

УДК 539.3

© А. Н. Ищенко<sup>1</sup>, Р. Н. Акиншин<sup>2</sup>, С. А. Афанасьева<sup>1</sup>, И. Л. Борисенков<sup>2</sup>, В. В. Буркин<sup>1</sup>, А. С. Дьячковский<sup>1</sup>, Р. Ю. Монахов<sup>3</sup>, А. А. Родионов<sup>3</sup>, М. В. Хабибуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
ichan@niipmm.tsu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ ТЕЛ В ВОДЕ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОДВОДНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

Рассмотрена фундаментальная проблема высокоскоростного движения в воде суперкавитирующих тел — инерционных и реактивных с малогабаритным импульсным реактивным двигателем, а также их соударения с подводными преградами. Расчетно-экспериментальным методом проведено исследование режимов движения инертных суперкавитирующих ударников, а также ударников с работающим малогабаритным импульсным реактивным двигателем с до-, транс- и сверхзвуковыми скоростями в водной среде после разгона в ствольном ускорителе. Проведена оценка прироста скорости движения ударников за счет использования малогабаритного импульсного реактивного двигателя, изучен характер их взаимодействия с подводными преградами, в том числе содержащими взрывчатое вещество.

**Ключевые слова:** высокоскоростное взаимодействие, суперкавитирующий, ударник, подводная преграда.

*A. N. Ischenko<sup>1</sup>, R. N. Akinshin<sup>2</sup>, S. A. Afanaseva<sup>1</sup>, I. L. Borisenkov<sup>2</sup>, V. V. Burkin<sup>1</sup>, A. S. Dyachkovskii<sup>1</sup>, R. Y. Monahov<sup>3</sup>, A. A. Rodionov<sup>3</sup>, M. V. Khabibullin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Section of Applied Problems of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Saint-Petersburg Department of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, St.-Petersburg, Russia

## RESEARCH ON HIGH-SPEED MOTION OF SUPERCAVITATING BODIES IN WATER AND THEIR INTERACTION WITH UNDERWATER BARRIERS

The paper discusses the fundamental problem of high-speed motion of supercavitating bodies in water — inertial and jet bodies with a compact pulse jet engine, and their impact on underwater barriers as well. A study on modes of motion of unreactive supercavitating projectiles with running compact pulse jet engine with sub-, trans- and supersonic speeds in water medium after speeding-up in the barrelled accelerator is done with calculation-experimental method. Velocity gain of projectile motion by virtue of using a compact pulse jet engine is estimated. Nature of interaction of projectiles with underwater barriers including those containing an explosive is studied.

**Key words:** high-speed interaction, supercavitating, projectile, underwater barrier.

При разработке новых высокоскоростных ударников для движения в водной среде наряду с решением проблемы преодоления сопротивления воды требуется обеспечение эффективного взаимодействия с подводными преградами. Анализ имеющихся литературных данных [1—5] позволяет определить основные пути решения этих проблем: это разработка баллистических систем высокоскоростного метания, разработка суперкавитирующих ударников с наименьшим сопротивлением, обеспечение их устойчивого движения в воде, а также эффективного воздействия на подводные преграды [6, 7].

Целью данной работы является качественное повышение скорости суперкавитирующих инерционных и реактивных моделей перспективных ударников при их движении в воде и исследование их соударения с подводными преградами, в том числе содержащими взрывчатое вещество (ВВ), на основе разработки новых методов управления параметрами метания и взаимодействия тел в водной среде.

Экспериментальные исследования, представленные в работе, проведены на гидробаллистическом стенде, оснащённом современным измерительно-регистрирующим оборудованием. Применяемая баллистическая установка обеспечивает разгон исследуемых инерционных и реактивных суперкавитирующих ударников в широком диапазоне начальных скоростей — от дозвукового до сверхзвукового относительно водной среды. Для исследования напряженно-деформированного состояния и возможного разрушения твердых тел при движении в воде и взаимодействии с подводными преградами различного типа используются математические модели на основе единого методологического подхода механики сплошной среды [8]. Для исследования задач взаимодействия ударников с преградами, содержащими ВВ, предложена математическая модель ударно-волнового инициирования детонации при высокоскоростном ударе.

**Математическая модель ударно-волнового инициирования детонации в твердых взрывчатых веществах.** Согласно модели инициирования и развития реакции [9] уравнение макрокинетики содержит два члена, первый из которых описывает процесс воспламенения, а второй — последующее развитие реакции (индекс «1» обозначает параметры непрореагировавшего ВВ, индекс «2») — продуктов детонации:

$$\frac{dw_1}{dt} = A_1 w_1^x \left( \frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_*} \right)^m + B_1 w_1^x w_2^y p^z, \quad (1)$$

где  $p$  — давление,  $w_1, \delta_1 = \frac{\rho_0}{\rho_1}$  — массовая доля, относительный удельный объем и  $\rho_0$  — начальная плотность ВВ;  $w_2 = 1 - w_1$  — массовая доля продуктов детонации;  $\delta_*, A_1, B_1, m, z$  — константы, определяемые привязкой к экспериментальным данным;  $x, y$  — зависящие от геометрии горения показатели степени.

Для описания ВВ ( $i = 1$ ) и продуктов его разложения ( $i = 2$ ) применяется уравнение состояния в форме Ми—Грюнайзена, где в качестве опорной кривой используется изэнтропа с постоянным коэффициентом Грюнайзена  $\gamma_{0i}$  в виде

$$\varepsilon_i = \frac{C_i}{R_{1i} \exp(R_{1i} \delta_i)} + \frac{D_i}{R_{2i} \exp(R_{2i} \delta_i)} + \frac{E_i}{\gamma_{0i} \delta_i^{\gamma_{0i}}} - \varepsilon_{0i}. \quad (2)$$

Здесь  $\delta_i = \frac{\rho_0}{\rho_i}$ ;  $C_i, D_i, E_i, R_{1i}, R_{2i}, \varepsilon_{0i}$  — эмпирические постоянные.

В качестве дополнительных условий, замыкающих систему уравнений (1), (2), описывающих в рамках гидродинамической модели движение реагирующей среды, вводится аддитивность объемов фаз смеси

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} \quad (3)$$

и предполагается, что в среде осуществляется локальное равновесие по давлению

$$p = p_1(\rho_1, \varepsilon_1) = p_2(\rho_2, \varepsilon_2). \quad (4)$$

Кроме того, считается, что разница между суммой двух внутренних энергий — энергии продуктов взрыва, определенной по изэнтропе, и энергии ВВ, определенной по адиабате Гюгоню, — и полной внутренней энергией элементарного объема распределяется между компонентами в соответствии с отношением внутренней энергии продуктов взрыва, определенной по изэнтропе, к внутренней энергии ВВ, определенной по адиабате Гюгоню. Тогда

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{H1} + \frac{[\varepsilon - w_1 \varepsilon_{H1} - w_2 \varepsilon_{s2}] \varepsilon_{H1}}{w_1 \varepsilon_{H1} + w_2 |\varepsilon_{s2}|}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{s2} + \frac{[\varepsilon - w_1 \varepsilon_{H1} - w_2 \varepsilon_{s2}] \varepsilon_{s2}}{w_1 \varepsilon_{H1} + w_2 |\varepsilon_{s2}|}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{H1} = \frac{(1 - \delta_1) \left[ \frac{C_1 \left( \delta_1 - \frac{\gamma_{01}}{R_{11}} \right)}{\exp(R_{11} \delta_1)} + \frac{D_1 \left( \delta_1 - \frac{\gamma_{01}}{R_{21}} \right)}{\exp(R_{21} \delta_1)} + \gamma_{01} \varepsilon_{01} \right]}{2\delta_1 - \gamma_{01} (1 - \delta_1)}$  — внутренняя энергия ВВ на адиабате Гюгоню.

С целью проверки изложенной выше модели ударно-волнового инициирования детонации в гетерогенных ВВ (1—5) и определения постоянных уравнения макрокинетики в рамках одномерного деформированного состояния проведен расчет процесса соударения медной пластины толщиной 0.76 мм с открытым зарядом ВВ ВРХ-9404 плотностью 1.844 г/см<sup>3</sup> со скоростью 550 м/с по данным эксперимента [10]. В результате получены параметры уравнения состояния, модели инициирования и развития реакции в гетерогенном взрывчатом веществе (табл. 1).

**Стабилизация суперкавитирующего ударника при движении в воде.** Для проведения экспериментальных исследований высокоскоростного движения суперкавитирующих снарядов в воде в лабораторных условиях разработан гидробаллистический стенд, включающий высокоскоростную баллистическую установку, воздушную трассу для отделения ведущего устройства, гидробаллистическую трассу с мишенным комплексом, оснащенный современной скоростной фото- и видеоаппаратурой и регистрационно-измерительными приборами для определения основных параметров выстрела, движения тел в воде и соударения их с подводными преградами. Для метания суперкавитирующих снарядов применяются пороховые баллистические установки калибром 23 и 30 мм с длиной ствола 4 и 5 м соответственно, с применением пироксилинового пороха.

Одной из важнейших технических задач стоит обеспечение устойчивого движения тела в воде [11], обязательным условием которого является отделение ведущего устройства. Однако при входе в воду суперкавитирующего ударника неизбежно возникают возмущения, приводящие к отклонению ударника от оси движения. Процесс стабилизации ударника в воде не является мгновенным. Высокие давления на поверхности соприкосновения кавитатора и воды не дают ему сходить с траектории. Отклонения же оси ударника приводят к его колебанию внутри полости каверны и касанию ее внутренней поверхности — глиссированию. Какое-то время ударник глиссирует внутри каверны, затем стабилизируется.

На рис. 1 показано отделение ведущего устройства от суперкавитирующего ударника из стали массой 163 г на воздушном участке траектории и его глиссирование в суперкаверне (при дульной скорости 597 м/с).

Глиссирование наблюдалось при прохождении снарядом в воде участка 3.4—8.0 м. В начале глиссирования диаметр каверны на расстоянии 5 см от кавитатора составляет 18.5 мм, диаметр каверны в хвостовой части ударника — 32.9 мм, скорость движения при этом составляет 558.5 м/с. В конце глиссирования диаметр каверны на расстоянии 5 см от кавитатора составляет 18.7 мм, диаметр каверны в хвостовой части ударника — 31.2 мм, скорость — 502.9 м/с. После преодоления 4.6 м в воде ударник стабилизируется и выходит на режим устойчивого движения. Время глиссирования на данном участке составило 9.437 мс. После прохождения дистанции  $L = 9.3$  м в воде произведено поражение преграды с отклонением суперкавитирующего снаряда от точки прицеливания  $\Delta = 0.5$  см или  $\Delta/L = 0.0005$  при скорости  $V \sim 490$  м/с.

Таблица 1

Параметры математической модели ВВ ВРХ-9404

Параметры	ВРХ-9404	Продукты реакции
$C_p$ , ГПа·см <sup>3</sup> /г	108.8937·102	462.26
$\gamma_{0i}$	0.4541	0.38
$R_{1i}$	9.0	4.6
$D_p$ , ГПа·см <sup>3</sup> /г	-141.43	9.77
$R_{2i}$	4.5	1.3
$\varepsilon_{0i}$ , ГПа·см <sup>3</sup> /г	0.3	5.53
$E_p$ , ГПа·см <sup>3</sup> /г	—	0.6726
$A_1$ , мкс <sup>-1</sup>	15.0	
$B_1$ , ГПа <sup>-z</sup> /мкс	4500	
$z$	1.2	
$m$	4.0	
$x$	0.2222	
$y$	0.2222	
$\delta_*$	0.9822	

В рассмотренном ниже эксперименте реализован сверхзвуковой режим движения в воде суперкавитирующего ударника из сплава вольфрам-никель-железо (ВНЖ) массой 6.12 г при дульной скорости 1627 м/с. На расстоянии  $L = 1240$  мм от входа в воду им произведено поражение стальной преграды толщиной 45 мм на глубину 22 мм. На рис. 2 представлены кадры отделения ведущего устройства от ударника и его движения в воде, в окрестности кавитатора видно формирование и распространение ударной волны.

Необходимо отметить, что полученное и зарегистрированное значение сверхзвуковой скорости ударника в воде  $V = 1576.5$  м/с превосходит результаты [5].

**Взаимодействие реактивного суперкавитирующего ударника с подводными преградами.**

Суперкавитирующий ударник, снабженный малогабаритным импульсным реактивным двигателем (МИРД), разгоняется в баллистической установке. При выходе из канала ствола включается реактивный двигатель, который дополнительно увеличивает скорость ударника на траектории. При входе в воду МИРД продолжает работу в течение нескольких секунд.

На рис. 3 представлен образец дюралюминиевого суперкавитирующего ударника с МИРД массой 185 г.

Режимы движения суперкавитирующего снаряда с работающим МИРД в водной среде исследовались в диапазоне скоростей 250...500 м/с. В табл. 2 приведены результаты экспериментов: дульная скорость  $V_d$  ударника с МИРД, скорость  $V_k$  на воздушном участке трассы на дистанции  $L = 2.0$  м от дульного среза и скорость снаряда  $V$  в воде на дистанции  $L = 1.0$  м от входа в воду. Здесь же расположена дюралюминиевая преграда толщиной 16 мм. Наибольший прирост скорости на воздушном участке траектории составляет 5.5 %.

На рис. 4 представлена фоторегистрограмма ударника с работающим МИРД при входе в воду, полученная в опыте 3. На рис. 5 представлена фоторегистрограмма взаимодействия суперкавитирующего реактивного снаряда с работающим МИРД в воде с дюралюминиевой преградой толщиной 16 мм. Скорость ударника до взаимодействия с преградой составила 494 м/с, после поражения преграды — 268 м/с.

**Взаимодействие суперкавитирующего ударника с преградой, содержащей взрывчатое вещество.** Рассмотрим соударение суперкавитирующего ударника массой 597 г из сплава ВНЖ с зарядом гетерогенного ВВ РВХ-9404, расположенного в дюралюминиевой оболочке толщиной 8 мм, при скорости удара 500 м/с с помощью математической модели ударно-волнового инициирования детонации в твердых ВВ.

На рис. 6 в различные моменты времени изображены картины деформирования стержня и оболочки, поля вектора массовой скорости относительно скорости центра масс ударника ( $U_{сн}$ ) и давления (ГПа), значения минимального ( $P_{min}$ ) и максимального ( $P_{max}$ ) давления, а также зачернена зона реакции, в плоскости симметрии цилиндрической системы координат  $r$  (см)– $z$  (см). К моменту времени 62.5 мкс в ВВ образуется зона, занятая продуктами реакции, а к моменту времени 64.25 мкс давление в образце достигает значения в точке Чепмена—Жуге.

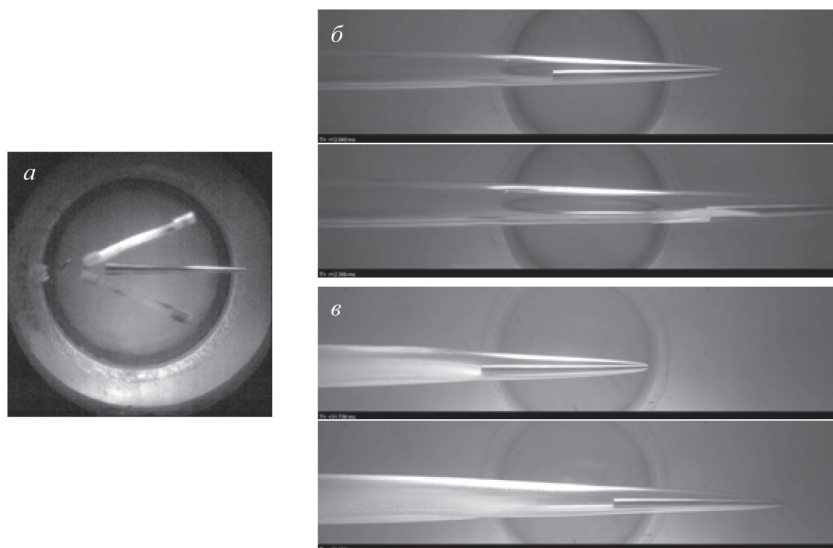


Рис. 1. Отделение ведущего устройства (а), начальная стадия (б) и конечная стадия (в) глиссирования суперкавитирующего ударника.

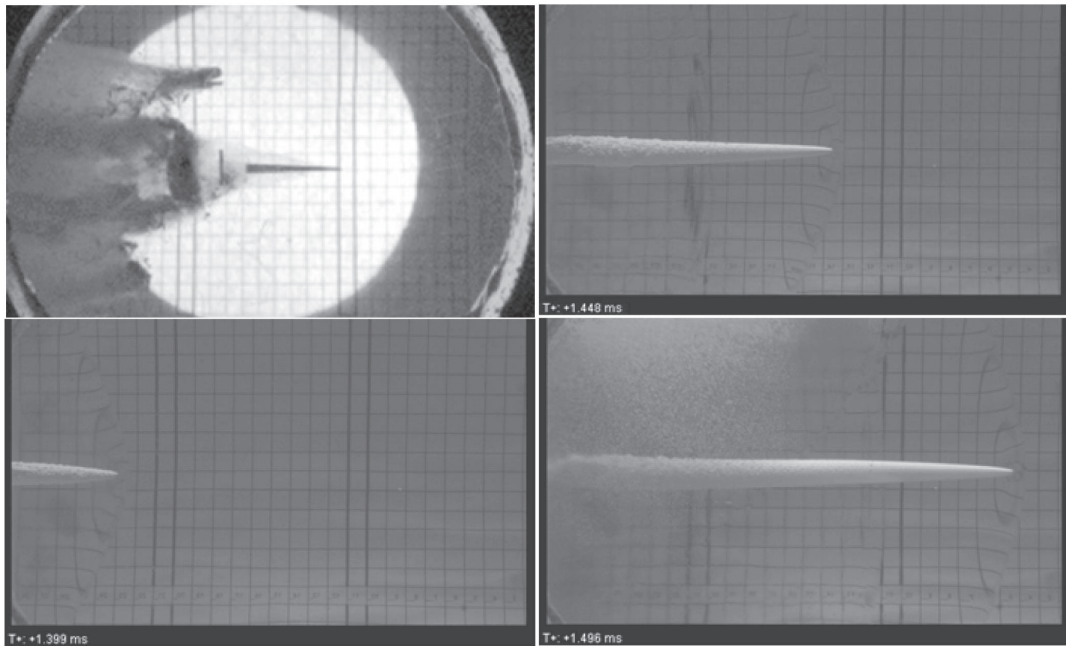


Рис. 2. Отделение ведущего устройства и фоторегистрограмма движения суперкавитирующего ударника в воде при  $V = 1577$  м/с.

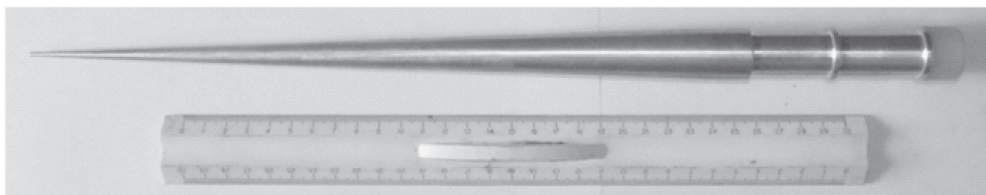


Рис. 3. Вид суперкавитирующего ударника с МИРД.

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований движения ударника с МИРД**

№	$V_d$ , м/с	$V_k$ , м/с	$V$ , м/с
1	346	358	—
2	277	293	276
3	495	504	494
4	516	516	—
5	510	521	490
6	294	311	—
7	244	256	240

Разложение ВВ начинается после того, как ударник пройдет некоторое расстояние в нем. В связи с этим ударный фронт приобретает форму кардиоиды. Это, в свою очередь, приводит к возникновению явления кумуляции энергии в сходящейся к оси симметрии ударной волне. Давление при этом в области головной части ударника достигает значения 356 ГПа (65.5 мкс).

Как показали расчеты при этих же условиях, увеличение скорости удара до 1000 м/с приводит к интенсификации процессов при соударении. Так к моменту времени 17.5 мкс давление в ВВ достигает значения в точке Чепмена—Жуге (37 ГПа), после чего происходит сравнительно быстрый переход ударной волны в детонацию. При 20 мкс наблюдается разрушение оболочки из дюралюминиевого сплава под действием расширяющихся продуктов детонации.

Предложенная методика позволяет также исследовать явления ударно-волнового инициирования детонации ВВ, экранированного набором многослойных, в том числе пространственно-разнесенных преград.



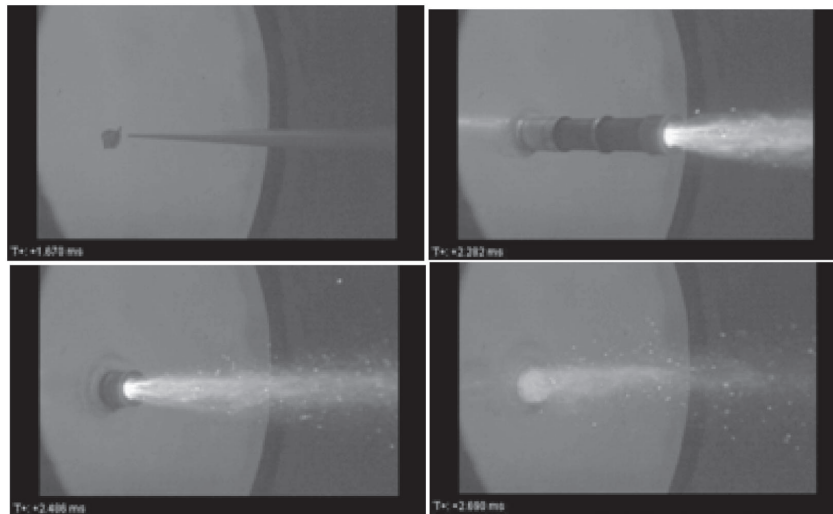


Рис. 4. Фоторегистрограмма входа в воду ударника с работающим МИРД при  $V = 504$  м/с.



Рис. 5. Фоторегистрограмма взаимодействия суперкавитирующего реактивного снаряда в воде с дюралюминиевой преградой толщиной 16 мм при  $V = 494$  м/с.

\*\*\*

Вопросы стабилизации суперкавитирующего ударника на начальном участке траектории в воде имеют приоритетное значение. Показано, что суперкавитирующий ударник путем глиссирования внутри каверны приобретает устойчивость, которая сохраняется на последующей стадии движения. Разработанные суперкавитирующие ударники способны поражать защитные пластины, в том числе вызывать детонацию содержащегося в оболочке ВВ, в рассмотренном диапазоне скоростей соударения. Зарегистрирована сверхзвуковая скорость движения суперкавитирующего ударника в воде 1577 м/с.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1362).*

#### Литература

1. Логвинович Г. В. Некоторые вопросы глиссирования и кавитации // Труды ЦАГИ. 1980. Вып. 2052. 271 с.
2. Тулин М. П. Пятьдесят лет исследования суперкавитационных течений в США: личные воспоминания // Прикладная гидромеханика. 2000. Т. 2 (74), № 3. С. 100—107.
3. Савченко Ю. Н. Исследования суперкавитационных течений // Прикладная гидромеханика. 2007. Т. 9, № 2—3. С. 150—158.
4. Vlasenko Yu. D. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds // Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003) Osaka, Japan, 2003.
5. Савченко Ю. Н. и др. Методика проведения экспериментов по высокоскоростному движению инерционных моделей в воде в режиме суперкавитации // Прикладная гидромеханика. 2009. Т. 11, № 4. С. 69—75.
6. Афанасьева С. А. и др. Расчет высокоскоростного движения инерционной модели при входе в воду и ее взаимодействие с металлической преградой // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 3. С. 43—55.
7. Афанасьева С. А. и др. Особенности высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами, защищенными слоем воды // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 4. С. 8—15.
8. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1973. 536 с.
9. Грин Л. и др. Иницирование химического разложения РВХ-9404 слабыми ударными волнами // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С. 107—122.
10. Уокерли Дж. и др. Исследование ударно-волнового иницирования РВХ-9404 // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С. 269—290.
11. Ищенко А. Н. и др. Расчетно-экспериментальный анализ высокоскоростного взаимодействия твердых тел в воде // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 2. С. 388—397.

Статья поступила в редакцию 02.03.2015 г.