

УДК: 623.566; 623.54

**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ ЗАМЕРА ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА
НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ПРЕГРАДЕ**

**EXPERIENCE IN USING ELECTRET SENSORS
TO MEASURE THE PARAMETERS OF AN UNDERWATER EXPLOSION
DIRECTLY AT THE TARGET**

По представлению академика РАРАН В.В. Селиванова

С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

S.V. Ladov

Приведены результаты по отработке экспериментальной методики регистрации давления на фронте ударной волны как в свободной жидкости, так и на преграде, с использованием электретных датчиков. Рассмотрены механизм действия такого датчика и способ его тарировки. Подобный датчик имеет малые размеры, не имеет массивного корпуса и может закрепляться непосредственно на жесткой или деформируемой преграде.

Ключевые слова: заряд взрывчатого вещества, подводный взрыв, ударная волна, давление, массовая скорость, пьезоэффект, диэлектрик, электретный датчик, преграда.

The results of the development of an experimental technique for recording the pressure at the shock front both in a free liquid and at an obstacle using electret sensors are presented. The mechanism of action of such a sensor and the method of its calibration are considered. Such a sensor has small dimensions, does not have a massive body, and can be fixed directly on a rigid or deformable barrier.

Keywords: explosive charge, underwater explosion, shock wave, pressure, mass velocity, piezoelectric effect, dielectric, electret sensor, barrier.

Данная статья является продолжением цикла исследований автора, связанных с совершенствованием методов проектирования и оценки эффективности действия подводного оружия для поражения различных целей, прежде всего, подводных лодок [1–3]. При этом важное значение имеет достоверное определение импульсных нагрузок, действующих на корпус подводной лодки при взаимодействии со взрывными и баллистическими ударными волнами (УВ), что позволит в дальнейшем адекватно оценить процесс его деформирования и последующего возможного разрушения.

В настоящее время известны многочисленные экспериментально-теоретические исследования по определению параметров подводного взрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ) и формируемых им динамических нагрузок на различные преграды, изложенные в фундаментальных работах зарубежных и отечественных авторов [4–7]. При этом особый интерес представляют экспериментальные методики по замеру полей давлений, возникающих при подводном взрыве фугасных и кумулятивных зарядов, как в свободной (безграничной) жид-

кости, так и на контактирующей с ней преградой различной жесткости.

Разработки подобных методик оценки импульсных давлений при подводном взрыве, начиная с 1960-х годов прошлого столетия, проводятся и в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Они касаются, в том числе, использования различных типов датчиков, принцип действия которых базируется на различных физических процессах, связанных с распространением УВ: ударной поляризацией; пьезоэлектрическим эффектом; явлением ударного размагничивания; электротехническими и физико-механическими эффектами за фронтом УВ. Обзор направлений этих исследований с указанием конкретных разработчиков можно почерпнуть из истории развития кафедры боеприпасов МГТУ им. Н.Э. Баумана [8–10].

При этом вопросы конкретного использования различных типов датчиков определяются объектом исследования (среда, по которой распространяется УВ), их физико-механическими характеристиками (электрическое сопротивление, поляризованность, намагничиваемость, акустический импеданс), геометрией пространства и другими параметрами. Диапазон измеряемых давлений у разных методов различен, поэтому применимость датчиков обуславливается также их чувствительностью и уровнем сигнала в исследуемом диапазоне давлений. Таким образом, конкретный выбор методики измерения параметров УВ в среде и средств ее реализации определяется задачей и реальными условиями проводимого эксперимента.

Применительно к подводному взрыву фугасных и кумулятивных зарядов основные исследования проводились с использованием пьезоэлектрических датчиков, размещаемых в безграничной жидкости [11–14]. В качестве чувствительных элементов датчиков использовались пьезокристаллы (кварц, турмалин) или пьезокерамика (ЦТС-19, ЦТС-24). В результате воздействия УВ на гранях пьезоэлементов появляются противоположные по знаку электрические заряды (электрическое напряжение) — имеет место прямой пьезоэлектрический эффект [15, 16].

Ударная волна, распространяясь с конечной скоростью, воздействует на поверхность преобразователя (датчика) по мере своего прохожде-

ния. В результате такого интегрирования вносится погрешность в запись высокочастотных компонентов сигнала и искажается передний фронт УВ. Все широко используемые пьезоматериалы, обладая механическими свойствами, значительно отличающимися от свойств среды (воздух, вода, грунт), вызывают искажения исследуемого поля давления УВ. Фронт УВ возбуждает в объеме деталей, связанных с чувствительными элементами, свободные затухающие колебания, которые, в свою очередь, вызывают колебания выходного электрического сигнала. Следовательно, реакция преобразователя не будет соответствовать характеру действующего давления в течение некоторого времени. Это особенно важно при взрыве зарядов ВВ небольшой массы, генерирующих УВ с фазами сжатия малой продолжительности, что характерно для модельных лабораторных исследований. Кроме того, пьезоэлектрические датчики из-за конструктивных и механических характеристик не позволяют регистрировать давление УВ непосредственно на преграде.

Для уменьшения описанных погрешностей необходимо применение измерительного преобразователя, обладающего механическими свойствами, близкими к свойствам среды, в которой исследуются ударно-волновые процессы, а в идеальном случае материал этой среды должен обладать как можно более высокой разрешающей способностью во времени.

В развитие этих идей в МГТУ им. Н.Э. Баумана для измерения давления в УВ был разработан малогабаритный датчик с регулируемой чувствительностью [17]. Рабочим элементом такого датчика является пластина из диэлектрика, материал которого выбирается в зависимости от конкретных условий проведения опыта. Простейшая возможная схема замера параметров давления таким датчиком представлена на рис. 1. Токпроводящие обкладки датчика 1, между которыми находится рабочий элемент (диэлектрик), соединяются с входом осциллографа 2. Диэлектрик помещается во внешнее электростатическое поле конденсатора емкостью C , который заряжается от источника питания 3. Под действием внешнего электростатического поля соответствующей напряженности заряды смещаются друг относительно друга, молекулы приобретают дипольный момент, величина которого

пропорциональна напряженности суммарного поля в диэлектрике. Таким образом, величина поверхностного или объемного электрического заряда зависит от внешнего поля соответствующей напряженности, которое можно изменять за счет внешнего источника (конденсатора соответствующей емкости C), то есть регулировать чувствительность датчика [17]. На рис. 1 также приведена типичная осциллограмма процесса, полученная в лабораторных условиях при сбрасывании шарика (груза) с различной высоты на закрепленный датчик. Использование подобного датчика существенно расширяет диапазон измеряемых параметров и возможные схемные решения установки датчиков при относительной простоте и дешевизне их изготовления и использования, однако не решает проблемы замера давления УВ при подводном взрыве непосредственно на преграде.

Перспективными в этом отношении для использования в качестве воспринимающих элементов преобразователей УВ, распространяющейся в среде (вода, грунт), могут быть полимерные электреты [18–19]. Этому способствуют их низкие плотности, акустический импеданс и диэлектрическая проницаемость, относительная простота крепления к поверхностям сложного профиля, технологичность и дешевизна. Электрет — это диэлектрик, обладающий квазипостоянным электрическим зарядом. Он изготавливается методом электрической термополяризации полимерной пленки разной толщины, например, из поливинилхлорида или поливи-

нилденфторида. Электретный преобразователь в простейшем случае можно представить как конденсатор с диэлектриком из электрета, вектор поляризации которого перпендикулярен обкладкам. Электреты, в отличие от многих пьезоматериалов, обладают пьезоэффектом при всестороннем сжатии. Следовательно, отпадает необходимость введения механической защиты для получения избирательности приема действующих напряжений. Поэтому ориентацию датчика относительно фронта УВ определяет только время нарастания сигнала.

В данной статье приведены результаты по отработке экспериментальной методики регистрации давления на фронте УВ с использованием электретных датчиков как в свободной жидкости, так и на преграде [20]. Цель исследований — создание малогабаритного датчика, не имеющего массивного корпуса для возможности закрепления его непосредственно как на жесткой, так и на деформируемой преграде.

Применяемый электретный датчик, простейшая схема которого показана на рис. 2 (R — электрическое сопротивление), представляет собой плоский конденсатор с диэлектриком из электрета (размеры датчика 5×5 мм), вектор поляризации которого перпендикулярен обкладкам. Конкретный электрет изготавливался методом электрической термополяризации поливинилхлоридной пленки толщиной 0,45 мм. На его поверхности вакуумным напылением наносились слои алюминия толщиной несколько микрон, к которым токопроводящим клеем приклеивался

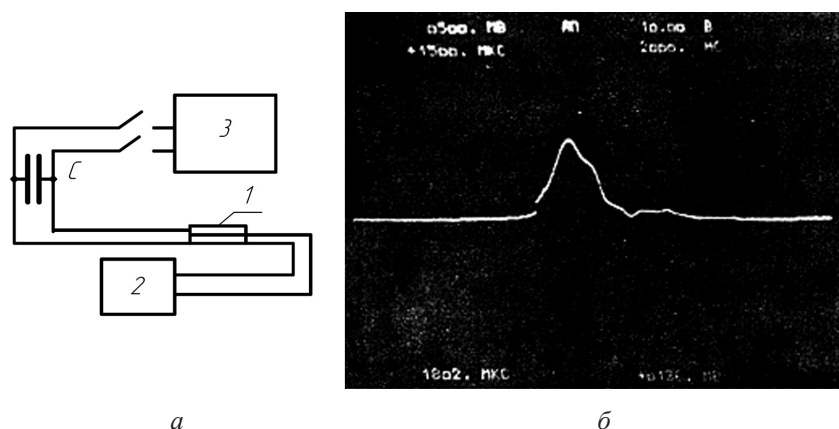


Рис. 1. Диэлектрический датчик с регулируемой чувствительностью:

а — электрическая схема; б — типичная осциллограмма процесса;

1 — датчик с токопроводящими обкладками; 2 — осциллограф; 3 — внешний источник зарядки конденсатора; C — емкость конденсатора

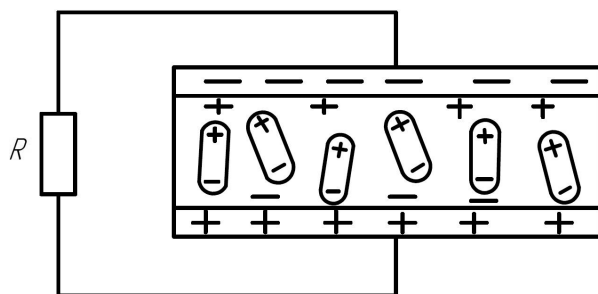


Рис. 2. Схема электретного преобразователя

коаксиальный кабель РК-50. Преобразователь покрывался водоизоляционным клеем и нитро-краской.

Механизм действия датчика заключается в следующем. В процессе нагружения датчика УВ происходит изменение поляризованности электрета из-за его сжатия (увеличивается объемная плотность заряда), приводящее к возникновению на границах электрета разности потенциалов, которая и является регистрируемым сигналом.

Изготовление и тарировка испытываемых электретных датчиков проводились в лаборатории Отделения института химической физики РАН (ОИХФ РАН, г. Черноголовка). Для тарировки использовалась методика лазерной интерферометрии [21]. При этом определялась массовая скорость жидкости (воды) за фронтом УВ, которая генерировалась взрывом заряда ВВ из флегматизированного гексогена массой 20 г, установленного на внешней стороне алюминиевой пластины толщиной 2,2 мм, являющейся одной из стенок резервуара с водой. Остальные стенки резервуара были изготовлены из оргстекла толщиной 2 мм. На заданном расстоянии H от внутренней стороны алюминиевой пластины устанавливали алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм, на поверхности которой специальной линзой фокусировалось излучение лазера в виде пятна диаметром не более 0,1 мм. Отраженный свет собирался той же линзой в приблизительно параллельный пучок и направлялся в интерферометр, где светоделиитель расщеплял его на два пучка равной интенсивности. В одно из плеч интерферометра вводилась линия задержки, представляющая собой блок стекла ТФ1 с показателем преломления 1,65656, поэтому время двукратного прохождения света в этом плече было больше,

чем в противоположном. После отражения от концевых зеркал пучки света возвращались на светоделиитель, где и происходила их интерференция [21].

При прохождении УВ фольга вследствие незначительной толщины вовлекается в движение со скоростью, равной массовой скорости жидкости за фронтом УВ. Так как скорость фольги непрерывно меняется, то эффект Доплера для двух расщепленных пучков оказывается различным. Изменение интенсивности при их интерференции регистрировалось быстродействующими фотоумножителями ФЭУ-146, показания которых снимались осциллографами С1-75. Измеряемый профиль массовой скорости $u(t)$ отражающей поверхности определялся из совместной обработки трех осциллограмм, соответствующих двум каналам регистрации интерференционных биений и контролю интенсивности отраженного света.

На рис. 3 представлены профили массовой скорости жидкости за фронтом УВ для различных расстояний H от заряда ВВ до фольги в конкретной схеме нагружения, построенные по результатам обработки типичных осциллограмм (u — массовая скорость, t — время процесса). По значениям массовой скорости непосредственно за фронтом УВ (см. максимальные значения u на рис. 3) по известным зависимостям [4, 6] можно рассчитать давление p_ϕ на фронте УВ в зависимости от расстояния H (рис. 4).

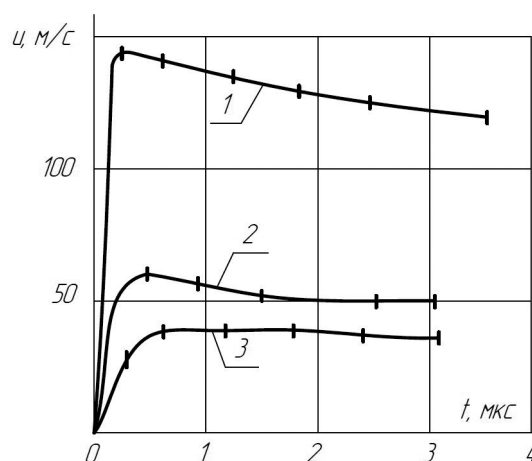


Рис. 3. Профили массовой скорости $u(t)$ жидкости за фронтом УВ для различных расстояний от места взрыва: 1 — $H = 50$ мм; 2 — $H = 100$ мм; 3 — $H = 150$ мм

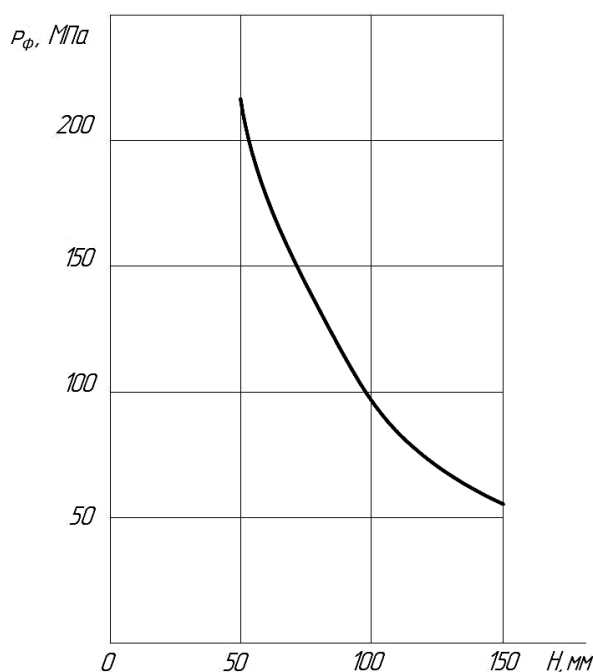


Рис. 4. Зависимость давления на фронте УВ от расстояния до места подрыва

Помещая электретный преобразователь на тех же расстояниях и применяя ту же схему ударно-волнового нагружения, что и при тарировке датчиков, регистрировали генерируемую датчиком разность потенциалов. Схема экспериментов и характерная осциллограмма показаны на рис. 5.

По полученной с помощью лазерного интерферометра зависимости p_ϕ от H (рис. 4) и опытной зависимости напряжения U_ϕ от H была построена тарировочная кривая $U_\phi \cdot C / S$ от p_ϕ , где U_ϕ — регистрируемое осциллографом максимальное напряжение в цепи; C — емкость цепи; S — рабочая площадь датчика (рис. 6).

По аналогичной схеме ударно-волнового нагружения было измерено давление на установленной в воде жесткой преграде, которая представляла собой стальную пластину толщиной 18 мм и диаметром 300 мм. Схема опыта и характерная осциллограмма процесса показаны на рис. 7. Измеренное давление на расстоянии $H=100$ мм до преграды составило 150 МПа.

Для установления степени достоверности полученных данных были проведены опыты по регистрации давления от взрыва заряда ВВ

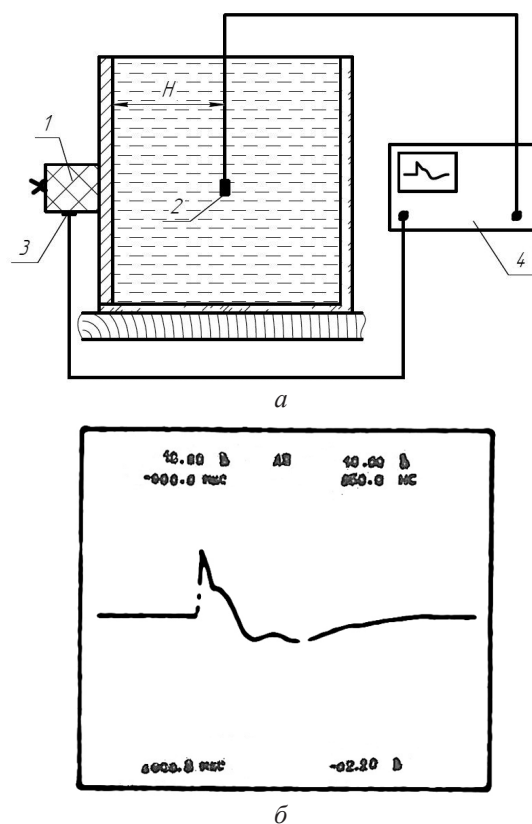


Рис. 5. Схема эксперимента в свободной жидкости: а — схема эксперимента; б — типичная осциллограмма процесса; 1 — заряд ВВ; 2 — электретный датчик; 3 — датчик запуска развертки осциллографа; 4 — осциллограф С9-8

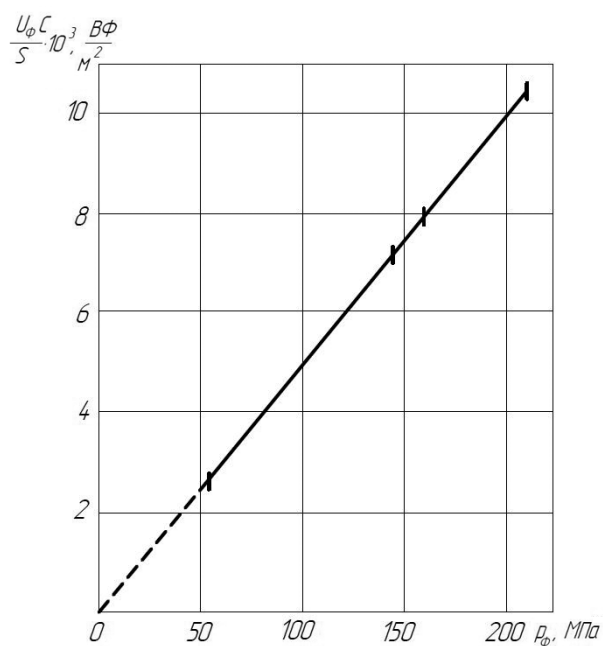


Рис. 6. Тарировочная зависимость $U_\phi \cdot C / S$ от p_ϕ

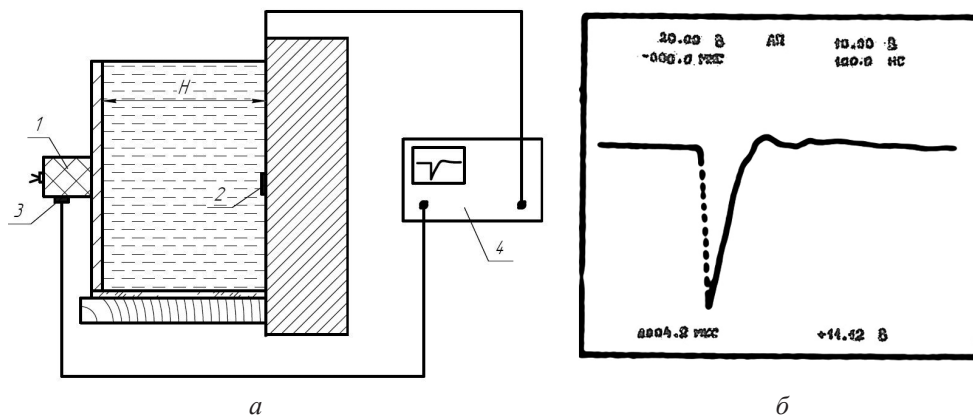


Рис. 7. Схема эксперимента в жидкости с жесткой преградой:

а — схема эксперимента; *б* — типичная осциллограмма процесса; 1 — заряд ВВ; 2 — электретный датчик; 3 — датчик запуска развертки осциллографа; 4 — осциллограф С9-8

в безграничной жидкости. Быстродействующий электродетонатор подрывался в баке с водой (размеры бака составляли 600×800×800 мм). Датчик устанавливался на различных расстояниях от детонатора, но так, чтобы исключить влияние отраженных волн. Анализ результатов экспериментов показал, что измеренные давления хорошо аппроксимируются известной формулой, полученной в [22] для подводного взрыва сферического заряда из ТЭН небольшой массы:

$$p_{\phi} = 645 \left(\frac{m^{1/3}}{R} \right)^{1/2},$$

где m — масса ВВ, кг; R — расстояние от заряда до точки измерения, м. Это указывает на достаточную достоверность полученных результатов при использовании электретных датчиков, а также подтверждает работоспособность предлагаемой методики измерения импульсных давлений не только в свободной жидкости, но и непосредственно на подводной преграде.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории ОИХФ РАН (г. Черноголовка) А.Г. Антипенко и А.В. Уткину за помощь в изготовлении электретных датчиков и их тарировке методом лазерной интерферометрии.

Литература

1. Использование кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных

торпедах для поражения двухкорпусных подводных лодок / С.В. Ладов, А.В. Бабкин, В.И. Колпаков и др. // Оборонная техника. 2005. № 4–5. С. 35–43.

2. Ладов С.В. Возможный механизм разрушения корпуса подводной лодки при взрыве кумулятивного заряда // Известия РАН. 2015. № 1 (86). С. 54–62.

3. Ладов С.В. Применение кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных противолодочных торпедах // Известия РАН. 2016. № 2 (92). С. 37–42.

4. Коул Р. Подводные взрывы / Пер. с англ. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1950. 494 с.

5. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. — Л.: Судостроение. Переизд. 1989. 387 с.

6. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 1. — М.: Физматлит. 2004. 832 с.

7. Озерцовский О.И. Действие взрыва на подводные объекты / Под ред. Е.С. Шахиджанова. — М.: ФГУП «ЦНИИХМ». 2007. 262 с.

8. Кафедра «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Люди, события, история развития. 1938–2013 / В.А. Марков, В.А. Одинцов и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. 422 с.

9. Кафедра «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 80 лет вместе. 1938–2018 // С.В. Ладов, В.А. Марков, В.В. Селиванов и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 462 с.

10. Ладов С.В. История исследований взрывной кумуляции в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Вып. 6 (78). [http:// dx.doi.org/10. 18698/ 2308-6033-2018-6-1776](http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1776)
11. Исследование ударных процессов с помощью пьезоэлектрических преобразователей: метод. указания / В.Н. Корчагин, В.И. Васюков, Н.А. Гладков и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. 32 с.
12. Физика взрыва и удара: метод. указания к выполнению лабораторных работ/ А.В. Бабкин, Д.В. Гелин и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 75 с.
13. Физическая картина и параметры взрыва кумулятивного заряда в безграничной жидкости / А.В. Бабкин, В.И. Васюков, С.В. Федоров и др. // Оборонная техника. 2002. № 1–2. С. 65–71.
14. Васюков В.И., Дильдин Ю.М. и др. Определение параметров гидродинамических полей давления и скоростей при подводном взрыве в безграничной жидкости // В сб.: Труды МВТУ. № 312. Вопросы физики взрыва и удара. — М.: Изд-во МВТУ. 1980. С. 71–83.
15. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия. 1983. 928 с.
16. Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. Экспериментальные методы физики взрыва и удара: учебник / Под ред. В.В. Селиванова. — М.: Физматлит. 2013. 752 с.
17. Диэлектрический датчик с регулируемой чувствительностью для замера импульсных давлений / В.И. Васюков, С.В. Ладов, А.А. Рубцов, С.В. Федоров // Оборонная техника. 1998. № 1–2. С. 79–81.
18. Лушейкин Г.А. Полимерные электроны. — М.: Химия. 1976. 224 с.
19. Антипенко А.Г., Курто А.П., Якушев В.В. Электрические эффекты при ударном сжатии полимерных элементов // Детонация: Материалы 2-го Всесоюзного совещания по детонации. — Черноголовка. 1981. Вып. 2. С. 118–123.
20. Экспериментальный метод замера параметров ударных волн при подводном взрыве с помощью электретных датчиков / С.А. Петровский, А.Г. Антипенко, В.И. Васюков, А.В. Уткин и др. // В сб.: Труды МГТУ. № 557. Механика импульсных процессов. — М.: Изд-во МГТУ. 1992. С. 106–115.
21. Применение лазерных интерферометрических измерителей скорости во взрывных экспериментах / М.И. Беловолов, В.И. Вовченко, Г.И. Каннель и др. // Журнал технической физики. 1987. Т. 5–7. Вып. 5. С. 918–924.
22. Христофоров Б.Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из ТЭН малого веса // Журнал прикладной механики технической физики. 1960. № 2. С. 124–127.