

УДК 532.5.011

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КАВЕРНЫ ПРИ УДАРЕ ШАРА О ВОДУ С ДОЗВУКОВЫМИ И ТРАНСЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

© Сергей Иванович Герасимов^{1,2,3,4}, Владимир Иванович Ерофеев⁴,
Василий Андреевич Кикеев^{3,4}, Вадим Анатольевич Кузьмин^{1,2,3,4},
Борис Александрович Яненко¹

¹Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

²Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

³Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

⁴Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород
erof.vi@yandex.ru

Аннотация. Представлено моделирование формирования каверны и ее схлопывание, вызванное высокоскоростным ударом и проникновением жесткого ударника в воду. Метод подразумевает, что высокоскоростной вход в воду описывается динамикой каверны, где схлопывание на глубине предшествует схлопыванию на поверхности. Приведены результаты расчетного исследования движения шара из стали ШХ15 диаметром 13,5 - 25 мм с различными скоростями в воде.

Ключевые слова: шар, вода, удар о воду, деформирование, численное моделирование, уравнение состояния.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-38-00297).

CAVITY DYNAMICS IN HIGH-SPEED WATER ENTRY FOR SPHERE WITH TRANSEND VELOCITIES

© S.I. Gerasimov^{1,2,3,4}, V.I. Erofeev⁴, V.A. Kikeev^{3,4}, V.A. Kuzmin^{1,2,3,4}, B.A. Janenko¹

¹Sarov Physical-Technical Institute—branch NRSU “MIPHY”, Sarov, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Russian Scientific-Research Institute, Sarov, Russia

³R.E. Alekseev Nyzhny Novgorod Technical University, Nyzhny Novgorod, Russia

⁴Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science, Nyzhny Novgorod, Russia
erof.vi@yandex.ru

Abstract. The method is presented for modeling the cavity formation and collapse followed by high-speed impact and penetration of a rigid spherical projectile into water. The method proposed that high-speed water entry is characterized by a cavity that experiences a deep closure prior to closure at the surface. The results are presented for numerical simulating steel (ShKh15) 13.5-25 mm-diameter sphere impact and penetration into water.

Keywords: sphere, water, impact into water, strain, numerical simulation, equation of state condition.

Acknowledgements. The work was supported by the RFBR, project no. 18-38-00297.

Введение. Работа представляет расчетное исследование динамики каверны при ударе шара о воду, заполняющую стальной резервуар, с различными начальными скоростями от 1000 м/с до 1350 м/с. В расчетах рассматривались шары из стали ШХ15 диаметром $d=13,5; 16,5; 20$ и 25мм.

Численное моделирование. Численный расчет проводился в конечно-элементном программном комплексе ANSYS с использованием явного решателя LS-DYNA [1-3]. Решение осуществлялось произвольным лагранжево-эйлеровым методом (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation) [2,4] на трехмерной сетке. Использовались трехмерные восьмиузловые элементы Solid 164. Вода и воздух описывалась методом Эйлера, а шар и стенки резервуара – методом Лагранжа. Такой подход позволяет моделировать процесс деформирования части с эйлеровой формулировкой, занятой жидкостью, без искажений сетки и при этом использовать при необходимости различные критерии деформирования и разрушения частей с лагранжевой формулировкой.

Геометрические параметры расчетной модели показаны на Рис.1. Материалы частей расчетной модели показаны на Рис. 2.

Ввиду симметрии рассмотрена половина модели с заданием соответствующих граничных условий.

Граничные условия задавались узлам в системе координат, показанной на Рис. 2, в соответствии с соотношениями: $u(x, y, 0) = 0, u(x, 0, z) = 0$.

Узлам шара задавалась начальная скорость V_0 , также было задано ускорение свободного падения g в направлении движения шара.

Полная расчетная модель содержала 643104 расчетных ячейки.

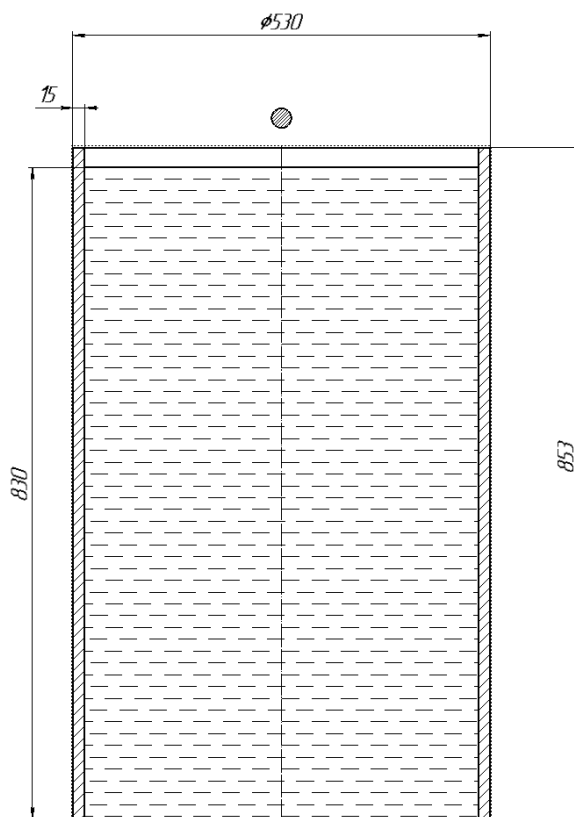


Рис. 1. Геометрия расчетной модели.

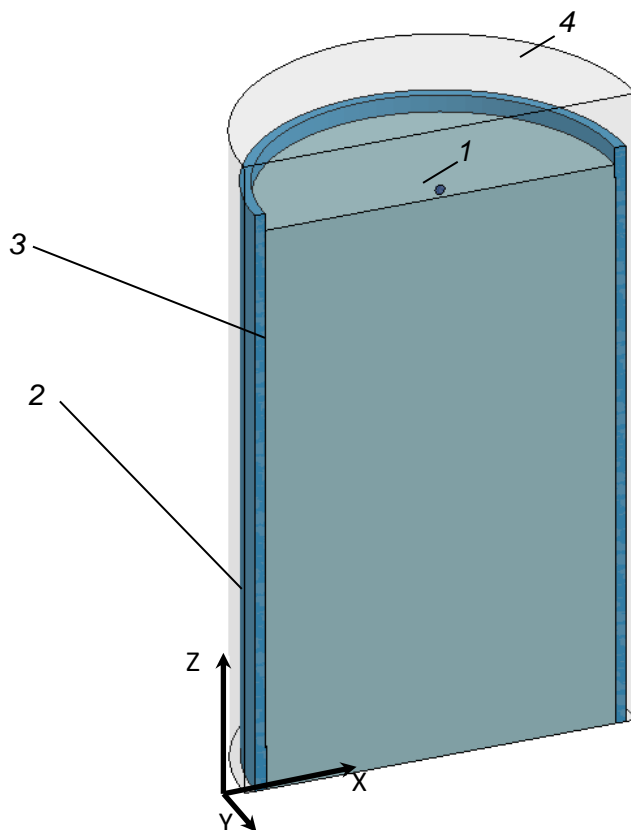


Рис. 2. Расчетная модель: 1 – шар (сталь ШХ15), 2 – резервуар (сталь 20), 3 – вода, 4 – воздух.

Система уравнений, описывающих течение среды [5], имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \left(\vec{v} - \vec{x} \right) + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \nabla \vec{v} \left(\vec{v} - \vec{x} \right) = \vec{F} + \operatorname{div} \sigma \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla E \left(\vec{v} - \vec{x} \right) = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \end{cases} \quad (1)$$

Характер деформирования среды определяется соотношениями

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, T), \quad (2)$$

включаемыми в систему исходных уравнений согласно выбранной модели сплошной среды. Сжимаемость среды под действием внешних сил определяется шаровой составляющей тензора напряжений и связанным с ней уравнением состояния (УРС), а изменение формы определяется девиатором тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + s_{ij} \quad (3)$$

$$p = p(\rho, e), \quad (4)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, s_{ij} – девиатор тензора напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера, p – гидростатическое давление, заданное УРС (4).

УРС замыкает систему уравнений (1). Далее по тексту будут использоваться индексы для обозначения гидростатического давления для воды и воздуха, заданного УРС, $p_w = p_w(\rho, e)$ и $p_a = p_a(\rho, e)$ соответственно.

Необходимо также добавить алгоритм связывания (coupling algorithm), чтобы обеспечить взаимодействие лагранжевой и эйлеровых частей.

В программном продукте LS-Dyna реализованы два алгоритма лагранжево-эйлерова связывания: метод ограничений и метод штрафа [1, 5].

В настоящей работе использовался метод штрафа. Данный метод позволяет определить силы, возникающие при проникновении лагранжевой части в эйлерову. Если проникновение обнаруживается, то к обеим частям прикладываются поверхностные силы, определяемые соотношением:

$$R = r_i d, \quad (5)$$

где r_i – коэффициент жесткости между подчиненной (лагранжевой) частью и главной (эйлеровой), d – величина относительного перемещения между узлами лагранжевой части и В расчете были приняты материала с эйлеровой формулировкой.

В соответствии с этими положениями для моделирования деформирования и течения среды для каждой части расчетной модели были подобраны соответствующие модели материалов и уравнения состояния.

Следующие модели деформирования материалов: для стали – упругопластическая модель с билинейным изотропным упрочнением. Вода и воздух в расчете подразумевались средами, не имеющими предела текучести.

В области упругих деформаций поведение стали описывается законом Гука

$$s_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} \quad (6)$$

$$p = -K \frac{\Delta V}{V}$$

где $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига, ε_{ij} – девиатор тензора деформаций, E – модуль Юнга,

ν – коэффициент Пуассона, $K = \frac{E}{2(1-2\nu)}$ – модуль объемного сжатия, $\frac{\Delta V}{V}$ – объемная деформация.

В пластической области деформирования для стали девиатор тензора напряжений подчиняется условию текучести Мизеса

$$\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0 \quad (7)$$

Пластические свойства стали описывались моделью, имеющей следующий вид:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_{\text{tan}} \cdot \varepsilon^p \quad (8)$$

где σ_0 – предел текучести материала, E_{tan} – модуль упрочнения, ε^p – пластическая деформация.

Принятые физико-механические свойства металлов, в соответствии с моделями деформирования, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Физико-механические свойства металлов

	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Предел текучести σ_T , МПа	Модуль упрочнения E_{tan} , МПа
ШХ15 [6]	7812	$2,11 \cdot 10^5$	0,3	2200	5000
Сталь 20 [6]	7850	$2,0 \cdot 10^5$	0,3	225	471

Тензор напряжений модели материала для воды и воздуха имеет вид

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \eta \cdot \varepsilon'_{ij} \quad (9)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, p – гидростатическое давление (положительное при сжатии) заданное УРС, η – коэффициент динамической вязкости, δ_{ij} – символ Кронекера, ε'_{ij} – девиатор тензора скоростей деформаций.

Для определения зависимости $p_e = p_e(\rho, E)$ для воды использовалось УРС Грюнайзена [1] вида:

$$p_e = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} + \gamma_0 e, \quad (10)$$

где ρ_0 – начальная плотность, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ – относительное изменение объема, γ_0 – постоянная Грюнайзена, a – коррекция постоянной Грюнайзена, S_1 – коэффициент аналитического выражения ударной адиабаты вещества ($D = c_0 + S_1 u$, D – скорость фронта ударной волны, c_0 – объемная скорость звука, u – массовая скорость вещества), e – внутренняя энергия на единицу объёма.

УРС воздуха $p_e = p_e(\rho, E)$ принято в форме:

$$p_e = (k - 1) \frac{\rho}{\rho_0} e \quad (11)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты, e – внутренняя энергия на единицу объёма.

Плотности воды и воздуха приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Плотность и вязкость воды и воздуха

Название параметра	Плотность $\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Вязкость η , Па·с
Вода	1000	$1,519 \cdot 10^{-3}$
Воздух	1,225	-

Параметры УРС воды подобраны в соответствии с экспериментальными данными по ударному сжатию [8] и приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры уравнения состояния воды

Название параметра	Плотность стали $\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Параметр $c, \frac{\text{км}}{\text{с}}$	Коэффициент Грюнайзена γ_0	Параметр a	Параметр S_1
Значение параметра	1000	1,593	0,08	0	1,8

Результаты численного моделирования. На Рис. 3 показан момент глубокого схлопывания каверны в воде.

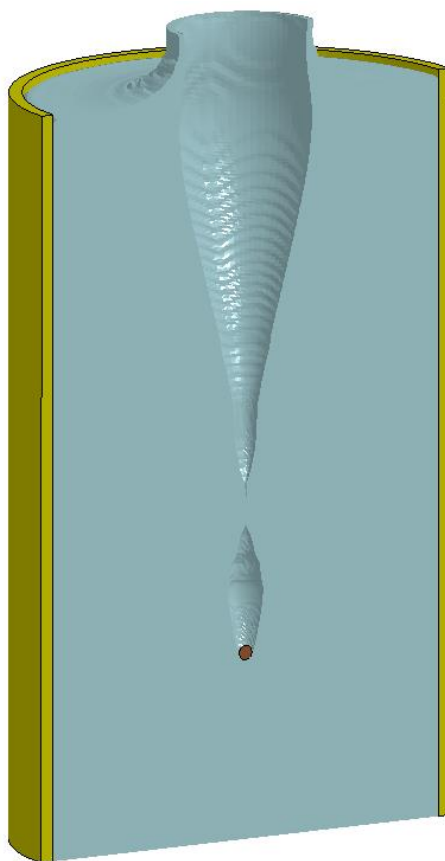


Рис.3. Момент глубокого схлопывания каверны

На Рис. 4 показаны результаты расчета в относительных координатах зависимости глубины и времени схлопывания каверны. На графике $Z_{\text{схл}}/d_{\text{схл}}$ – отношение глубины схлопывания каверны к диаметру шара, $V_0 \cdot t_{\text{схл}}/d_{\text{ш}}$ – отношение произведения начальной скорости шара и времени схлопывания каверны к диаметру шара, $V_0^2 \cdot t_{\text{схл}}/d_{\text{ш}} \cdot V_{\text{зв}}$ – отношение произведения квадрата начальной скорости шара и времени схлопывания каверны к произведению диаметра шара и скорости звука в воде. Скорость звука в воде $V_{\text{зв}} = 1480 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

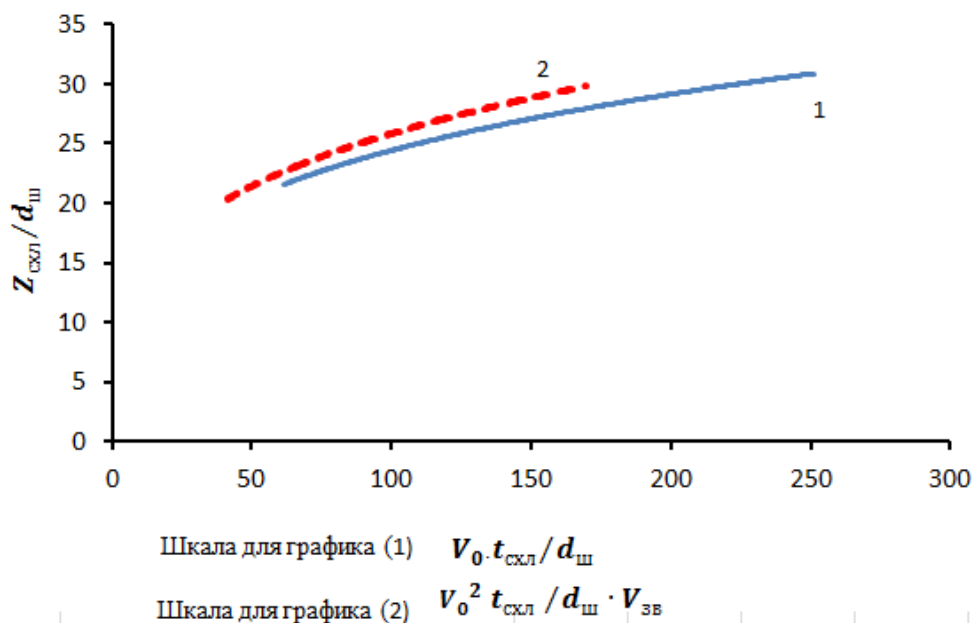


Рис. 4. Результаты расчета

Выводы. Проведен численный анализ процесса удара шаров диаметрами от 13,5 мм до 25 мм с дозвуковыми и транзвуковыми скоростями о воду. Построены графики изменения динамики каверны в зависимости от диаметра и начальной скорости шара. Расчеты показывают, что с увеличением начальной скорости в рассматриваемом диапазоне при одном и том же диаметре шара увеличивается глубина схлопывания каверны и уменьшается время схлопывания. Причем с увеличением диаметра шара этот эффект проявляется сильнее.

Список литературы

1. Hallquist J.O. LS-DYNA: Theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation.- Livermore, 1998. – 498 p.
2. Souli M. LS-Dyna Advanced Course in ALE and Fluid / Structural Coupling. Course Note for Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation Technique. - Livermore, LSTC, CA, 2000.
3. Ansys, customer number 602402.
4. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. - М.: Наука, 1982. - 392 с.
5. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. - 106 с.
6. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волостникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ.ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Khalajmasoumi M., Koloor S. S. R., Arefnia A., Ibrahim I. S., Mohd Yatim J. Explicit dynamic simulation of high density polyethylene beam under flexural loading condition // Applied Mechanics and Materials. - 2012. - Vols. 229-231. - P.2150-2154.
8. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. - Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. - 532 с.

Дата поступления: 19 июля 2018 г.