

Summary

In the article the state-in-the art of the electrohydrodynamic (EHD) disintegration of charged drops regarding to the transfer processes in the double phase systems is presented. The role of the EHD disintegration in the transfer processes is analyzed. The necessity of investigations of the influence of physical properties of interacted flows in the gas-drops system on the EHD stability of charged droplets is argued.

П.П. Малюшевский, Л.Г. Петюр, А.И. Вовченко, А.Н. Ющишина, Е.К. Мирошниченко

**РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ
СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ДНЕ ОКЕАНА.
ЧАСТЬ III (Экологичность электроразрядно-химических взрывов)**

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

Глубоководные электроразрядно-химические взрывы (ЭРХВ), очевидно, можно использовать и как инструмент для разделки и измельчения до нужных размеров кусков ГСР при разработке подводных месторождений; и как источники мощных акустических импульсов для подводных маяков, навигационных и геофизических исследований. Достойное место они могут занять и в проведении научных исследований явлений распространения в море ударных волн, подводной реверберации, отражающих свойств границ; обеспечении дальней подводной связи, управления глубоководными подвижными объектами и др. [1–3]. Однако при решении с его помощью этих прикладных задач необходимо знать, как велики возникающие неблагоприятные экологические последствия. Здесь главная оценка должна касаться влияния мощного акустического импульса и токсичности взрыва ЭЖо на флору и фауну моря, а также на человека в море.

Основные гидроакустические характеристики подводного ЭРХВ

Основными физическими параметрами, воздействующими на флору и фауну в непосредственной близости и вдали от места ЭРХВ, являются максимальные давления и характерные длительности гидроакустического сигнала, генерируемого в воде.

Расширение плазменного канала, образованного разряжающимся конденсатором и быстрое сгорание ЭЖо, а затем последующие пульсации послеразрядной газовой полости (ППП) сопровождаются излучением волн сжатия и разрежения. На рис. 1 приведена типичная форма гидроакустического сигнала, зафиксированного гидрофоном на глубине 40 м при подводном ЭРХВ на глубине 20 м. Волны сжатия излучаются на стадии образования плазменного канала (участок 1 на рис. 1) и при последующих схлопываниях послеразрядных газовых полостей (участки 2 и 3 на рис. 1), когда высокое давление в канале и затем в сжатой газовой полости вызывает уплотнение прилегающих слоев жидкости. Генерируемые волны сжатия чередуются с относительно длинными волнами разрежения, возбуждаемыми на стадиях, когда давление в полости ниже гидростатического. Отметим, что длительность фазы разрежения t_p больше времени волны сжатия $t_{сж}$ в 5–10 раз [2] и зависит от давления в жидкости на глубине ЭРХВ, запасаемой электрической энергии и количества поджигаемой водонаполненной экзотермической смеси. Основной период пульсации T_0 приблизительно в два раза больше времени последующего схлопывания полости – T_1 . Период пульсации T_0 связан с величиной полной энергии пульсирующей послеразрядной газовой полости и гидростатическим давлением известной формулой Виллиса [4]:

$$T_0 = 1,14\sqrt{\rho} \frac{E_n^{1/3}}{P_0^{5/6}} = 1,14\sqrt{\rho} \frac{(kE_3)^{1/3}}{P_0^{5/6}} \quad (1)$$

где $\rho = 1000$ – плотность воды, кг/м^3 ; $P_0 = (1+0,1h) \cdot 10^5$ – гидростатическое давление на глубине источника упругих колебаний, Па; h – глубина погружения источника, м; E_n – энергия пульсирующей полости, Дж; $E_3 = \frac{CU^2}{2}$ – энергия, запасаемая в конденсаторах, Дж; k – коэффициент преобразования запасенной энергии в энергию пульсации полости (для бесперебойного разряда в воде $k = 0,03$, для разряда с иницированием проволочкой и ЭРХВ $k = 0,15-0,30$); U – напряжение, В; C – емкость конденсаторной батареи, Ф.

Энергия ЭРХВ расходуется на акустическое и световое излучение, пульсации образовавшейся послеразрядной полости и т.п. Поэтому волны сжатия, обусловленные первой и второй пульсациями (участки 2 и 3 на рис. 1), имеют меньшую амплитуду. Согласно работе [5] для определения энергетических и спектральных характеристик импульсного сигнала взрывного типа можно ограничиться учетом лишь первых двух пульсаций.

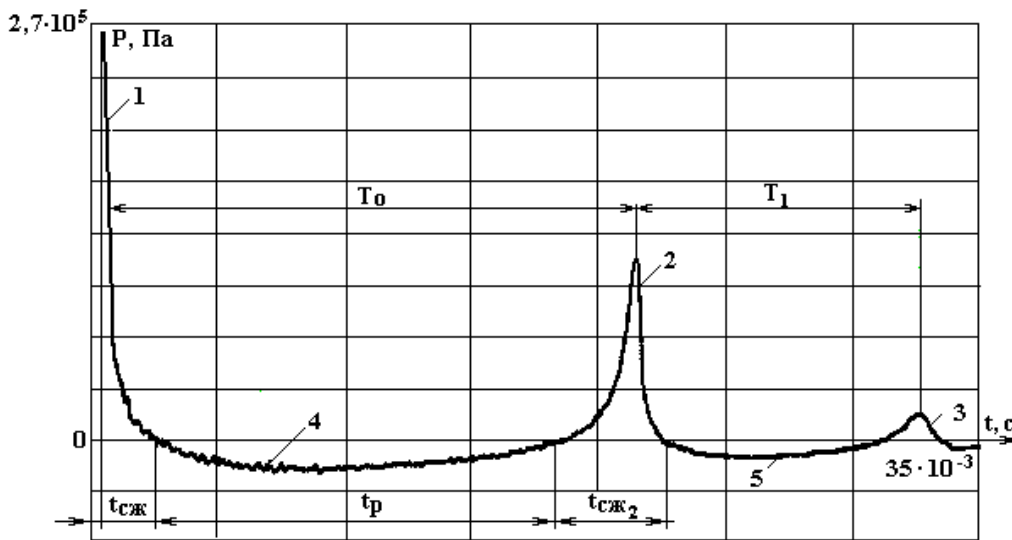


Рис. 1. Общая форма гидроакустического сигнала ЭРХВ.

Спектральная плотность амплитуды приведенного на рис. 1 сигнала изображена на рис. 2.

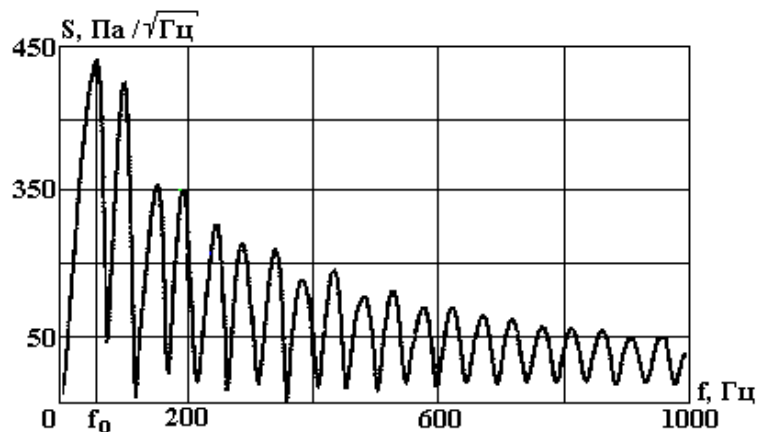


Рис. 2. Спектральная плотность амплитуды сигнала (рис. 1).

Наличие максимума в спектре на частоте $f_0 = 50$ Гц обусловлено основной частотой пульсаций полости, что находится в полном соответствии с формулой [3]:

$$f_0 = 1/T_0. \quad (2)$$

Спад огибающей спектральных составляющих акустического излучения ЭРХВ, как и взрыва ВВ, с увеличением частоты имеет характер затухающей синусоиды.

Для оценки полосы частот, в которой выделяется основная доля генерируемой энергии (до 80%) можно пользоваться известной формулой [6]

$$f = 1/t_{сж}. \quad (3)$$

Для приведенного на рис. 1 сигнала имеем $t_{сж} = 2 \cdot 10^3$ с, $f = 500$ Гц, что хорошо согласуется с данными рис. 2, в соответствии с которыми была рассчитана доля акустической энергии, выделившаяся до частоты 500 Гц, которая составила 84% от энергии импульса в полосе 1000 Гц.

Результаты экспериментальных исследований параметров гидроакустического поля ЭРХВ в придонных слоях воды океанического шельфа

Экспериментальные исследования возможного отрицательного воздействия ЭРХВ на биологические объекты, попадающие в зону его воспроизводства, были выполнены первой научной экспедицией при переходе научно-исследовательского судна «Гипанис» из Хабаровска–Владивостока в Николаев южными морями трех океанов. Экономическое положение исследователей не позволило организовать исследования непосредственно на месторождениях ГСР на больших глубинах, поэтому экспериментальные стенды ставились на шельфах. Однако, по нашему мнению, обитатели коралловых рифов южных морей более уязвимы, чем глубоководные обитатели «черных курильщиков» в зонах формирования сульфидных рудных проявлений. Эти обитатели хорошо приспособлены к постоянному действию громадных гидростатических давлений и насыщенности придонных вод фантастическим количеством химических веществ в форме растворов и взвесей мельчайших твердых частиц. Их жизнь, по существу, проходит в коллоидных растворах сульфидных руд. Поэтому то, что «хорошо» для обитателей рифа, – уж точно «отлично» для обитателей «курильщика».

Особый практический интерес представляют исследования количественных значений таких параметров гидроакустических сигналов, генерируемых ЭРХВ, как максимально достижимые уровни первого и второго положительных пиков (приведенных к расстоянию 1 м), длительность первого положительного пика Δt_1 , интервал времени между пиковыми значениями первого и второго импульсов T_0 , называемого в дальнейшем «периодом пульсации ППП», а также уровни спектральных составляющих сигналов.

Основные глубины постановки стендов от 2 до 30 м. Поджигающий ЭКо импульс электроразрядного устройства формировался разрядом батареи конденсаторов при таких уровнях накопленной энергии: $E_1 = 141$ Дж ($C = 1,25$ мкФ; $U_0 = 15$ кВ) и $E_2 = 529$ Дж ($C = 2$ мкФ; $U_0 = 23$ кВ). Длина межэлектродного промежутка, замыкаемого ампулой (открытой по торцам) с ЭКо, во всех экспериментах была 35 мм.

Расстояние между измерительным гидрофоном, регистрирующим излучаемую волну сжатия, и разрядным узлом стенда изменялось в пределах от 6 до 9 м. Приемник давления, находящийся внутри специального устройства, компенсирующего шумы турбулентности обтекания чувствительного элемента датчика подводными течениями, был соединен с каркасом стенда гибким фалом. При этом для уменьшения погрешности измерения расстояния «источник-приемник» использовался метод регистрации временной задержки прихода акустического сигнала на гидрофон.

Суть метода состоит в следующем. При иницировании ЭКо с помощью электрического разряда электрический сигнал, поступающий с измерительного трансформатора разрядного контура стенда, поступает на вход запуска осциллографа типа С8-17 и магнитофона типа 7005 (фирмы «Брюль & Кьер»), регистрирующих гидроакустический сигнал. Временной интервал t_3 между запуском осциллографа электромагнитной наводкой 1 и приходом фронта ударной волны, излучаемой исследуемым ЭРХВ, умноженный на скорость звука в воде, является искомым нами расстоянием (см. рис. 3). Оценка погрешности измерения расстояния, вносимой при измерении амплитуд волн сжатия и разрежения, приведенных к 1 м, будет приведена ниже.

Внешние проявления каждого ЭРХВ и поведенческие реакции биологических объектов, попадающих в поле воздействий и наблюдений, регистрировались на видеопленку видеокамерой с широкоугольным объективом, которая устанавливалась в герметичном боксе на расстоянии 1,4 м от оси электродной системы для воспроизводства ЭРХВ. При благоприятной погоде часть таких подводных наблюдений производилась с поверхности органолептически с помощью простых оптических приспособлений. Немедленно после каждого ЭРХВ под воду ныряли аквалангисты и отбирали пробы воды из ближней зоны разрядного промежутка и областей на расстояниях 0,5 и 1,0 м от центра межэлектродного промежутка.

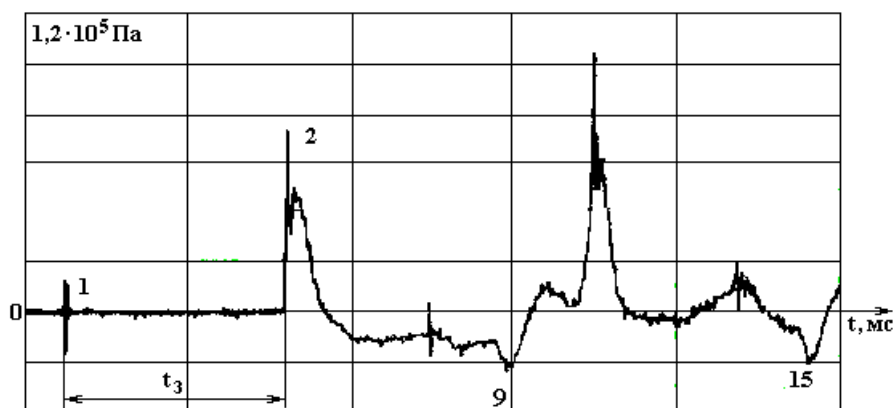


Рис. 3. Зарегистрированный в море сигнал ЭРХВ.

На первом же полигоне в Тайваньском проливе были произведены все работы, связанные с отладкой технологии проведения подводно-технических и спуско-подъемных операций стенда и системы измерений.

Характерные временные реализации импульсов давления, генерируемых ЭРХВ на глубинах 2; 19 и 22 м, приведены на рис. 4.

Анализ периода пульсаций ППП, образуемых ЭРХВ на различных глубинах, при $U_0 = 15; 19; 23$ кВ и $C = 1,25$ мкФ, позволил установить, что зависимость их от глубины и запасаемой энергии практически не отличается от расчетных. Значения расчетных T_0 и экспериментально полученных T_0 , периодов пульсации полости для сравнения приведены в табл. 1.

При расчетах периода пульсации ППП коэффициент преобразования запасенной энергии в энергию расширения и схлопывания полости был равен 0,03, то есть по величине характерным для беспробойного разряда. Само по себе это явление было понятным – разряд в высокопроводящей морской воде при замыкании межэлектродного промежутка в так же проводящей ЭКо. Однако после осмотра поднятого на палубу электроразрядного устройства было обнаружено, что ЭКо не подожглась и не произошло реакции ее горения. Попросту говоря, ЭКо осталась в состоянии на момент установки. Очевидно, это было следствием еще и нехватки энергии, запасенной конденсаторной батареей.

Таблица 1. Параметры ППП

h , м	U , кВ	E , Дж	$T_{0э}$, мс	T_0 , мс
2,0	21,5	289	4,24	4,30
6,0	22,0	303	3,39	3,46
14,0	23,0	331	2,50	2,54
19,0	19,0	226	1,80	1,91
22,0	15,0	141	1,51	1,506

Для решения возникших осложнений была в два раза увеличена энергия накопителя и изменен состав ЭКо так, что резко увеличилась энергоотдача источника в среду. Последующие эксперименты подтвердили увеличение коэффициента преобразования k в начале до $k = 0,2$, а затем до $k = 0,25$.

Искажение традиционной формы импульса давления (представлен на рис. 1) на глубине 2 м (см. рис. 4) вызвано суперпозицией прямой и отраженной от поверхности волны. Этим же объясняется появление в “хвосте” сигнала, зарегистрированного измерительным гидрофоном при чистом электрическом разряде на глубинах 19 и 22 м, и повернутого по фазе на 180° .

Увеличение запасаемой энергии и первое изменение состава ЭКо привело к значительному увеличению амплитудных и временных параметров излучаемого ЭРХВ сигнала. На рис. 5 приведены типичные временные реализации импульсов давления, излучаемых при инициировании электрическим разрядом взрывообразного сгорания ЭКо на глубинах 5,5; 6,5; 9,0 м соответственно. В экспериментах с новым составом ЭКо и увеличенной емкостью конденсатора разрядной цепи был получен коэффициент преобразования электрохимической энергии в энергию пульсации ППП $k = 0,2$. Результаты измерений периода пульсации полости T_0 , и его расчетных значений T_0 по формуле (1) приведены в табл. 2.

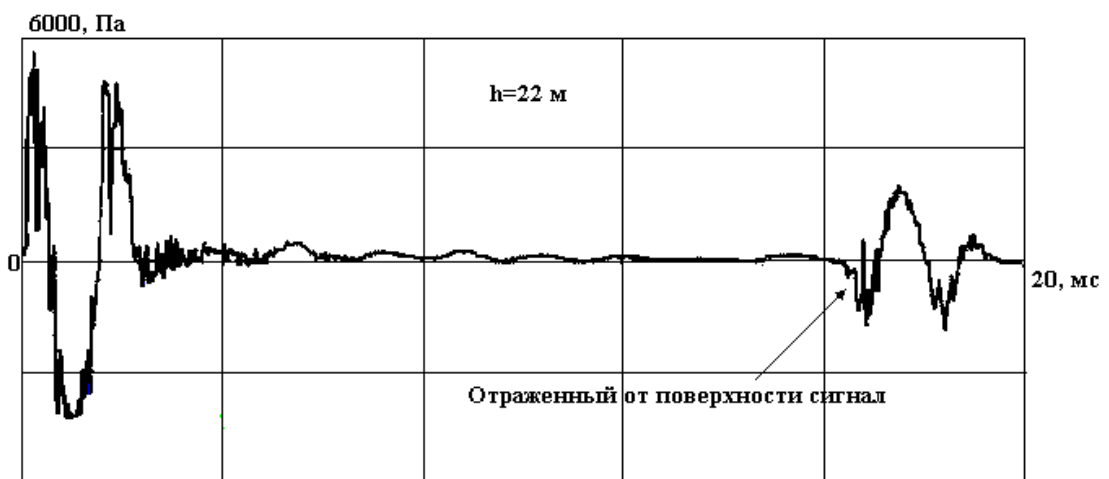
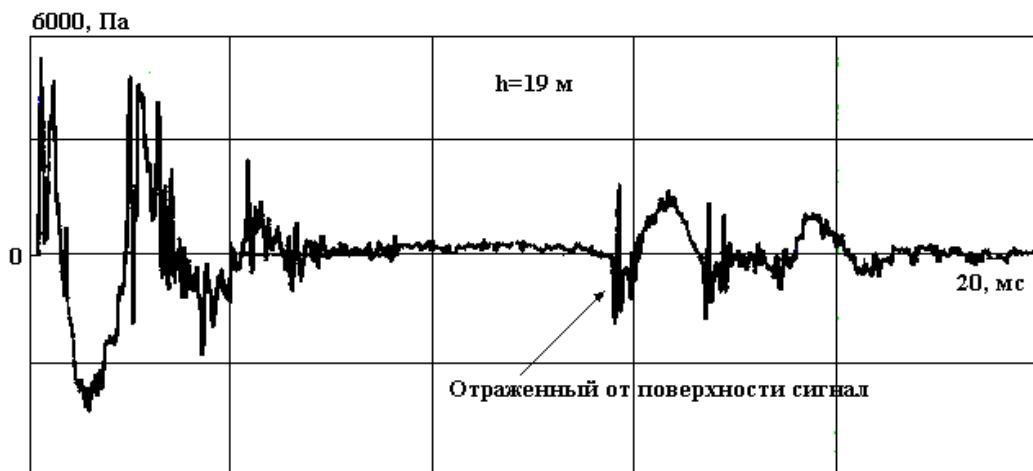
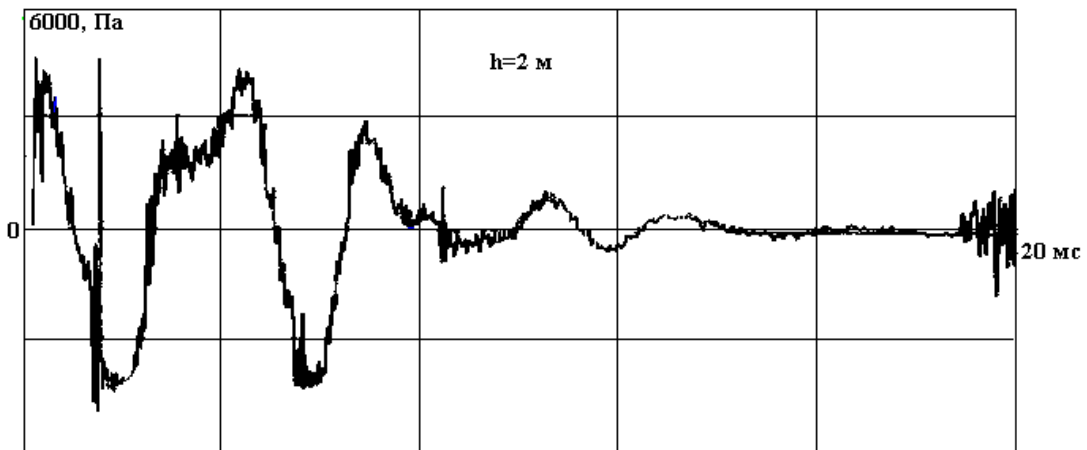


Рис. 4. Временная реализация импульсов давления на различных глубинах (1 ЭКо).

Таблица 2. Параметры ПГП

$h, \text{м}$	$U, \text{кВ}$	$E, \text{Дж}$	$T_{0\text{в}}, \text{мс}$	$T_{0\text{с}}, \text{мс}$
2,0	20,0	400	9,20	9,10
5,5	21,5	462	7,75	7,71
6,5	22,0	484	7,51	7,43
9,0	23,0	529	6,85	6,80
15,0	22,5	506	5,41	5,33
25,0	23,0	529	4,20	4,09

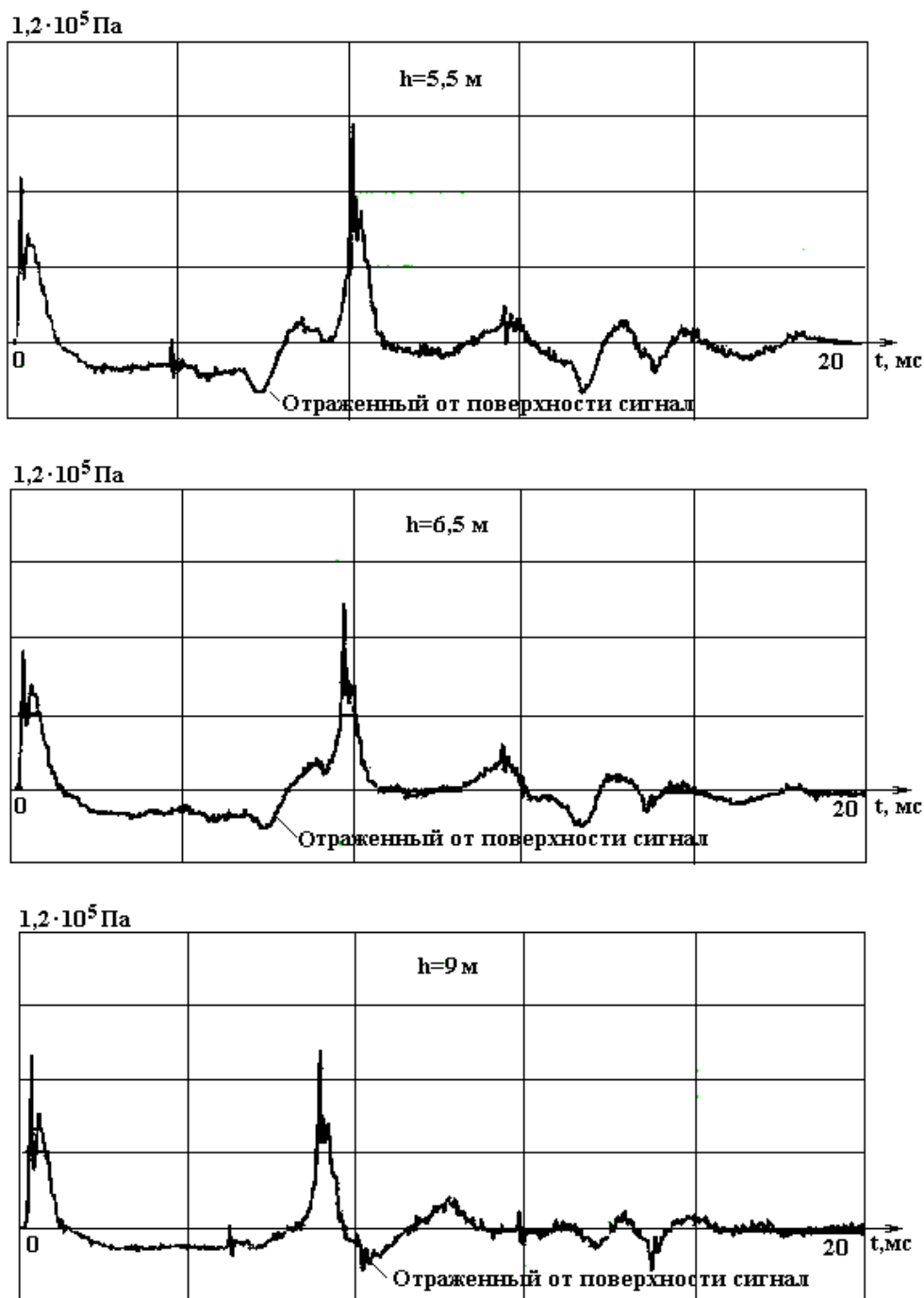


Рис. 5. Временная реализация импульсов давления на различных глубинах (III ЭЖо).

С целью исследования возможности увеличения коэффициента преобразования k состав ЭЖо был изменен еще раз. При этом удалось увеличить k до 0,25. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по среднестатистическим значениям периода пульсаций приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры ПГП

$h, \text{ м}$	$U, \text{ кВ}$	$E, \text{ Дж}$	$T_{0э}, \text{ мс}$	$T_0, \text{ мс}$
4,5	20,3	410	8,62	8,43
6,0	21,5	462	7,99	8,09
9,0	22,0	484	7,24	7,11
12,0	22,5	506	6,47	6,39
15,0	23,0	529	6,00	5,83

Для иллюстрации на рис. 6 приведены характерные импульсы давления, генерируемые ЭРХВ с наибольшим k на глубинах 4,5; 6 и 15 м соответственно.

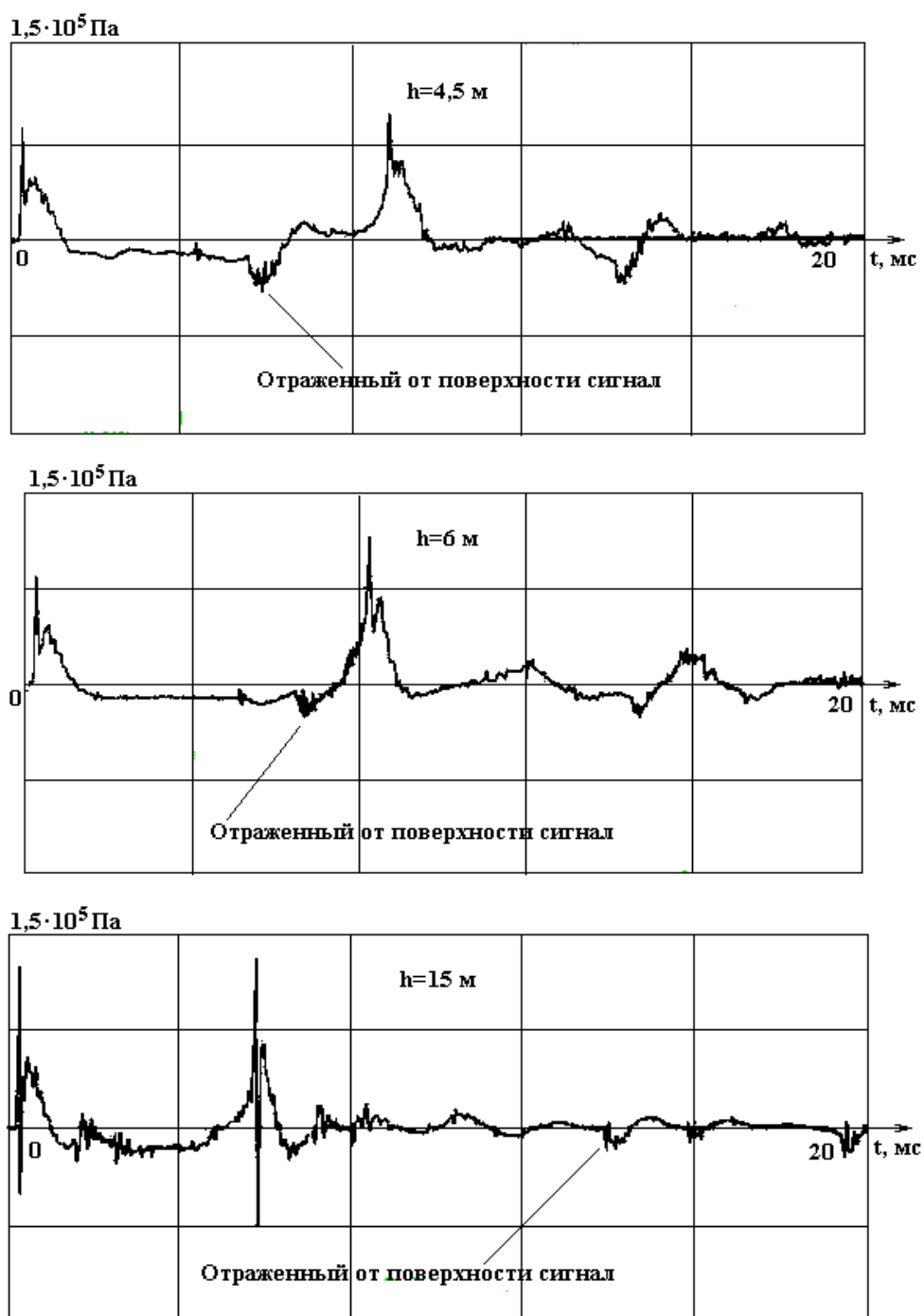


Рис. 6. Временная реализация импульсов давления на различных глубинах (II ЭКо).

Прослеживаются общие закономерности в поведении Δt_1 : с увеличением глубины погружения Δt_1 уменьшается и особенно сильно до глубины 6–8 м, а для глубин больших 10 м изменение длительности приходится на единицу расстояния уменьшается и стабилизируется.

Длительности первого пика давления в зависимости от глубины воспроизводства ЭРХВ, составляют: $\Delta t_1 = 800; 620; 570; 530; 520$ и 517 мкс при $h = 2; 6; 10; 18; 20$ и 30 м, соответственно.

В противоположность основным временным параметрам T_0 и Δt_1 , определяющим спектральный состав излучаемых сигналов, величина максимального генерируемого давления не обнаруживает простой зависимости от гидростатического давления, что можно объяснить в данном случае неоднородным составом используемых в процессе проведения экспериментов ЭКо, малым диапазо-

ном изменения рабочих глубин. В результате можно сделать заключение только об общих тенденциях поведения импульса давления:

- амплитуда первого пика давления с увеличением глубины погружения уменьшается незначительно;
- максимальное значение отрицательной зоны импульса увеличивается с увеличением глубины погружения ЭРХВ.

Спектральные характеристики импульсов давления, генерируемых ЭРХВ, представляют практический интерес в связи с тем, что ряд вопросов методического характера, возникающих при изучении воздействия импульсов взрывного типа на флору и фауну, получают более простое решение именно в спектральной области.

На рис. 7 представлены спектральные плотности амплитуды импульсов на глубинах 4,5 и 15 м (из временной реализации на рис. 6). Приведенные здесь спектры можно рассматривать как типичные в том смысле, что все они имеют осциллирующий характер, причем ширина и амплитуда первого лепестка всегда больше соответствующих величин последующих лепестков и четко выделяется асимметрия первого лепестка относительно своего экстремума.

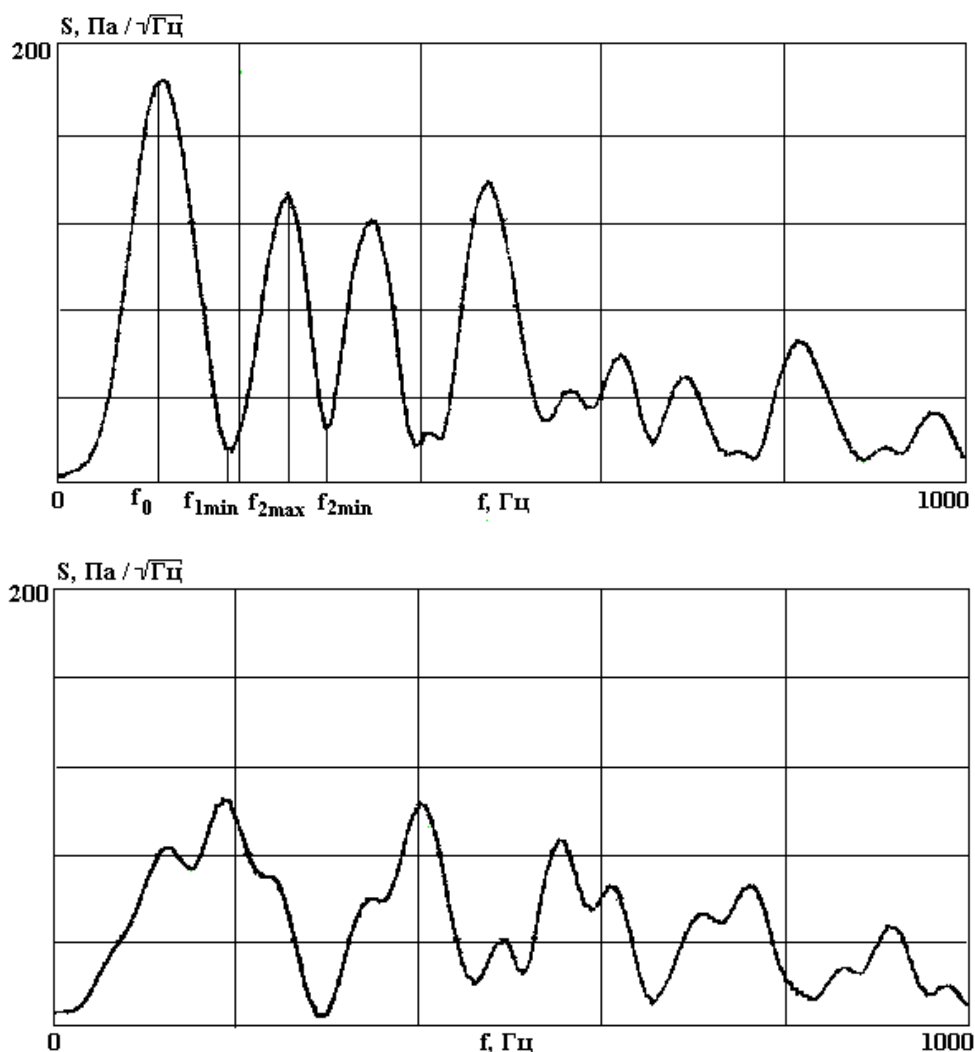


Рис. 7. Спектральная плотность амплитуды импульсов на глубинах 4,5 и 15 м (рис. 6).

Наиболее просто связанной со спектром характеристикой импульса давления является период пульсации ПП. Проведенный по всей совокупности импульсов давления анализ показал, что частота, на которой достигается первый абсолютный максимум в спектре, определяется соотношением (2). Для частот последующих максимумов получены зависимости

$$f_{2max} = 2,15/T_0; f_{3max} = 3,0/T_0, \quad (4)$$

где f измеряется в Гц, а T_0 – в с.

Частоты, на которых достигаются минимумы в спектрах, удовлетворяют следующим соотношениям:

$$f_{1\min} = 1,6/T_0; f_{2\min} = 2,6/T_0; f_{k\min} = (0,6 + k)/T_0; k \geq 3. \quad (5)$$

Погрешности приведенных формул не превышают 10% для всех глубин погружения для значений напряжений $15 \leq U \leq 23$ кВ и составов ЭЖо, использовавшихся при проведении исследований. Изрезанность спектра, изображенного на рис. 7 (нижний), объясняется тем, что разрядный узел исследовательского стенда находился на самом дне и гидрофон регистрировал суперпозицию прямого и отраженного от дна сигнала.

Погрешность определения основных гидроакустических параметров ЭРХВ

Волна давления, генерируемая в воде ЭРХВ, регистрировалась с помощью измерительных гидрофонов типа 8100 фирмы «Брюль & Кьер», а также датчиками типа 2П50, разработанными и изготовленными в ИИПТ АН Украины. Перед проведением экспедиционных работ гидрофоны прошли тарировку в институте на аттестованных ВНИИФТРИ установках ПГУ и УГГ в диапазоне частот до 10 кГц. Паспортная погрешность градуировки датчиков давления составляет 2 дБ.

Электрический сигнал с гидрофона поступал на прецизионный усилитель-формирователь типа 2650 фирмы «Брюль & Кьер», работающий в режиме измерений по заряду, погрешность которого составляет на частотах до 1 кГц $\pm 0,5\%$ и, несколько больше – 1% на частоте 10 кГц. Искажение сигнала при его записи с усилителя на магнитофон типа 7005 той же фирмы составляло меньше 1%.

Регистрация генерируемых ЭРХВ импульсов давления проводилась в полосе частот от 0 до 12,5 кГц. Статистическая и спектральная обработка сигналов проводилась на ЭВМ IN-110 французской фирмы «Intertechnic».

Точность измерения расстояния “гидрофон-источник” зависела от погрешности определения максимумов электрической наводки (I на рис. 3) и фронта ударной волны (2 на рис. 3) во времени. Как показали результаты обработки, при преобразовании аналогового сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя ЭВМ IN-110 в массив дискретных значений, эта ошибка может составлять 4 отсчета, что при снятии цифровых отсчетов аналогового сигнала через 10 мкс на максимальной частоте АЦП составляла $t = 40$ мкс и при скорости звука в воде $c = 1500$ м/с ошибка измерения расстояния составила $r_0 = ct_0 = 0,06$ м. Расстояние “гидрофон-источник” в процессе проведения экспериментов изменялось от 7,64 м до 8,48 м. Таким образом, относительная погрешность измерения расстояния не превышала 0,8%.

При расчете расстояния между гидрофоном и источником упругих колебаний по формуле $r = ct_3$ (здесь t_3 – задержка прихода волны на датчик давления) скорость звука в воде рассчитывалась по формуле Вуда [7]

$$c = 1450 + 4,206t - 0,0366t^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175h, \quad (6)$$

где t – температура, °С; S – соленость, ‰; h – глубина источника, м.

Работы по исследованию параметров упругих волн, генерируемых ЭРХВ, проводились в различных районах Тихого и Индийского океанов. Известно, что соленость воды в Тихом океане составляет 36,9‰, а в Индийском – 36,4‰.

Анализ формулы (6) показывает, что соленость воды оказывает незначительное влияние на скорость звука. Действительно, расчет скорости звука на глубине 2 м при температуре воды 30°С для соленостей 36,4 и 36,9‰, дает значения 1544,9 и 1545,4 м/с соответственно. Заметно большее влияние на значение скорости звука оказывает температура: для солености моря 36,4‰ на глубине 2 м расчет скорости звука по формуле Вуда для температуры окружающей среды 26°С и 30°С дает следующие величины – 1536,2 и 1544,8 м/с. Тем не менее, такое различие в скоростях распространения упругой волны при среднестатистической задержке ее прихода t_3 на гидрофон равной в экспериментах 5 мс может вызвать ошибку при измерении расстояния “источник-датчик” всего 0,043 м.

Приведенные оценки показывают, что погрешностью измерений, вызванную ошибкой измерения расстояний, записи на магнитофон и предварительного усиления, можно пренебречь по сравнению с погрешностью градуировки датчика давления.

Одним из важных звеньев измерительной системы, при прохождении которой в исследуемый сигнал могут быть внесены существенные искажения, является усилитель-формирователь, который производит необходимое усиление исследуемого импульса, поступающего с гидрофона, его фильтрацию в требуемом диапазоне частот. Проведенные экспериментальные исследования показали, что

время нарастания фронта ударной волны $t_m \approx 15$ мкс, при этом достигались максимальные давления волны сжатия, равные $1,2 \cdot 10^6$ Па. Взяв эти величины в качестве амплитудно-временных параметров сигнала на входе фильтра, оценим их на выходе фильтра при различных значениях частоты среза фильтра нижних частот.

На рис. 8 приведены значения амплитуды импульса на выходе фильтра в зависимости от полосы пропускания. Анализ этих зависимостей показывает, что при регистрации максимальных амплитуд давлений, генерируемых ЭРХВ, в частотной полосе используемой аппаратуры фирмы «Брюль & Кьер», равной 12,5 кГц, возможно внесение погрешности до 40%.

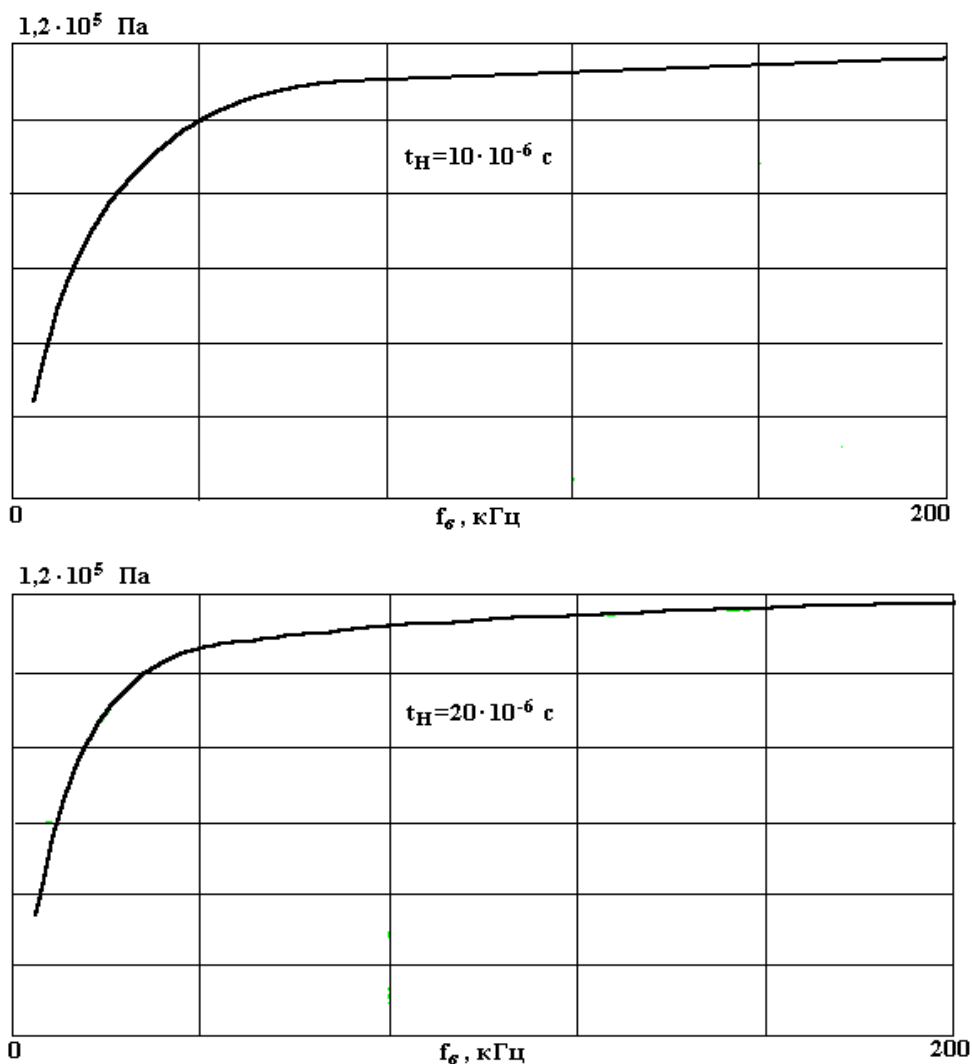


Рис. 8. Амплитуды импульса на выходе фильтра в полосе пропускания.

Влияние ЭРХВ на морскую фауну

Появление в жидкости областей высокого давления и зон разрежения, генерируемых ЭРХВ, может нарушить условия жизнедеятельности живых организмов, растений и даже привести к их гибели. При воздействии волны давления происходит последовательно (по ходу движения волны) всестороннее обжатие тела рыбы или любого биообъекта, если их размеры больше ширины фронта волны. В случае меньших размеров происходит прямое всестороннее обжатие. При этом больше всего сжимаются части, имеющие плотность, отличающуюся от плотности окружающей среды или неравномерную плотность. Если же в теле биообъекта имеются органы, содержащие газ (плавательный пузырь, кишечник, костные пазухи и др.), то на их границе происходит отражение волны давления в противофазе, то есть в виде волны разрежения – возникают растягивающие усилия и напряжения. Ориентировочно считается, что давления в $(4-5) \cdot 10^6$ Па в ударной волне уже являются опасными для жизни рыб [3].

Подводные организмы, лишённые воздушных включений, оказываются более стойкими к воздействию упругих колебаний. Медузы, например, выдерживают значительно бóльшие давления,

чем рыбы, что объясняется и отсутствием в их организме газовых пузырей, и однородной плотностью их тела, очень мало отличающейся от плотности окружающей среды. У растений подводного мира также наблюдается бóльшая стойкость к изменению давления. Некоторые виды водорослей, плавающих за счет воздушных пузырьков, после воздействия на них ударных волн опускаются на дно, однако с течением времени восстанавливают положительную плавучесть и всплывают снова. Водоросли, грибки и бактерии, как правило, погибают только в непосредственной близости от центра возбуждения взрывообразного импульса давления [3].

Наши экспедиционные исследования гидроакустических параметров ЭРХВ на НИС «Гипанис» показали, что максимальные уровни давлений в диапазоне использованных энергий в импульсе (с учетом погрешности измерений) достигают $2,4 \cdot 10^5$ Па на расстоянии 0,1 м от центра канала разряда. Это давление уже меньше опасного для жизни рыб. Однако давление очень резко увеличивается при уменьшении данного расстояния, поэтому для описанного диапазона изменения давления ЭРХВ следует считать, что $k \leq 0,1$ м является границей опасной зоны для биообъектов. Прямые наблюдения рыб, попадающих в зону ЭРХВ на расстояние большее указанного, подтверждают это – на расстояниях больших 0,2 м от центра ЭРХВ рыбы вообще не реагируют на произведенный импульс упругих колебаний: не изменяют траектории движения, не ускоряются, но остаются неподвижными, если момент производства импульса застал их неподвижными.

В работе [9] для оценки степени воздействия мощных источников звука на ихтиофауну приняты следующие критерии: летальный R_l и безопасный R_b радиусы действия. Летальный радиус соответствует границе, в пределах которой наблюдается гибель живых организмов, а безопасный – за пределами которой не наблюдается никаких поражений. Известно [8], что для взрыва взрывчатых веществ (ВВ) летальный и безопасный радиусы связаны с их весом соотношениями

$$R_l = k_l(G)^{0,5}; \quad R_b = k_b(G)^{0,5}; \quad (7)$$

где G – масса ВВ, в кг; R_l и R_b , в м; $k_l = 27$, $k_b = 45$.

Произведем оценку R_l и R_b для электрического разряда в жидкости при различных запасаемых энергиях. При этом будем помнить, что амплитудное значение импульса давления ЭРХВ практически остается таким же, как и при электровзрыве (ЭВ) – изменяется (увеличивается) длительность. Кроме того, согласно [4] тротильный эквивалент ЭВ с запасаемой энергией 4 кДж – взрыв 1 г тротила.

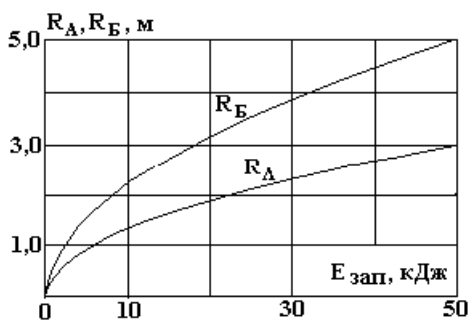


Рис. 9. Зависимость летального и безопасного радиусов нахождения биообъектов.

На рис. 9 приведены зависимости летального и безопасного радиусов в зависимости от запасаемой накопителем энергии. При генерировании в жидкости импульсов давления эквивалентных по энергии ЭВ с запасаемой энергией 50 кДж значения R_l и R_b могут достигать 3 и 5 м соответственно. В проведенных на НИС «Гипанис» исследованиях максимальная эквивалентная энергия ЭРХВ достигала величины 700 Дж, для которой расчет летального и безопасного радиусов составляет 0,36 и 0,6 м соответственно.

Анализ экологического влияния химических продуктов подводных ЭРХВ

Как показано выше, после каждого подводного ЭРХВ под воду ныряли аквалангисты и через примерно 30 с отбирали пробы воды из ближней окрестности разрядного промежутка. Отобранные пробы хранились на борту судна и по возвращению из экспедиционного рейса исследовался их химический состав с помощью рентгеновского микроанализатора, а также производилась оценка токсичности продуктов реакций.

Усредненные данные по составу веществ ЭЖо (в весовых %): аммиачная селитра (25,8), азотнокислый натрий (12,5), полиакриламид (1,0), алюминий-пудра ПАП-2 (7,1), алюминий-порошок ПА-4 (32,7), калий фосфорнокислый однозамещенный (0,05), тиосульфат натрия (0,2), бихромат калия (1,0), вода дистиллированная (20,7). В качестве горючего в данном составе использовались алюминиевые пудра и порошок. Окислителями являлись аммиачная и натриевая селитры. Полиакриламид и вода использовались для приготовления желатинизированного раствора окислителей. Калий фосфорнокислый однозамещенный вносился как флегматизатор. Тиосульфат натрия и бихромат калия выполняли функцию структурирующих компонентов.

В результате окисления горючего, инициируемого электрическим разрядом, при условии полного использования окислителей, данные ЭЖо обеспечивали следующие реакции:



При температуре ЭРХВ происходит также сгорание органического вещества с образованием углекислого газа CO_2 , воды H_2O , азота N_2 . Можно полагать, что KH_2PO_4 и $K_2Cr_2O_7$ не претерпевают существенных изменений в ходе реакций, тогда как тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3$ может окисляться с образованием сульфата натрия Na_2SO_4 .

Таким образом, при подводном ЭРХВ данного химического состава образуются следующие продукты: оксид алюминия (Al_2O_3), гидроксид натрия ($NaOH$), газообразные азот и водород (N_2 ; H_2), углекислый газ (CO_2), сульфат натрия (Na_2SO_4), бихромат калия ($K_2Cr_2O_7$), однозамещенный фосфат калия ($KHPO_4$). Их безвредность очевидна, особенно на фоне бурного химического загрязнения мест формирования ГСР глубинными термальными водами. Однако, все же рассмотрим их подробнее.

Al_2O_3 – основной компонент природных глин, поэтому не загрязняет окружающую среду. Вследствие малой растворимости в воде газов N_2 и H_2 , а также слабой химической активности CO_2 их выделение не представляет экологической угрозы. Ионы солей Na_2SO_4 , $KHPO_4$ входят в состав морской воды аналогами солей $NaCl$, $CaSO_4$, KCl , поэтому эти вещества также не загрязняют морскую воду.

Спокойное поведение рыб в ближней зоне электроразрядного промежутка однозначно подтверждает это.

Наиболее опасным с экологической точки зрения является бихромат калия $K_2Cr_2O_7$, так как все соли хромовых кислот ядовиты [10]. Однако, учитывая его невысокую концентрацию в составе ЭЖо, можно считать, что загрязнения морской воды от использования таких составов ЭЖо не будут превышать загрязнений от судовых лакокрасочных покрытий, коррозии судов и морских береговых установок.

Выводы

Экспедиционные наблюдения электроразрядно-химических взрывов на шельфах южных морей показали, что в рекогносцировочном плане их акусто-биологическое и химико-биологическое воздействия в океане являются экологически безопасными.

Разработка разрядно-импульсной технологии добычи сульфидных руд на дне океана может продолжаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Римский-Корсаков А.В., Ямщиков В.С., Жулин В.И. Акустические подводные низкочастотные излучатели. Л., 1984.
2. Балашканд М.И., Ловля С.А. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях. М., 1977.
3. Лаврентьев Э.В., Кузьян О.И. Взрывы в море. Л., 1977.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
5. Weston D.E. Low-frequency scaling laws and source levels for underground explosions and other disturbances – "Geophysist". 1960. № 3. P. 191–196.
6. Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. Киев, 1992.
7. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л., 1966.
8. Балашканд М.И., Веклюв Э.Х., Ловля С.А. и др. Новые источники сейсморазведки, безопасные для ихтиофауны. М., 1980.

9. Протасов В.О., Богатырев П.Б., Векилов Э.Х. Способы сохранения ихтиофауны при различных видах подводных работ. М., 1982.

10. Глинка Н.Л. Общая химия. Л., 1988.

Поступила 11.04.01

Summary

In this technology we present experimental researches of influences of powerful acoustic pulses and throwing out of chemical substances, which accompanies the electro-chemical explosions to the fauna of sea. The researches were carried out in South Seas from the board of science-researching vessel "Gipanis". The ecological danger from such explosions is very small in the zone of extraction of sulfa-ore on the bottom of Ocean.

Ф.П. Гросу, М.К. Болога, И.А. Кожухарь

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОСТЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

1. Общие теоретические соображения

Под простой дисперсной средой будем подразумевать жидкость или газ (дисперсионная фаза), содержащие мелкие чужеродные нерастворяющиеся и некоагулирующие частицы (дисперсная фаза). Обе фазы считаются однородными по составу, а дисперсные частицы имеют шарообразную форму, что продиктовано не только простотой, но и типичностью структуры дисперсных систем. Под такое определение попадают эмульсии, различные суспензии, некоторые коллоиды, газозвеси, туманы, облака и т.п.

Одной из основных механических параметров дисперсной среды является степень ее дисперсности, характеризующая средний размер частицы. Другая характеристика – это массовая или объемная концентрация. Будем пользоваться понятием объемной концентрации, представляющей собой долю объема дисперсной фазы ΔV_1 , в рассматриваемом объеме среды ΔV , то есть $C \equiv \Delta V_1 / \Delta V$. Достаточно мелкодисперсную среду (радиус частиц $r \leq$ мкм) при не слишком малых концентрациях ($C \geq 10^{-3} = 0,1\%$) можно рассматривать как сплошную локально однородную среду, что и принято в дальнейшем. При этом физические параметры приобретают смысл непрерывно распределенных по объему величин и допустимо понятие их значения в "точке". Например, для концентрации таковым является предел

$$C = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (\Delta V_1 / \Delta V).$$

Теперь переходим к обсуждению электрофизических параметров смеси: абсолютной диэлектрической проницаемости ϵ , удельной электропроводности σ , и времени электрической релаксации $\tau = \epsilon / \sigma$.

Согласно [1], если вещество представляет собой мелкодисперсную смесь, то и электрическое поле можно рассматривать как непрерывное, усредненное по физически малым объемам. По отношению к такому полю смесь можно рассматривать как однородную (локально) и изотропную среду с некоторыми усредненными определенным образом параметрами:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}, \quad (1)$$

где \vec{D} и \vec{E} – индукция и напряженность электрического поля.

Аналогично удельную электропроводность σ можно интерпретировать как коэффициент пропорциональности между средней плотностью тока и напряженностью поля: