. Программа управления установкой по-

зволяет осуществлять импульсно-кодовое модулирование сигнала.

Внешний вид экспериментальной установки приведен в Приложении на рис. П2, где слева (а) изображен излучатель цилиндрического типа, а справа (б) — генератор электрогидродинамических ударов без кожуха.

Исследования проводились в бассейне глубиной 1.5 м и диаметром 3 м. В качестве датчика гидроакустических сигналов использовался гидрофон с пьезокерамическим первичным измерительным преобразователем с чувствительностью 140 мкВ/Па и диапазоном рабочих частот до 20 кГц. Для наблюдения принимаемых гидроакустических сигналов использовался цифровой осциллограф фирмы Keysight модели DSOX 1204A/G с запуском по фронту исследуемого сигнала.

Гидроакустический излучатель и гидрофон располагались на расстоянии 2.45 м друг от друга. Излучатель и гидрофон размещались так, чтобы успеть принять исследуемый сигнал раньше прихода отраженных сигналов. Глубина погружения составляла 1 м. Излучатель крепился на поворотном устройстве.

На рис. 3 приведена осциллограмма принятого сигнала. Сигналы были получены для следующего режима работы установки: напряжение на накопительном конденсаторе 7 кВ, частота следования 2 Гц и угол поворота излучателя 45° относительно гидрофона.

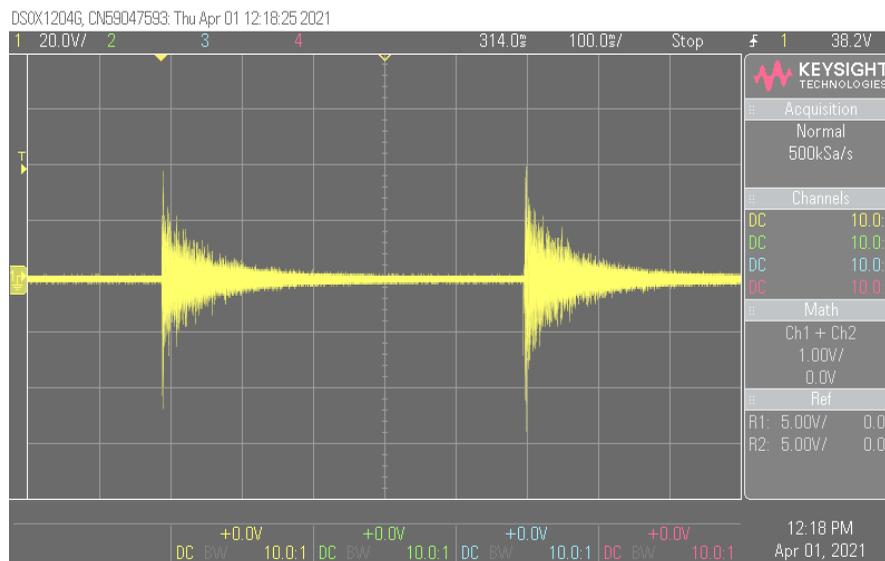


Рис. 3. Осциллограмма принятого сигнала

Табл. 3. Расчеты диаграммы направленности излучателя

№ п/п	Угол поворота излучателя относительно приемника, φ	Экспериментальное эффективное звуковое давление $P_{\text{эксп}}$		Расчетное эффективное звуковое давление $P_{\text{расч}}$	
		кПа	о.е.	кПа	о.е.
1	0°	252	2.9	234	2.7
2	45°	177	2.1	175	2.0
3	90°	85.8	1	86.1	1

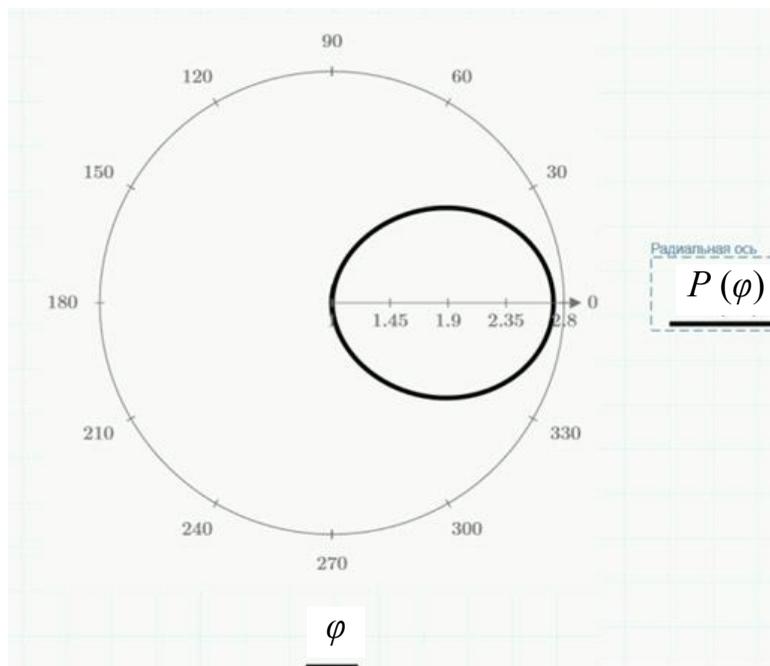


Рис. 4. Диаграмма направленности цилиндрической антенны

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С УДАРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Экспериментальные результаты

С помощью экспериментальной установки (Приложение, рис. П2) проведены исследования процессов распространения гидроакустических волн для электрогидравлического излучателя (антенны) цилиндрической формы. Результаты измерений приведены в табл. 3, а на рис. 4 приведена диаграмма направленности, построенная для одного из направлений оси цилиндрической антенны. Основная гармоника одиночного сигнала в результате его спектрального анализа получилась равной 4.3 кГц.

Моделирование процессов распространения сигналов в антеннах с электрогидравлическим ударом

Моделирование процесса распространения ударной волны осуществлялось в программном

комплексе StartFlow [10, с. 21]. В качестве исследуемого излучателя были выбраны излучатели в виде цилиндра и параллелепипеда. На рис. 5 приведены результаты моделирования для антенны в форме цилиндра (а) и параллелепипеда (б) в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Сравнение диаграмм направленности антенн цилиндрической формы и в виде параллелепипеда показывает, что в горизонтальной плоскости их диаграммы направленности совпадают. В вертикальной не совпадают. За счет рассеяния энергии в вертикальной плоскости для излучателя в виде параллелепипеда максимальное излучение сигнала будет меньше, чем в цилиндрической антенне по оси излучения. Этот результат подтверждают экспериментальные исследования формы диаграммы направленности цилиндрической антенны. Цилиндрическая антенна обеспечивает усиление сигнала по оси излучения по сравнению с ненаправленным излучением порядка 2.7 раза.

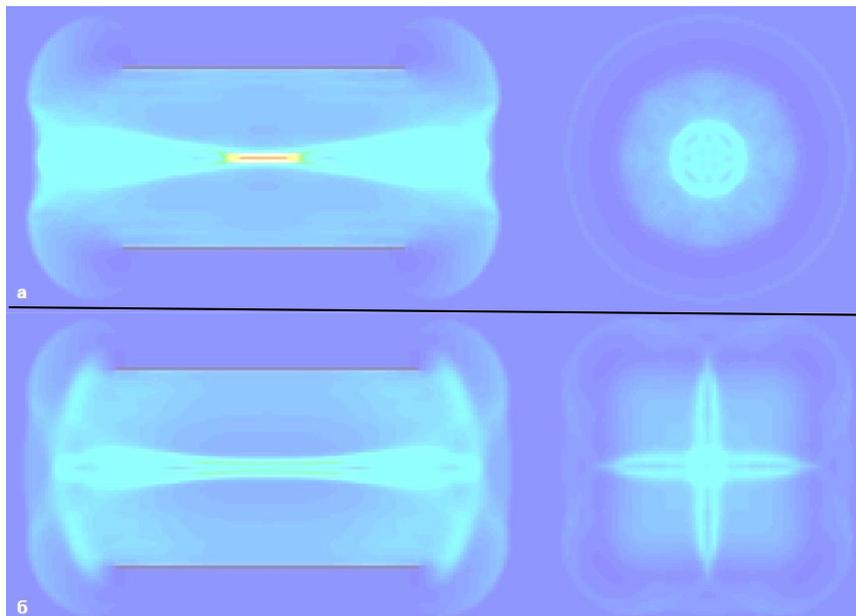


Рис. 5. Результаты моделирования для антенны в форме цилиндра (а) и параллелепипеда (б) в двух плоскостях в ПК StartFlow

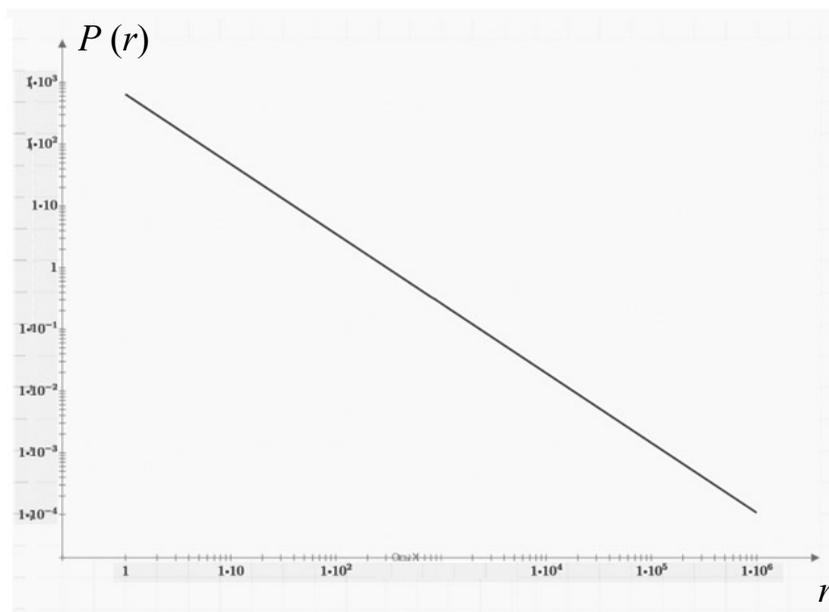


Рис. 6. Зависимость звукового давления, создаваемого цилиндрической антенной, от расстояния

Математическая модель электрогидравлического излучателя с ударным возбуждением

В результате анализа данных, полученных экспериментальным путем, предложена математическая модель, описывающая диаграмму направленности излучателя цилиндрического типа:

$$P_{\text{цилиндр}} = 121.6 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\eta \cdot CU^2}}{r} \right)^{1.13} \cdot e^{\cos(\varphi)},$$

где: $P_{\text{цилиндр}}$ — звуковое давление, создаваемое цилиндрической антенной, кПа; φ — угол поворота антенны; C — емкость конденсатора, Ф; U — напряжение на конденсаторе, В; η — коэффициент

преобразования электрической энергии разряда в механическую энергию ударной волны ($0 < \eta < 0.35$); r — расстояние между излучателем и гидрофоном, м.

На рис. 6 приведена зависимость звукового давления, создаваемого цилиндрической антенной, от расстояния.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цилиндрическая конструкция антенны позволяет обеспечить более узкую диаграмму направленности по сравнению с антенной, выполненной в виде параллелепипеда. Поэтому для увеличения расстояния подводной связи целесообразнее использовать цилиндрическую антенну.

В результате электрогидравлического взрыва в конструкции антенны возникают собственные механические колебания с добротностью $Q \leq 10$. Частота этих колебаний практически не влияет на энергетические показатели антенны, т.к. энергия взрыва передается передним фронтом волны.

Экспериментальная установка при напряжении $U = 7$ кВ и емкости $C = 0.4$ мкФ создает на выходе гидравлического излучателя ударную волну с давлением $7 \cdot 10^3$ кПа. На расстоянии 100 км

от излучателя давление упадет с 230 дБ до 94 дБ, а на расстоянии 1000 км до 75 дБ.

Частота ударных волн ограничена временем заряда накопительного конденсатора и может достигать нескольких десятков герц. Такие низкие частоты не позволяют эффективно передавать аналоговую информацию в больших объемах и с большой скоростью. Однако такие ударные волны могут представлять интерес в качестве цифровых сигналов для импульсно-кодовой модуляции.

Подобные электрогидравлические генераторы с ударным возбуждением могут использоваться в системах дальней подводной связи, где не требуются больших скоростей и объемов передаваемой информации.

ВЫВОДЫ

Разработан генератор гидроакустических сигналов с ударным возбуждением и цилиндрической антенной. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие целесообразность использования электрогидравлических излучателей с ударным возбуждением в системах передачи сигналов на сверхдальние расстояния.

ПРИЛОЖЕНИЕ

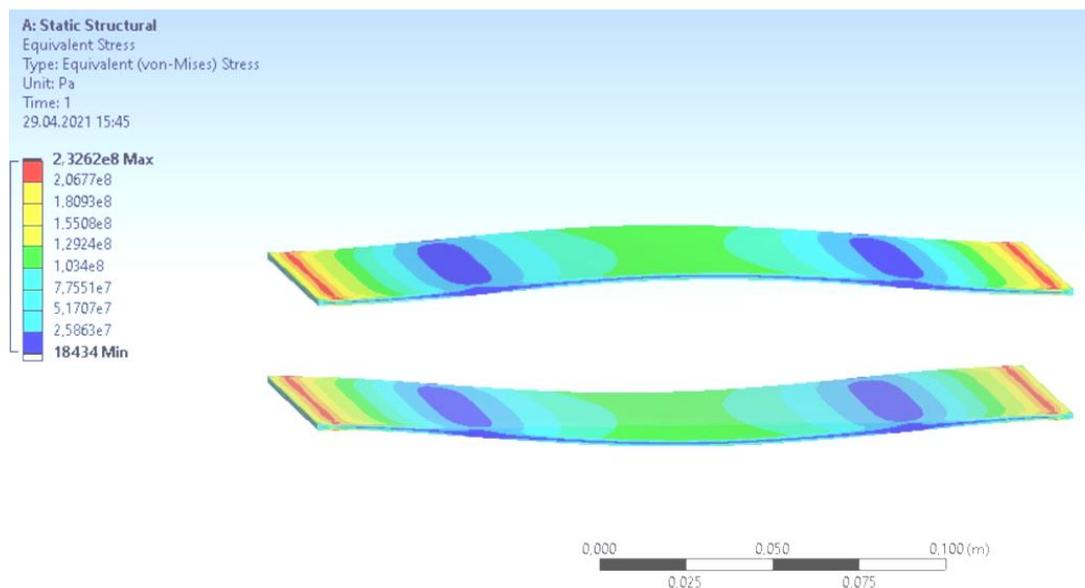


Рис. П1. Прогиб пластин излучателя.

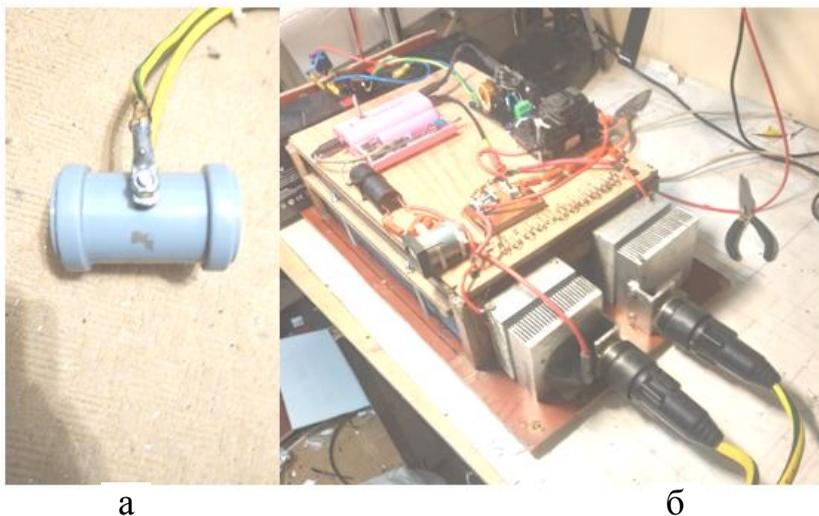


Рис. 12. Внешний вид экспериментальной установки.
а — цилиндрический излучатель, б — устройство без кожуха

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности: учебник. Ленинград: "Машиностроение", Ленинградское отделение, 1986. 253 с.
2. *Шемигон Н.Н., Петраков А.В.* Охрана объектов. Техника и технологии. М.: Энергоатомиздат, 2005. 680 с.
3. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 435 с.
4. *Бровин А.В.* Использование эффекта электрогидравлического удара в борьбе с подводным терроризмом // Морской сборник. 2010. № 3. С. 26–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mwogfz>
5. Физика взрыва. Т. 1 / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
6. *Ильгамов М.А.* Изгибные колебания пластины при изменении среднего давления на ее поверхностях // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 5. С. 598–604. URL: https://sciencejournals.ru/cgi/download.pl?jid=akust&year=2018&file=akust5_18v64cont.pdf
7. Морская радиоэлектроника: Справочное издание / Под ред. В.А. Кравченко. СПб.: Политехника, 2003. 246 с.
8. *Римский-Корсаков А.В., Ямщиков В.С., Жулин В.И., Рехтман В.И.* Акустические подводные низкочастотные излучатели: учебник. Ленинград: "Судоостроение", 1984. 184 с.
9. *Кушнин Ф.В.* Электрорадиоизмерения. Ленинград: "Энергоатомиздат", Ленинградское отделение, 1983. 320 с.
10. Учебное пособие VisualMathStart. Учебная программа для газодинамических расчетов StartFlow. 2015. 112 с. URL: <https://visualmathstart.ru/upload/file/download/manual.pdf>

Дальневосточный федеральный университет, Приморский край, г. Владивосток, Остров Русский, п. Аякс, Российская Федерация

Контакты: *Красюков Егор Андреевич*,
krasyukov.eggor@gmail.com

Материал поступил в редакцию 23.07.2024

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF HYDROACOUSTIC ANTENNAS WITH ELECTROHYDRAULIC IMPACT

E. A. Krasiukov, T. G. Demyanov, V. V. Petrosyants

The Far Easter Federal University, city of Vladivostok, Russkii island, Ajax village, Russian Federation

An experimental installation for a high-power hydroacoustic signal generator has been developed. The experimental installation is purposed to generate electric discharges with an impulse power of more than 10 MW and a discharge pulse repetition rate of up to 30 Hz in aquatic medium. Two designs of hydroacoustic antennas with impact excitation are suggested: double plates and cylindrical. The choice of a cylindrical shaped antenna has been substantiated. Based on experimental data, a directional diagram is drawn, and a mathematical model of a cylinder-shaped antenna is suggested. The power of sound propagation is found to be a function of distance. The calculation method for such antennas has been developed. The suitability of electrohydraulic antennas for high-distance underwater sound propagation was shown.

Keywords: electrohydraulic impact, sound pressure, directional diagram, magnification coefficient, quality factor, frequency of fluctuations

REFERENCES

1. Yutkin L.A. *Ehlektrogidravlicheskiy ehffekt i ego primeneniye v promyshlennosti: uchebnyy* [Electrohydraulic effect and its application in industry: textbook]. Leningrad, "Mashinostroeniye", Leningradskoe otdeleniye Publ., 1986. 253 p. (In Russ.).
2. Shemigon N.N., Petrakov A.V. *Okhranaobektov. Tekhnika i tekhnologii* [Facility security. Techniques and technologies]. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 2005. 680 p. (In Russ.).
3. Kedrinskiy V.K. *Gidrodinamika vzryva: ehksperiment i modeli* [Explosion hydrodynamics: experiment and models]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2000. 435 p. (In Russ.).
4. Brovin A.V. [Use of electrohydraulic shock effect in the fight against underwater terrorism]. *Morskoi sbornik* [Marine collection], 2010, no. 3, pp. 26–30. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mwogfz>
5. Orlenko L.P., editor. *Fizika vzryva. T. 1* [The physics of explosion. Vol. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 832 p. (In Russ.).
6. Ilgamov M.A. [Bending oscillations of a plate at change of average pressure on its surfaces]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical Physics], 2018, vol. 64, no. 5, pp. 598–604. (In Russ.). URL: https://sciencejournals.ru/cgi/download.pl?jid=akust&year=2018&file=akust5_18v64cont.pdf
7. Kravchenko V.A., editor. *Morskaya radioehlektronika: Spravochnoe izdanie* [Marine Radio Electronics: Reference Edition]. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 2003. 246 p. (In Russ.).
8. Rimskii-Korsakov A.V., Yamshchikov V.S., Zhulin V.I., Rekhman V.I. *Akusticheskie podvodnye nizkochastotnye izluchateli: uchebnyy* [Acoustic underwater low-frequency radiators: a textbook]. Leningrad, Sudostroeniye Publ., 1984. 184 p. (In Russ.).
9. Kushnir F.V. *Ehlektorradioizmereniya* [Electroradio measurements]. Leningrad, Ehnergoatomizdat, Leningradskoe otdeleniye Publ., 1983. 320 p. (In Russ.).
10. *VisualMathStart. Uchebnaya programma dlya gazodinamicheskikh raschetov StartFlow* [Training program for gas dynamic calculations StartFlow. Tutorial]. 2015. 112 p. (In Russ.). URL: <https://visualmathstart.ru/upload/file/download/manual.pdf>

Contacts: *Krasiukov Egor Andreevich*, krasyukov.egg@gmail.com

Article received by the editorial office on 23.07.2024

INTRODUCTION

The phenomenon of electrohydraulic shock (EHS) is widely used in industry for technological purposes: crushing rocks [1, p. 63], metal stamping, chemical processes, etc. In medicine, this phenomenon is used to crush kidney stones, and for military purposes to scare off divers, since it is capable of creating super-powerful sound pressure at short distances [2, p. 94]. There are works where this phenomenon is used for the purpose of profiling the bottom relief [3, p. 167], for which the energy of an electrohydraulic explosion from 500 to 24 000 J is formed. The ability of the EGU to create high values of sound pressure can be used to create powerful hydroacoustic emitters (antennas) for communication needs.

The purpose of this work is to develop and study a hydroacoustic emitter with a directional electrohydraulic impact.

CALCULATION AND MODELING OF A HYDROACOUSTIC ANTENNA WITH IMPACT EXCITATION

Fig. 1 shows the functional layout of the setup.

Fig. 1. The functional layout of the setup

The pressure at the front of a spherical shock wave in a marine environment is determined by the formula [4, p. 6]:

$$\Delta P \approx 121.6 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\eta \cdot C \cdot U^2}}{r} \right)^{1.13},$$

where: ΔP is the pressure formed by the shock wave, Pa; C is the capacitance of the capacitor, F; U is the capacitor voltage, V; η — coefficient of conversion of electrical energy of discharge into mechanical energy of shock wave ($0 < \eta < 0.35$); r — distance from emitter wall to epicenter of explosion, m.

Since high pressure acts on the emitter, the emitter material must be sufficiently strong and elastic. Hard polyethylene has such characteristics [5, p. 731]. The cylindrical rigidity of emitter walls made of polyethylene is determined by the following formula:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

where D is the cylindrical rigidity of the walls; h is the thickness of the emitter walls, m; E is Young's modulus for polyethylene, Pa; ν is Poisson's ratio for polyethylene.

The dimensionless coefficient α , characterizing the deflection of the plates (Appendix, Fig. П1) of the radiator, is determined by the formula:

$$\alpha = \frac{\Delta P \cdot h \cdot L^2}{\pi^2 \cdot D},$$

where L is the length of the radiator, m.

The frequency of oscillations of the emitter plates at normal atmospheric pressure [6, p. 601] is calculated by the formula:

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{n^4 \pi^4 D}{\rho_{\text{полиэт}} h L^4}},$$

where $\rho_{\text{полиэт}}$ is the density of polyethylene, kg/m³; g is the gravitational acceleration, 9.8 m/s²; n is the harmonic number (in this case, we will limit ourselves to the first).

The frequency of oscillations of the emitter plates under the action of excess pressure is determined by the formula:

$$\omega_1 = \Omega_1 \cdot \sqrt{\alpha}.$$

The initial data for calculating the radiator is given in Tab. 1.

Tab. 1. Initial data for calculating the emitter parameters

The results of calculating the emitter parameters are shown in Tab. 2.

Tab. 2. Results of the calculation of emitter parameters

DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup is shown in Fig. 2 [7, p. 187].

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup

The structural diagram of the hydroacoustic setup with impact excitation includes:

- 1 — step-up voltage converter;
- 2 — storage capacitor;
- 3 — high-voltage dischargers;

- 4 — hydroacoustic emitter;
- 5 — control system;
- 6 — Bluetooth module;
- 7 — control signal transmitter.

Voltage converter 1 is powered by a 24 V battery. The maximum voltage at the converter output can reach 30 kV. Microcontroller-based control system 5 allows regulating the charging amplitude of the storage capacitor C 2 and the frequency of discharge pulses f_p [8, p. 98]. Two spark gaps 3 are used in the discharge circuit. The second discharger is necessary to increase the steepness of the discharge pulses so that the shock effect is maximum [9, p. 261]. A hydroacoustic emitter with shock excitation 4 consists of a high-voltage spark gap and an antenna. Two types of emitters were used as antennas: in the form of two parallel plates and a cylinder.

The setup is controlled remotely using a Bluetooth module 6. A mobile phone is used as a transmitter of control signals 7. The setup control program allows pulse-code modulation of the signal.

The appearance of the experimental setup is shown in the Appendix in Fig. П2, where a cylindrical emitter is shown on the left (a), and an electrohydrodynamic shock generator without a casing is shown on the right (б).

The studies were conducted in a pool 1.5 m deep and 3 m in diameter. A hydrophone with a piezoceramic primary measuring transducer with a sensitivity of 140 $\mu\text{V}/\text{Pa}$ and an operating frequency range of up to 20 kHz was used as a hydroacoustic signal sensor. A Keysight digital oscilloscope DSOX 1204A/G with triggering at the front of the signal being studied was used to observe the received hydroacoustic signals.

The hydroacoustic emitter and the hydrophone were located at a distance of 2.45 m from each other. The emitter and hydrophone were positioned so as to receive the signal under study before the reflected signals arrived. The immersion depth was 1 m. The emitter was mounted on a rotating device.

Fig. 3 shows the oscillogram of the received signal. The signals were obtained for the following operating mode of the setup: storage capacitor voltage of 7 kV, repetition rate of 2 Hz, and emitter rotation angle of 45° relative to the hydrophone.

Fig. 3. Oscillogram of the received signal

STUDY OF ELECTROHYDRAULIC EMITTER WITH IMPACT EXCITATION

Experimental results

Using the experimental setup (Appendix, Fig. П2), studies of the propagation processes of hydroacoustic

waves for an electrohydraulic emitter (antenna) of cylindrical shape were carried out. The measurement results are given in Tab. 3.

Tab. 3. Calculations of the emitter directivity pattern

Fig. 4 shows the radiation pattern constructed for one of the directions of the cylindrical antenna axis. The fundamental harmonic of a single signal as a result of its spectral analysis was equal to 4.3 kHz.

Fig. 4. Radiation pattern of a cylindrical antenna

Modeling of signal propagation processes in antennas with electrohydraulic shock

Modeling of the shock wave propagation process was carried out in the StartFlow software package [10, p. 21]. The radiators, in the form of a cylinder and a parallelepiped, were chosen as the study. Fig. 5 shows the modeling results for an antenna in the form of a parallelepiped (a) and a cylinder (b) in two planes.

Fig. 5. Simulation results for a parallelepiped-shaped (a) and cylinder-shaped (б) antennas using the StartFlow

A comparison of the radiation patterns of cylindrical and parallelepiped antennas shows that their radiation patterns coincide in the horizontal plane. They do not coincide in the vertical plane. Due to energy dissipation in the vertical plane, the maximum signal emission for a parallelepiped-shaped emitter will be less than in a cylindrical antenna along the emission axis. This result is confirmed by experimental studies of the radiation pattern shape of a cylindrical antenna. A cylindrical antenna provides signal amplification along the radiation axis in comparison with non-directional radiation by about 2.7 times.

A mathematical model of an electrohydraulic emitter with impact excitation

As a result of analyzing the data obtained experimentally, a mathematical model was proposed that describes the radiation pattern of a cylindrical emitter:

$$P_{\text{цилиндр}} = 121.6 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{\eta \cdot CU^2}}{r} \right)^{1.13} \cdot e^{\cos(\varphi)},$$

where: $P_{\text{цилиндр}}$ is the sound pressure generated by a cylindrical antenna, kPa; φ is the antenna rotation angle; C is the capacitance of the capacitor, F; U is the capacitor voltage, V; η is the coefficient of conversion of the electrical energy of the discharge into the mechanical energy of the shock wave ($0 < \eta < 0.35$); r is the distance between the emitter and the hydrophone, m.

Fig. 6 shows the dependence of the sound pressure generated by a cylindrical antenna on the distance.

Fig. 6. Dependence of sound pressure generated by a cylindrical antenna on distance

DISCUSSION OF RESULTS. CONCLUSIONS

The cylindrical antenna design allows for a narrower radiation pattern compared to a parallelepiped antenna. Therefore, to increase the underwater communication distance, it is more appropriate to use a cylindrical antenna.

As a result of an electrohydraulic explosion, the antenna design produces its own mechanical oscillations with a quality factor of $Q \leq 10$. The frequency of these oscillations has virtually no effect on the antenna's energy performance, since the explosion energy is transmitted by the leading edge of the wave.

The experimental setup, with a voltage of $U = 7$ kV and a capacitance of $C = 0.4$ μ F, creates a shock wave with a pressure of $7 \cdot 10^3$ kPa at the output of the hydraulic emitter. At a distance of 100 km from the emitter, the pressure drops from 230 dB to 94 dB, and at a distance of 1000 km — to 75 dB.

The frequency of shock waves is limited by the charging time of the storage capacitor and can reach several tens of hertz. Such low frequencies do not allow effective transmission of analog information in large volumes and at high speed. However, such shock waves may be of interest as digital signals for pulse-code modulation.

Similar electrohydraulic generators with shock excitation can be used in long-range underwater communication systems where high speeds and volumes of transmitted information are not required.

A hydroacoustic signal generator with shock excitation and a cylindrical antenna has been developed. Experimental studies have been conducted confirming the feasibility of using electrohydraulic emitters with impulse excitation in ultra-long-range signal transmission systems.

APPENDIX

Fig. П1. Sag of the emitter plates

Fig. П2. External view of the experimental setup. a — cylindrical emitter, б — device without casing