

03.1;03.4;05.1

Одинокое и совместное движение суперкавитирующих ударников в сверхзвуковом режиме в воде

© А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, И.В. Майстренко, К.С. Рогаев, А.Ю. Саммель, А.В. Чупашев[¶]

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия

[¶] E-mail: chupashevav@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 июля 2020 г.

В окончательной редакции 14 августа 2020 г.

Принято к публикации 16 августа 2020 г.

Рассматриваются особенности движения в воде одного и двух суперкавитирующих ударников при их одновременном входе в воду со скоростями, превышающими скорость звука в среде. Разработаны условия, обеспечивающие неразрушающий вход ударников в воду и устойчивое движение по прицельной траектории в транзвуковом диапазоне скоростей. Получено устойчивое совместное движение в воде двух ударников на сверхзвуковой скорости.

Ключевые слова: групповое движение в воде, суперкавитация, ударник, кавитатор, сверхзвуковая скорость, гидробаллистическая трасса.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50343.18484

Движение в воде при высоких скоростях, в том числе превышающих скорость звука [1], наиболее эффективно в режиме суперкавитации, когда торцевая поверхность движущегося тела — кавитатор — образует в воде карверну (газопаровую полость), полностью охватывающую тело [2–4]. Настоящая работа является продолжением исследований [5], в которых реализовано совместное движение в воде двух ударников при скоростях около 1100 м/с. Цель работы заключается в разработке условий метания и конструкций, обеспечивающих неразрушающий вход и устойчивое движение в воде в сверхзвуковом диапазоне скоростей одного и двух ударников при пущечном старте в единой сборке.

Метание производилось в условиях гидробаллистической трассы [6]. В процессе движения ударников по траектории измерялась их скорость в трех сечениях: на выходе из ствола ускорителя, через 0.7 м пути от входа в воду и через 2.3 м. Через 2.6 м на траектории была установлена стальная мишень. Трасса наполнялась пресной водой с температурой 15°C, в таких условиях скорость звука, согласно формуле Лероя [7], составляет около 1464 м/с.

Ударники в составе разделяемой метаемой сборки разгонялись в канале гладкоствольной баллистической установки калибром 30 мм. На рис. 1 представлены рассматриваемые конфигурации двух вариантов подкалиберного ударника из сплава ВНЖ. Ударник формы I, показанный в верхней части рисунка, выполнен в виде усеченного конуса, ударник формы II, показанный в нижней части, состоит из двух конусов, упрочняющих его конструкцию.

На рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные зависимости скорости от пройденного в воде пути для обеих форм ударников. Расчет проводился путем интегрирования уравнения движения материальной точки

постоянной массы. Сила сопротивления F находилась по формуле $F = C_x \rho S_c V^2 / 2$, где S_c — площадь кавитатора ударника, V — скорость ударника, ρ — плотность воды, $C_x = 0.82(1 + \sigma)$ — коэффициент сопротивления, σ — число кавитации.

Рассматривается серия из шести опытов, в которой производилось метание ударников при транзвуковых скоростях. В опытах № 1–3 проводилось метание ударников формы I (рис. 2, а), в опытах № 4–6 — ударников формы II (рис. 2, б). Символами на рисунке показаны измеренные в эксперименте скорости, линиями — соответствующие номеру эксперимента расчетные зависимости падения скорости согласно формулам из работ [2,5].

В опыте № 1 (рис. 2, а) скорость ударника в момент входа в воду составила 1312 м/с, после чего он успешно преодолел путь до мишени по прицельной прямолинейной траектории. Различие величин рассчитанных и измеренных в экспериментах скоростей движения в воде составило менее 1%.

При анализе результатов опытов № 2, 3 с увеличенной до сверхзвуковой скоростью входа в воду было отмечено, что ударник формы I в расчетах имеет в среднем на 2–3% большую скорость, чем полученная в эксперименте. В опыте № 2 при начальной скорости 1523 м/с ударник формы I разрушился после преодоления в воде пути 1.5–2 м, а его фрагменты полностью

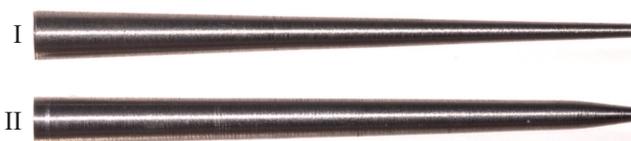


Рис. 1. Фотография применяемых подкалиберных ударников.

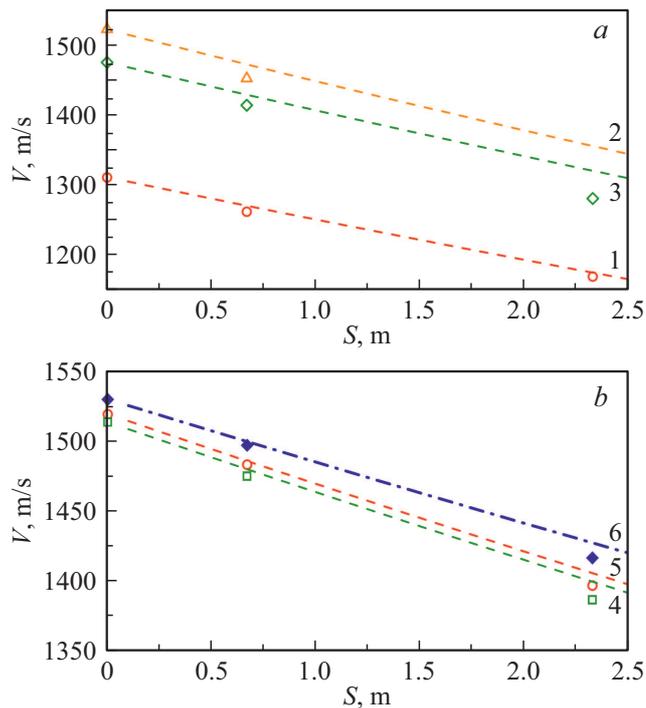


Рис. 2. Зависимости скорости ударников от пройденного в воде пути. *a* — для ударника формы I; *b* — для ударника формы II. Символами показаны экспериментальные данные, линиями — соответствующий каждому эксперименту расчет. Цифры 1–6 — номера опытов.

затормозились в результате трения о воду. Измерение площади поверхности кавитатора под микроскопом выявило ее увеличение на 12% по сравнению с пер-

воначальной, что может быть следствием начавшегося процесса пластической деформации материала ударника при движении в воде. Увеличение площади кавитатора способствует росту силы лобового сопротивления, вследствие чего будет наблюдаться отличие скорости ударника в эксперименте от расчета, в котором площадь кавитатора считается постоянной. Разрушение ударника указывает на то, что конструкция ударника формы I не обеспечивает достаточной прочности его корпуса при движении в воде со скоростями, близкими к скорости звука.

Для повышения прочности носовой части ударника в его профиль был добавлен еще один конус, позволяющий укрепить общую конструкцию ударника (рис. 1) с сохранением диаметра кавитатора. В опытах № 4 и 5 (рис. 2, *b*) было произведено метание одиночного усиленного ударника формы II в воду со скоростями 1512 и 1518 м/с соответственно, различие измеренных в эксперименте скоростей ударников в этих опытах не превысило 1%. Наблюдается устойчивое движение ударников по прямолинейной прицельной траектории до мишени.

Для ускорения в метаемой сборке, представленной на рис. 3, *a*, использовались два ударника формы II. Ударники в сборке помещались параллельно и устанавливались в стволе друг над другом. Перед входом в воду расстояние между кавитаторами ударников в наблюдаемой плоскости составило 16 мм. На рис. 3, *b* приведена фотография из опыта № 6 (рис. 2, *b*), в котором два ударника вошли в воду со скоростью 1529 м/с. Расчетные и экспериментальные значения скоростей одинаковых ударников очень близки, поэтому на рис. 2, *b* в опыте № 6 показан только нижний ударник. Ударники в момент

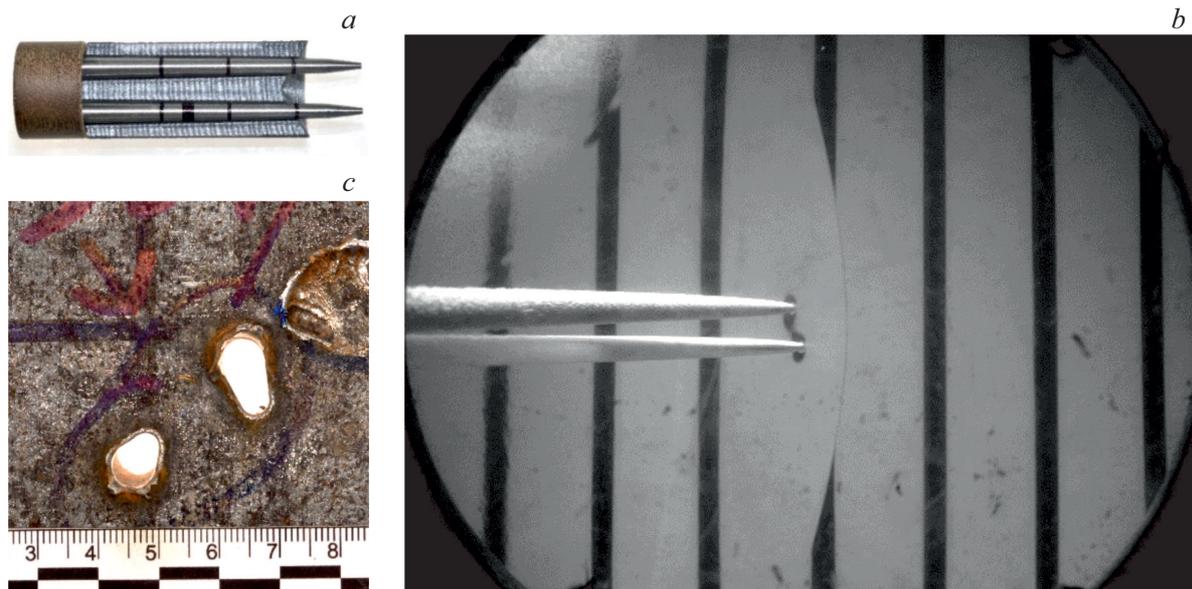


Рис. 3. Фотография двух ударников в сборке (*a*), их совместное движение в воде со сверхзвуковой скоростью 1496 м/с (*b*) и вид мишени после взаимодействия (*c*).

фотографирования (рис. 3, *b*) находятся на удалении 0.7 м от точки их входа в воду, их средняя скорость на наблюдаемом участке в пределах иллюминатора составила 1496 м/с, а абсолютное расстояние между их продольными осями находилось в диапазоне 16–18 мм. Через 1.6 м их скорость снизилась до 1417 м/с.

Наблюдаемое перед ударниками характерное искажение линий контрастной сетки (рис. 3, *b*) свидетельствует о реализации сверхзвукового режима движения ударников с отошедшей ударной волной. Характерно, что во всей представленной серии экспериментов поверхность границ суперкаверн на начальном этапе входа в воду выглядит возмущенной и неоднородной. Контуры ударников внутри каверн в данной серии практически неразличимы в отличие от изображений каверн, полученных ранее при более низких скоростях [5,6,8], где поверхность каверны оптически прозрачна.

По форме оставленных в мишени отверстий (рис. 3, *c*) можно заключить, что максимальный угол между осью ударника и нормалью к поверхности в момент соударения составлял менее 5°. Расстояние между кавитаторами ударников в момент их попадания в стальную мишень (2.6 м от входа в воду) составило 18 мм, при этом угол расхождения их траекторий не превысил 0.04°.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана конструкция ударника, способного сохранять целостность при входе в воду и движении в ней в режиме суперкавитации при скоростях, превышающих скорость звука в воде.

Впервые экспериментально продемонстрировано совместное устойчивое суперкавитирующее движение в воде двух ударников при скорости 1496 м/с со скоростью входа в воду 1529 м/с, при этом угол расхождения их траекторий не превысил 0.04° на дистанции 2.6 м.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00233).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Kirschner I.* Supercavitating projectile experiments at supersonic speeds // High-speed body motion in water. AGARD Report. 1997. V. 827. P. 35 (1–4). <https://www.sto.nato.int/publications/AGARD/AGARD-R-827/AGARD-R-827.pdf>
- [2] *Логвинович Г.В.* // Тр. ЦАГИ. 1980. В. 2052. С. 3–11.
- [3] *Федоров С.В., Велданов В.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 2. С. 15–20. <https://journals.ioffe.ru/articles/10815>
- [4] *Ибен У., Иванов Н.Г., Исаенко И.И., Шмидт А.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 24. С. 1–8. <http://journals.ioffe.ru/articles/42589>

- [5] *Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Чупашев А.В.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 20. С. 47–50. DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50343.18484 [Пер. версия: 10.1134/S1063785019100225].
- [6] *Буркин В.В., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А., Борисенков И.Л., Ищенко А.Н., Хабибуллин М.В., Чупашев А.В., Югов Н.Т.* // Инж.-физ. журн. 2018. Т. 91. № 3. С. 701–708. [Пер. версия: 10.1007/s10891-018-1787-y].
- [7] *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
- [8] *Ishchenko A., Burkin V., Diachkovskii A., Korolkov L., Chupashev A., Zyкова A.* // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1770. P. 030011 (1–8). DOI: 10.1063/1.4963953