

УДК 532.5; 623.4
DOI: 10.15372/PMTF202215103

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СНАРЯДА В ФОРМЕ УСЕЧЕННОГО КОНУСА ПРИ ЕГО ВХОДЕ В ВОДУ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

М.-Ю. Ху, Ш. Чзан, В.-С. Ся, Ц.-Ч. Мэн, В.-Б. И

Военно-морской инженерный университет, Ухань, Китай
E-mails: shuai_huminyong@163.com, 156565796@qq.com, xwx1990wy@163.com,
mqingchang@163.com, 857053194@qq.com

С использованием модели многофазной среды и метода жидких объемов, а также алгоритма построения смещенных сеток и программного обеспечения STAR-CCM+ численно решена задача о наклонном входе в воду снаряда в форме усеченного конуса. Рассчитаны гидродинамические характеристики и проанализировано напряженное состояние снаряда при различных углах входа в воду. Определен закон развития зоны кавитации. Показано, что полученные результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: взаимодействие конструкции с жидкостью, снаряд, напряженное состояние, гидродинамические характеристики

Введение. Как известно, высокоскоростной вход снаряда в воду сопровождается явлением суперкавитации. Задача о высокоскоростном входе снаряда в воду является сложной связанной задачей многофазной гидродинамики [1–12].

Ранее для изучения явления высокоскоростного входа снаряда в воду в основном использовались экспериментальные методы, основанные на технологии высокоскоростной съемки [13–15]. Однако вследствие увеличения скорости входа снаряда в воду существующей экспериментальной техники недостаточно для изучения поля течения, гидродинамических характеристик и напряженного состояния снаряда в момент его входа в воду. Развитие вычислительной техники и создание сложных расчетных моделей позволили решать указанные выше задачи методами численного моделирования. В работах [16–20] для исследования явления хвостового биения, возникающего при высокоскоростном входе снарядов в воду, предложено использовать метод численного моделирования трехмерного движения на основе метода конечных объемов и смешанной модели многофазного потока в сочетании с технологией построения динамических сеток. Были проанализированы гидродинамические характеристики хвостового удара снарядов различной формы, в частности снарядов с плоской головкой, снарядов с зазубринами и снарядов с конической головной частью. В работах [21–26] с использованием технологии построения адаптивных и подвижных сеток получены частотно-временные характеристики снарядов, входящих в воду, и изучено влияние кавитации на баллистику входа снаряда в воду. Баллистическая траектория —

основной параметр движения снарядов, от которого зависит эффективное поражение подводных целей. Коммерческий пакет STAR-CCM+, предназначенный для численного моделирования, объединяет современные численные модели и алгоритмы и применяется для решения задач о течении многофазных потоков.

В работах [27–29] с использованием пакета STAR-CCM+ разработана модель низкоскоростного входа в воду цилиндрического снаряда с плоской головкой, а также проведено сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными. В [30] выполнено численное моделирование устойчивости движения высокоскоростного снаряда в воде, изучены гидродинамические характеристики и закономерности развития кавитации без учета сжимаемости жидкости.

Снаряды в форме усеченного конуса имеют широкое применение, но геометрическая форма таких снарядов затрудняет пространственную дискретизацию при численном решении задач и создание надежных численных моделей.

В данной работе выполнено численное моделирование процесса вхождения в воду со сверхзвуковой скоростью снаряда в форме усеченного конуса с учетом сжимаемости жидкости. Изучено влияние поля течения на гидродинамические характеристики и на напряженное состояние снаряда при различных значениях физических параметров задачи.

1. Численная модель. При увеличении диаметра кавитатора увеличивается сопротивление движению снаряда, в то время как очень небольшой диаметр кавитатора снижает устойчивость движения снаряда. С учетом экспериментальных данных в качестве объекта исследования был выбран снаряд в форме усеченного конуса диаметром 3 мм. Длина снаряда равна $L = 144$ мм, диаметр кавитатора $D = 14$ мм. Масса снаряда составляла 50,5 г, материал корпуса снаряда — алюминиевый сплав. На рис. 1 показаны геометрические размеры снаряда, имеющего форму усеченного конуса. В табл. 1 приведены размеры расчетных областей (θ — угол, под которым снаряд входит в воду, l_{air} , b_{air} , h_{air} — длина, ширина и высота области, занятой воздухом, l_f , b_f , h_f — длина, ширина и высота области, занятой жидкостью).

При входе в воду снарядов в форме усеченного конуса со сверхзвуковой скоростью необходимо учитывать сжимаемость воды. Расчет с учетом жесткого сцепления при входе такого снаряда в сжимаемую жидкость является очень сложным. Для того чтобы упростить расчет, улучшить сходимость алгоритма и увеличить точность расчета, принимается уравнение состояния

$$\rho = \rho_0 + P/c^2,$$

где ρ — плотность воды; $\rho_0 = 998,2$ кг/м³ — отсчетная плотность; P — давление; c — скорость звука в воде.

Снаряды имеют разную массу: масса цилиндрического снаряда диаметром $10D$ равна 65,2 г, масса снаряда в форме усеченного конуса — 50,5 г. Предполагалось, что снаряд входит в воду со скоростью $V_0 = 500, 800, 1000$ м/с. Дополнительные параметры снарядов приведены в табл. 2 (d — диаметр задней части снаряда, m — масса снаряда).

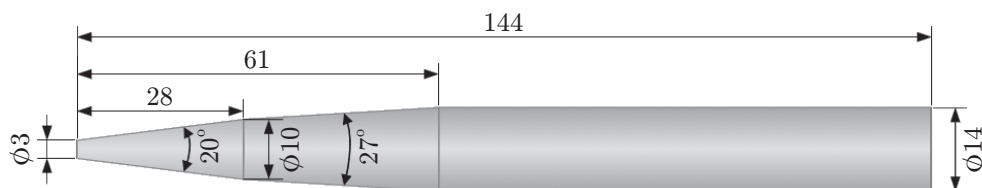


Рис. 1. Геометрические размеры снаряда в форме усеченного конуса

Таблица 1

Размеры расчетных областей

θ , град	l_{air} , мм	b_{air} , мм	h_{air} , мм	l_f , мм	b_f , мм	h_f , мм
30	800	400	150	800	400	450
45	700	400	200	700	400	500
60	600	400	250	600	400	550

Таблица 2

Параметры снарядов

Форма снаряда	L , мм	d , мм	D , мм	m , г	V_0 , м/с	θ , град
Цилиндр	145	14,5	14,5	65,2	500, 800, 1000	45
Конус	145	14,5	3,0	50,5	500, 800, 1000	45

В данной работе с использованием модели многофазного течения и алгоритма жидких объемов выполнено численное моделирование наклонного входа в воду снаряда, имеющего сверхзвуковую скорость. Уравнения переноса массы, импульса и энергии каждой фазы решаются при условии, что во всех фазах имеется общее поле давления. Объемные доли воды α_w , воздуха α_{air} и пара α_v удовлетворяют тождеству $\alpha_w + \alpha_{air} + \alpha_v = 1$.

Задача о взаимодействии конструкции с жидкостью является сильно связанной. При решении задачи создается единая расчетная область для конструкции и жидкости. Для решения связанной задачи на границе раздела жидкости и конструкции осуществляется обмен данными при расчете параметров конструкции и жидкости. Для областей, в которых вычислялись гидродинамические характеристики процесса и определялось напряженное состояние в снаряде, строились различные сетки. Различные сетки использовались также при решении задачи о входе снаряда в воду под различными углами.

2. Анализ гидродинамических характеристик и напряженного состояния снарядов при различных начальных значениях скорости. Ниже приводятся результаты расчета гидродинамических характеристик и анализа напряженного состояния снарядов при различных скоростях входа в воду.

2.1. Кинематические характеристики. В расчетах используется безразмерная глубина погружения снаряда в воду $\bar{H} = H/D$ (H — глубина погружения в воду). На рис. 2 представлены зависимости безразмерной глубины погружения цилиндрических и усеченных конических снарядов от времени при различных начальных значениях числа Маха, на рис. 3 — зависимость числа Маха M от времени при различных начальных значениях числа Маха M_0 . Чем больше начальная скорость, тем больше глубина погружения снаряда в воду. Скорость, с которой уменьшается скорость снарядов в форме усеченного конуса, меньше скорости, с которой уменьшается такая же скорость цилиндрических снарядов, входящих в воду. При уменьшении диаметра кавитатора уменьшается сила сопротивления движению снаряда.

2.2. Анализ зависимости коэффициента осевой силы от времени. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента осевой силы $C_a = 2F_a/(\rho V_0^2 A)$ (F_a — осевая сила; V_0 — начальная скорость входа снаряда в жидкость; $A = 1,6513 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площадь поперечного сечения снаряда) от времени для снаряда в форме усеченного конуса. В отличие от осевой силы коэффициент осевой силы более точно характеризует изменение гидродинамических параметров. Коэффициент осевой силы быстро увеличивается после вхождения снаряда в жидкость, а затем быстро уменьшается. Максимальное значение коэффициента осевой

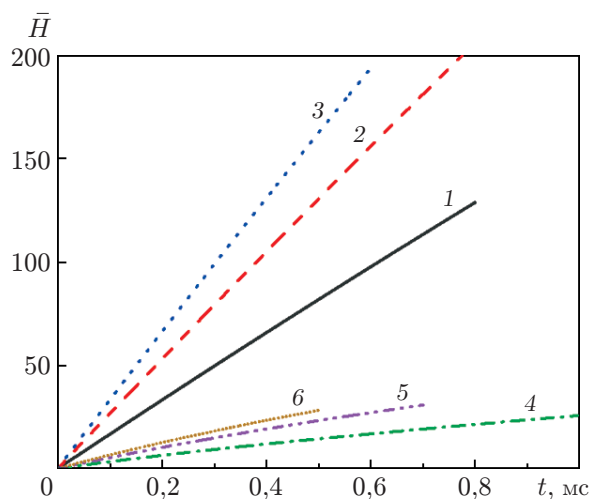


Рис. 2

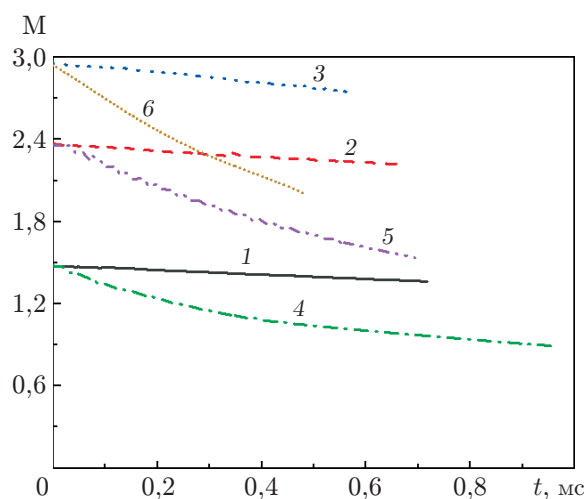


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости безразмерной глубины погружения усеченного конического (1–3) и цилиндрического (4–6) снарядов от времени при различных начальных значениях числа Маха:

1, 4 — $M_0 = 1,470$, 2, 5 — $M_0 = 2,353$, 3, 6 — $M_0 = 2,941$

Рис. 3. Зависимости числа Маха от времени для усеченного конического (1–3) и цилиндрического (4–6) снарядов при различных начальных значениях числа Маха:

1, 4 — $M_0 = 1,470$, 2, 5 — $M_0 = 2,353$, 3, 6 — $M_0 = 2,941$

силы достигается непосредственно после входа снаряда в воду. Для снаряда в форме усеченного конуса, в отличие от цилиндрического снаряда, изменение коэффициента осевой силы имеет более сложный характер, поскольку диаметр кавитатора снаряда меньше.

2.3. *Анализ напряженного состояния снаряда.* На рис. 5 представлено распределение напряжений снаряда σ при $M_0 = 2,353$. При ударе снаряда о свободную поверхность напряжения в боевой части снаряда максимальны. По мере движения снаряда область максимальных напряжений перемещается по направлению к задней части снаряда. Это обусловлено тем, что снаряд входит в воду под углом и силы, действующие на верхнюю и нижнюю части корпуса снаряда, несимметричны. Диаметр боевой части снаряда и площадь смачиваемой области небольшие. Боеголовка снаряда вращается против часовой стрелки. Часть усеченного конуса снаряда сталкивается с поверхностью кавитации, в результате чего зона концентрации напряжений снаряда смещается к задней части снаряда.

На рис. 6 представлена зависимость максимальных напряжений от времени при различных начальных значениях числа Маха для снаряда в форме усеченного конуса. Максимальное напряжение возникает при ударе снаряда о свободную поверхность жидкости. Чем больше скорость входа снаряда в воду, тем больше максимальное напряжение. При движении снаряда его максимальное напряжение меняется быстро и неравномерно. Это означает, что движение снаряда в форме усеченного конуса неустойчиво.

3. Анализ гидродинамических характеристик и напряженного состояния снаряда при различных значениях угла его входа в воду. Ниже приводятся результаты расчета гидродинамических характеристик и анализа напряженного состояния снарядов при различных значениях угла входа в воду.

3.1. *Зависимость коэффициента сопротивления от времени.* На рис. 7 приведена зависимость коэффициента осевой силы от времени при различных значениях угла входа снаряда в воду. Максимальное значение коэффициента осевой силы достигается при входе

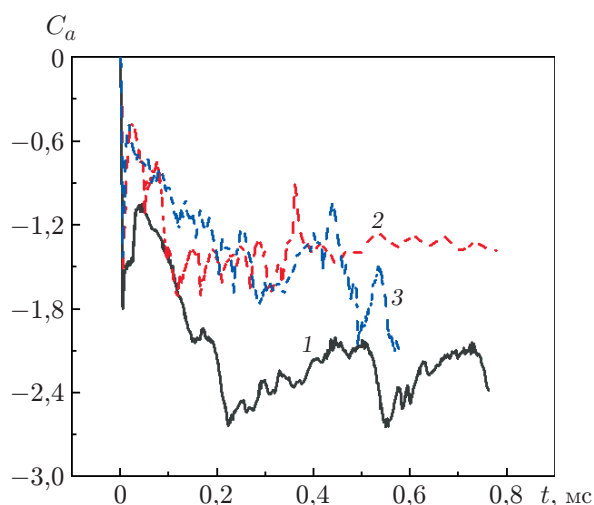


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость коэффициента осевой силы от времени для снаряда, имеющего форму усеченного конуса, при различных начальных значениях числа Маха:

1 — $M_0 = 1,470$, 2 — $M_0 = 2,353$, 3 — $M_0 = 2,941$

Рис. 5. Распределение напряжений сдвига на стенке снаряда при числе Маха $M_0 = 2,353$ и $\theta = 45^\circ$ в различные моменты времени:

a — $t = 0$, $б$ — $t = 0,08$ мс, $в$ — $t = 0,16$ мс, $г$ — $t = 0,24$ мс, $д$ — $t = 0,32$ мс, $е$ — $t = 0,40$ мс, $ж$ — $t = 0,48$ мс, $з$ — $t = 0,56$ мс, $и$ — $t = 0,64$ мс, $к$ — $t = 0,72$ мс

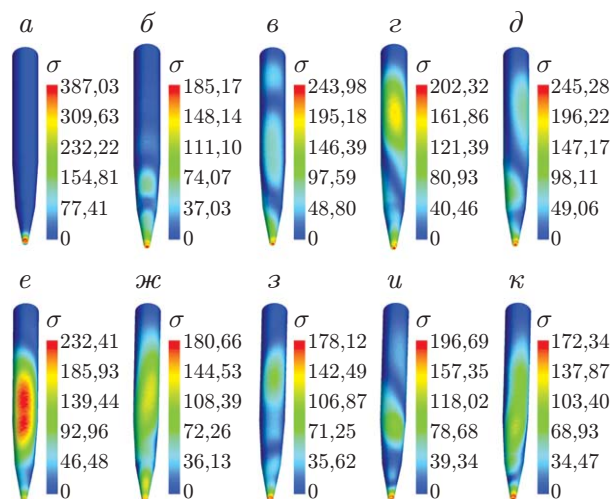


Рис. 5

снаряда под углом $\theta = 45^\circ$, при входе под углами $\theta = 30, 60^\circ$ значения этого коэффициента практически одинаковы. После входа снаряда в воду коэффициент осевой силы незначительно уменьшается, а затем увеличивается. Максимальное значение коэффициента осевой силы достигается непосредственно после входа снаряда в воду. Коэффициент осевой силы снаряда непрерывно уменьшается с момента соприкосновения снаряда со свободной поверхностью до момента времени $t = 0,175$ мс. При входе снаряда в воду под углом $\theta = 60^\circ$ при $t > 0,175$ мс коэффициент осевой силы колеблется в окрестности значения $C_a = -2,0$. При входе снаряда в воду под углом $\theta = 45^\circ$ при $t > 0,21$ мс коэффициент осевой силы колеблется в окрестности значения $C_a = -2,5$.

3.2. Зависимость диаметра области кавитации от времени. На рис. 8 приведена зависимость безразмерного диаметра области кавитации D_c от времени при входе в воду под различными углами снаряда в форме усеченного конуса. Чем меньше угол входа, тем больше безразмерный диаметр области кавитации. Это обусловлено тем, что при входе снаряда в воду под малым углом кавитационное отверстие больше. Чем больше кавитационное отверстие, тем больше время, в течение которого оно уменьшается. Поступающий в полость газ вынуждает ее расширяться.

3.3. Анализ напряженного состояния снаряда. На рис. 9 приведено распределение напряжений в снаряде при его входе в воду под углом $\theta = 45^\circ$ в различные моменты времени. При ударе снаряда о свободную поверхность жидкости напряжения в окрестности его боковой части наибольшие, а в остальной части корпуса снаряда практически равны нулю. При входе снаряда в воду появляется зона концентрации напряжений, которая постепенно смещается к задней части снаряда.

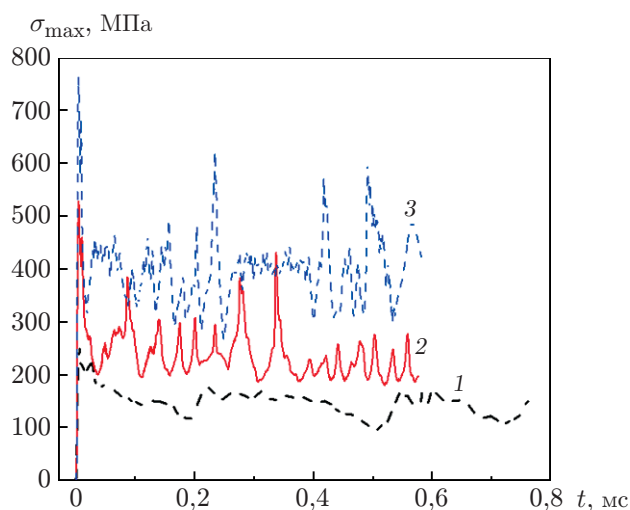


Рис. 6

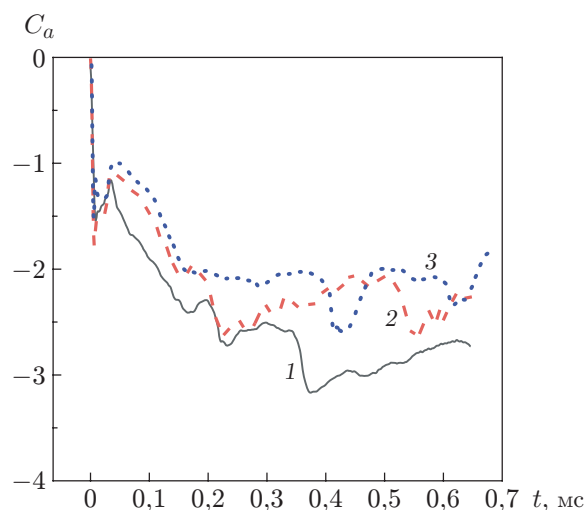


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость максимальных напряжений от времени для снаряда в форме усеченного конуса при различных начальных значениях числа Маха:

1 — $M_0 = 1,470$, 2 — $M_0 = 2,353$, 3 — $M_0 = 2,941$

Рис. 7. Зависимость коэффициента осевой силы от времени при различных значениях угла входа снаряда в воду:

1 — $\theta = 30^\circ$, 2 — $\theta = 45^\circ$, 3 — $\theta = 60^\circ$

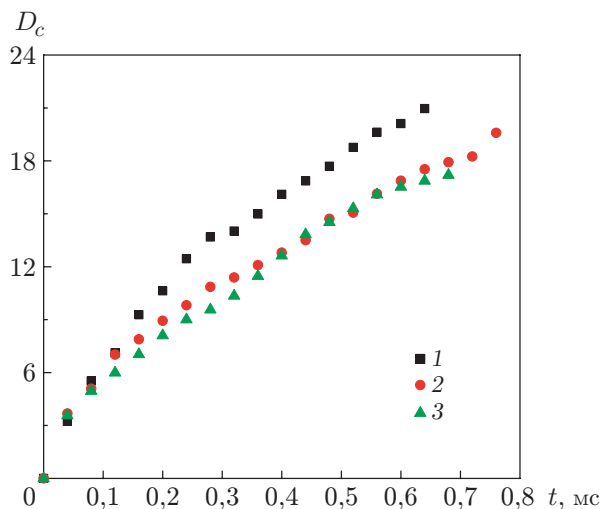


Рис. 8

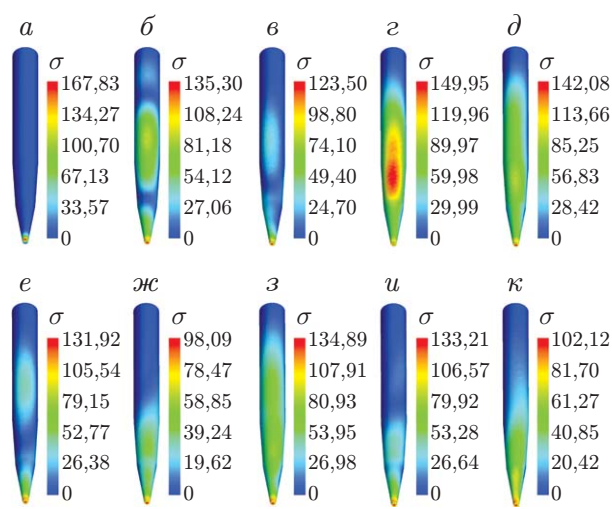


Рис. 9

Рис. 8. Зависимость диаметра области кавитации от времени при различных значениях угла входа снаряда в воду:

1 — $\theta = 30^\circ$, 2 — $\theta = 45^\circ$, 3 — $\theta = 60^\circ$

Рис. 9. Распределение напряжений на стенке снаряда при входе в воду под углом $\theta = 45^\circ$ и $M_0 = 1,47$ в различные моменты времени:

а — $t = 0$, б — $t = 0,08$ мс, в — $t = 0,16$ мс, г — $t = 0,24$ мс, д — $t = 0,32$ мс, е — $t = 0,40$ мс, ж — $t = 0,48$ мс, з — $t = 0,56$ мс, и — $t = 0,64$ мс, к — $t = 0,72$ мс

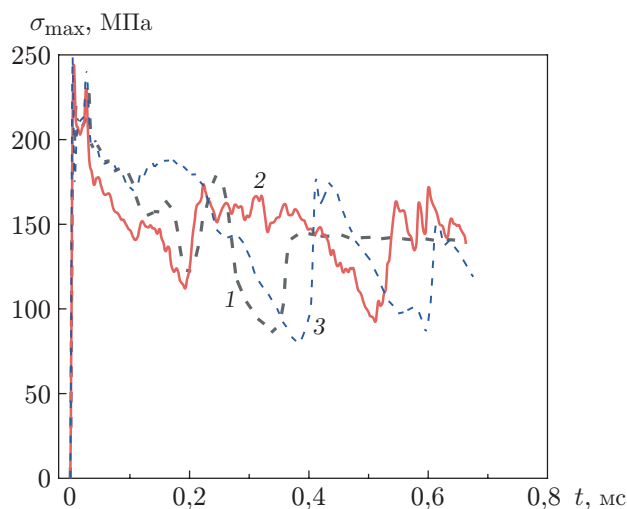


Рис. 10. Зависимость максимального напряжения от времени при различных значениях угла входа снаряда в воду:

1 — $\theta = 30^\circ$, 2 — $\theta = 45^\circ$, 3 — $\theta = 60^\circ$

На рис. 10 приведена зависимость максимального напряжения от времени. Напряжение в снаряде достигает максимального значения при ударе о свободную поверхность жидкости. После этого максимальное напряжение уменьшается, а затем быстро увеличивается. В момент удара вследствие изменения состояния жидкости происходит незначительное раскачивание снаряда, поэтому область максимального напряжения смещается в среднюю часть снаряда (см. рис. 9). Напряжение достигает максимального значения при $t = 0,08$ мс, затем до момента $t = 0,16$ мс уменьшается, а при $t = 0,24$ мс вновь становится максимальным. Изменение напряжения наиболее существенно в том случае, когда снаряд входит в воду под углом $\theta = 30^\circ$ или $\theta = 60^\circ$.

Закключение. Численно исследованы гидродинамика снаряда в форме усеченного конуса, входящего в воду со сверхзвуковой скоростью, и напряженное состояние снаряда. Изучены законы развития кавитации, уменьшения скорости снаряда, изменения коэффициента силы и распределение напряжений в снаряде при различных начальных числах Маха и углах входа снаряда в воду. Скорость погружения в воду снарядов в форме усеченного конуса уменьшается медленнее, чем скорость погружения снарядов цилиндрической формы. При изменении угла входа число Маха незначительно изменяется. Это свидетельствует о том, что угол входа оказывает незначительное влияние на уменьшение скорости. При ударе снаряда о свободную поверхность жидкости коэффициент осевой силы сначала быстро увеличивается, а затем быстро уменьшается. Кроме того, при ударе снаряда о поверхность жидкости под ним образуется зона низкого давления, в результате чего коэффициент осевой силы становится отрицательным. В случае если снаряд входит в воду под углом $\theta = 45^\circ$, значение коэффициента осевой силы колеблется в окрестности нуля. Область низкого давления увеличивается, если снаряд входит в воду под малым углом. Для закрытия больших кавитационных отверстий требуется больше времени. Расширение полости обусловлено поступлением в нее большого количества газа. Напряжение в боевой части снаряда максимально в момент удара снаряда о свободную поверхность. По мере движения снаряда область максимального напряжения смещается к его задней части. При входе снаряда в воду под различными углами распределения напряжений в его корпусе одинаковы. Следовательно, угол входа в воду оказывает незначительное влияние на распределение напряжения в снаряде.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mojtaba M., Hossein T.** A novel configuration optimization for high-speed ventilated supercavitating vehicles // *Ocean Engng.* 2019. V. 179. P. 13–21.
2. **Karn A.** An experimental investigation into supercavity closure mechanisms // *J. Fluid Mech.* 2016. V. 789. P. 259–284.
3. **Karn A., Arndt R. E. A., Hong J.** Dependence of supercavity closure upon flow unsteadiness // *Experiment. Thermal Fluid Sci.* 2015. V. 68. P. 493–498.
4. **Shi S.-G., Wang Y.-D.** Experimental investigation on hydrodynamic characteristics of supercavitating vehicle during its motion // *Acta Armamentarii.* 2019. V. 40, N 11. P. 2266–2271.
5. **Shi H., Makoto K.** Underwater acoustics and cavitating flow of water entry // *Acta Mech. Sinica.* 2004. V. 20, N 4. P. 374–382.
6. **Yi W.-J., Wang Z.-Y., Xiong T. H., Zhou W.-P.** Research on drag reduction characteristics of a under water high-speed supercavitation projectile // *Ship Sci. Technol.* 2019. V. 41, N 21. P. 117–120.
7. **Zhang K., Li P.** Experimental study of planning force on supercavitating vehicle tail // *J. Ship Mech.* 2020. V. 24, N 1. P. 8–17.
8. **Truscott T. T., Techet A. H.** Water entry of spinning spheres // *J. Fluid Mech.* 2009. V. 625. P. 135–165.
9. **Truscott T. T., Techet A. H.** Cavity formation in the wake of a spinning sphere impacting the free surface // *Phys. Fluids.* 2006. V. 18. 091113.
10. **Derakhshanian M. S., Haghdel M., Alishahi M. M., et al.** Experimental and numerical investigation for a reliable simulation tool for oblique water entry problems // *Ocean Engng.* 2018. V. 160. P. 231–243.
11. **Wei Z., Hu C.** An experimental study on water entry of horizontal cylinders // *J. Marine Sci. Technol.* 2014. V. 19. P. 338–350.
12. **Xia W., Wang C., Wei Y., et al.** Experimental study on water entry of inclined circular cylinders with horizontal velocities // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2019. V. 118. P. 37–49.
13. **Gilbarg D., Anderson R. A.** Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water // *J. Appl. Phys.* 1948. V. 19. P. 127–139.
14. **Shi H.-H., Itoh M., Takami T.** Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry // *J. Fluids Engng.* 2000. V. 122, N 4. P. 806–810.
15. **Hrubes J. D.** High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles // *Experiments Fluids.* 2001. V. 30, N 1. P. 57–64.
16. **Chen C., Sun T., Wei Y., et al.** Computational analysis of compressibility effects on cavity dynamics in high-speed water-entry // *Intern. J. Naval Architecture Ocean Engng.* 2019. V. 11, N 1. P. 495–509.
17. **Alsos H. S., Faltinsen O. M.** 3D motion dynamics of axisymmetric bodies falling through water // *Ocean Engng.* 2018. V. 169. P. 442–456.
18. **Uddin M. I., Karim M. M.** Application of volume of fluid (VOF) method for prediction of wave generated by flow around cambered hydrofoil // *Procedia Engng.* 2017. V. 194. P. 82–89.
19. **De Tullio N., Ruban A. I.** A numerical evaluation of the asymptotic theory of receptivity for subsonic compressible boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 771. P. 520–546.
20. **Tyagi M., Acharya S.** Large eddy simulation of turbulent flows in complex and moving rigid geometries using the immersed boundary method // *Intern. J. Numer. Methods Fluids.* 2005. V. 48, N 7. P. 691–722.

21. **Li Q., Lu L., Cai T.** Numerical investigations of trajectory characteristics of a high-speed water-entry projectile // AIP Adv. 2020. V. 10, N 9. 095107.
22. **Liu H., Zhou B., Han X., et al.** Numerical simulation of water entry of an inclined cylinder // Ocean Engng. 2020. V. 215. 107908.
23. **Truscott T.** Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles: Thesis Ph. D. Cambridge: Massachusetts Inst. of Technol., 2009.
24. **May A.** Water entry and the cavity-running behavior of missiles: Tech. Rep. / Navsea Hydroballistics Advisory Committee. N SEAHAC/TR-75-2. S. 1., 1975.
25. **Lee M., Longoria R. G., Wilson D. E.** Ballistic waves in high-speed water entry // J. Fluids Structures. 1997. V. 11, N 7. P. 819–844.
26. **Lee M., Longoria R. G., Wilson D. E.** Cavity dynamics in high-speed water entry // J. Fluids Structures. 1997. V. 11, N 7. P. 819–844.
27. **Ren H., Zhao X.** Numerical simulation for ice breaking and water entry of sphere // Ocean Engng. 2022. V. 243. 110198.
28. **Hu M.-Y., Zhang S., Meng Q.-C.** Hydrodynamic characteristic and numerical simulation and experimental study of projectile body stress response on oblique water entry of projectile // J. Naval Engng Univ. 2021. V. 33, N 4. P. 7–12.
29. **Hou Z., Sun T., Quan X., et al.** Large eddy simulation and experimental investigation on the cavity dynamics and vortex evolution for oblique water entry of a cylinder // Appl. Ocean Res. 2018. V. 81. P. 76–92.
30. **Akbari M. A., Mohammadi J., Fereidooni J.** A dynamic study of the high-speed oblique water entry of a stepped cylindrical-cone projectile // J. Brazil. Soc. Mech. Sci. Engng. 2021. V. 43, N 1. P. 1–15.

*Поступила в редакцию 30/III 2022 г.,
после доработки — 8/X 2022 г.
Принята к публикации 28/XI 2022 г.*
