

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 539.4

doi: 10.17223/19988621/80/4

Моделирование взаимодействия конических ударников с подводными преградами при наличии у ударников угла атаки

Станислав Павлович Батуев¹, Алексей Сергеевич Дьячковский²,
Павел Андреевич Радченко³, Андрей Васильевич Радченко⁴,
Антон Юрьевич Саммель⁵, Андрей Владимирович Чупасhev⁶

*^{1, 3, 4} Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения РАН, Томск, Россия*

*^{2, 5, 6} Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, Томск, Россия*

¹ sbatuev@gmail.com

² Lex_Okha@mail.ru

³ pavel@radchenko.site

⁴ andrey@radchenko.site

⁵ anton_sammel@mail.ru

⁶ ChupashevAV@Gmail.com

Аннотация. С использованием математического моделирования исследуется влияние угла встречи и угла атаки на процесс взаимодействия ударников из сплава ВНЖ-95 в виде усеченных конусов с подводными преградами из алюминиевого сплава. Экспериментальная часть выполнялась на гидробаллистическом комплексе с применением высокоскоростной видеосъемки. Моделирование осуществлялось с использованием авторского программного комплекса EFES. Исследовано влияние угла атаки на процесс взаимодействия ударника с преградой. Установлено, что положительный угол атаки приводит к нормализации ударника, уменьшению эффективной толщины преграды и ее перфорации; отрицательный угол атаки, напротив, способствует рикошету ударника от преграды.

Ключевые слова: конический ударник, высокоскоростное взаимодействие, модель, деформация, удар, рикошет, угол атаки

Благодарности: Экспериментально-теоретические результаты работы получены в рамках Программы развития Томского государственного университета «Приоритет 2030». Разработка математической модели выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002.

Для цитирования: Батуев С.П., Дьячковский А.С., Радченко П.А., Радченко А.В., Саммель А.Ю., Чупашев А.В. Моделирование взаимодействия конических ударников с подводными преградами при наличии у ударников угла атаки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 39–48. doi: 10.17223/19988621/80/4

Original article

Simulation of the interaction of conical impactors having an angle of attack with underwater barriers

Stanislav P. Batuev¹, Aleksey S. D'yachkovskiy², Pavel A. Radchenko³, Andrey V. Radchenko⁴, Anton Yu. Sammel⁵, Andrey V. Chupashev⁶

^{1, 3, 4} *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

^{2, 5, 6} *Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *spbatauev@gmail.com*

² *Lex_Okha@mail.ru*

³ *pavel@radchenko.site*

⁴ *andrey@radchenko.site*

⁵ *anton_sammel@mail.ru*

⁶ *ChupashevAV@Gmail.com*

Abstract. In this paper, the effect of the angle of impact and the angle of attack on the interaction between truncated cone-shaped impactors made of BHZh-95 alloy and underwater barriers made of aluminum alloy is studied using experimental and computational methods. When such an impactor enters water, a supercavern appears around the impactor and minimizes the fluid friction. During the motion, the impactor afterbody periodically experiences impermanent contact with the walls of the supercavern, which maintains the steady motion. Note that the center of mass of the impactor is located closer to its afterbody, which can induce the angle of attack appearance during the motion. The experimental study is conducted using a hydroballistic track with high-speed video recording. The speed range of 250–350 m/s is considered. Mathematical modeling is carried out using the EFES original software package. It is revealed that a positive angle of attack $\beta \leq 10^\circ$ leads to the normalization of the impactor and a decrease in the effective thickness of the barrier with its perforation. In contrast, at a negative angle of attack, the impactor rebounds from the barrier.

Keywords: conical impactor, high-speed interaction, model, deformation, impact, rebound, angle of attack

Acknowledgments: Experimental and theoretical results of the work were obtained within the Tomsk State University Development Program “Priority 2030”. The mathematical model was developed within the state assignment for ISPMS SB RAS (project No. FWRW-2021-0002).

For citation: Batuev, S.P., D'yachkovskiy, A.S., Radchenko, P.A., Radchenko, A.V., Sammel, A.Yu., Chupashev, A.V. (2022) Simulation of the interaction of conical impactors having an angle of attack with underwater barriers. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 39–48. doi: 10.17223/19988621/80/4

Введение

Для реализации устойчивого высокоскоростного движения в воде [1–6] применяются ударники в виде усеченного конуса (рис. 1) [7]. При входе в воду такой ударник образует суперкаверну [8–11], охватывающую его, тем самым минимизируется трение о воду. Кормовая часть ударника во время его движения временно периодически контактирует со стенками суперкаверны, поддерживая устойчивый режим его движения. Отметим, что центр масс рассматриваемого ударника находится ближе к его корме, что может спровоцировать возникновение угла атаки при его движении. Если вектор скорости центра масс ударника совпадает с направлением траектории его движения, то в зависимости от угла встречи с преградой (при одной и той же скорости) происходит либо прокалывание преграды, либо рикошет [12, 13]. Если отмеченные условия взаимодействия дополняются наличием угла атаки у ударника, что обусловлено смещенным к его корме центром масс, то условия безрикошетного взаимодействия существенно усложняются. В этом случае применение математического моделирования для исследования рассматриваемых процессов является практически единственным методом корректной интерпретации и прогнозирования экспериментальных результатов.



Рис. 1. Внешний вид ударника в виде усеченного конуса
Fig. 1. Design of a truncated cone-shaped impactor

В данной работе с использованием авторского конечно-элементного программного комплекса EFES [14] и привлечением экспериментальных данных для верификации математической модели выполнены оценки величин углов атаки ударника, при которых обеспечивается безрикошетное взаимодействие суперкавитирующих ударников с преградами.

Результаты исследований

Экспериментальные исследования проводились на гидробаллистическом комплексе [15]. С помощью высокоскоростной видеосъемки фиксировался процесс взаимодействия ударника с преградой и измерялась его скорость до и после взаимодействия с преградой. Диапазон скоростей взаимодействия составил 250–350 м/с.

Численное моделирование проводилось в трехмерной постановке с использованием программного комплекса EFES. Поведение материалов ударника и преграды описывалось упругопластической моделью, в качестве критерия разрушения использовалась предельная величина интенсивности пластических деформаций [16]:

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (1)$$

где T_1, T_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций.

Верификация программного комплекса EFES проводилась при решении динамических задач различного уровня [16]. Применительно к исследуемым процессам также выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

На рис. 2, *a* ударник из ВНЖ-95 взаимодействует с преградой в воздухе со скоростью встречи 333 м/с в нормаль. После пробития преграды ударник продолжает движение, а его скорость составляет 301 м/с.

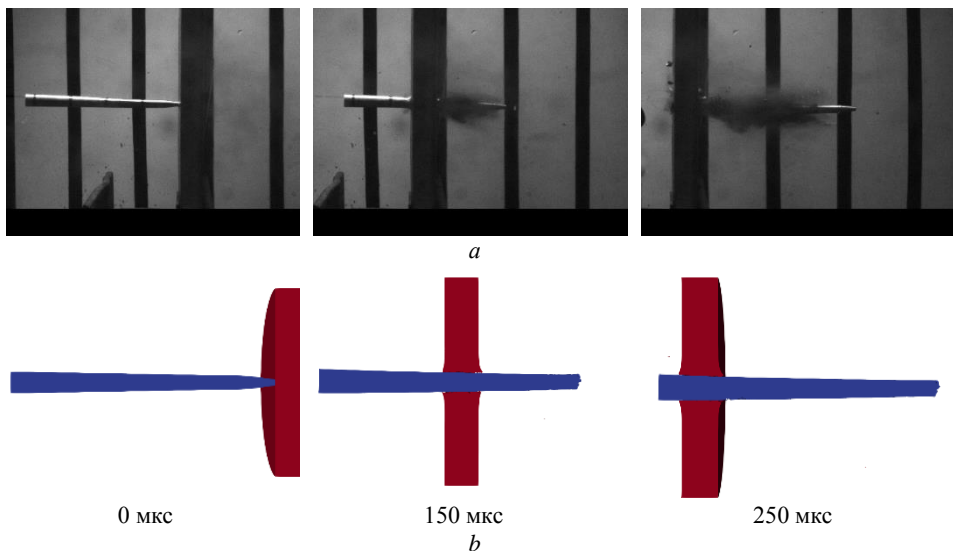


Рис. 2. Взаимодействие ударника из ВНЖ-95 с преградой на воздухе в нормаль (*a*); расчетная хронограмма взаимодействия ударника с преградой (*b*)

Fig. 2. Interaction of the impactor made of BZh-95 with a barrier in the normal direction in the air (*a*); calculated chronogram of the impactor interaction with the barrier (*b*)

Сравнение расчетных данных с результатами эксперимента показало, что, как и в эксперименте, произошло пробитие преграды. При этом расчетная скорость ударника после пробития практически совпадает с измеренной экспериментально и составляет 292 м/с.

Верифицированная математическая модель в дальнейшем использовалась для определения условий, при которых происходит рикошет ударника от преграды. В таблице приведены результаты численных экспериментов по взаимодействию ударников с преградами при различных углах α и скоростях встречи.

Результаты численного моделирования

№ расчета	Скорость встречи v_0 , м/с	Угол встречи α	Расчетная скорость после взаимодействия v_r , м/с, результат	Экспериментальная скорость после взаимодействия v_r , м/с, результат
1	333	0°	292, пробитие	301, пробитие
2	330	30°	236, пробитие	239, пробитие
3	250	30°	182, пробитие	–
4	250	45°	163, пробитие	–
6	250	50°	88, пробитие	–
7	250	55°	115, рикошет	–
8	250	60°	187, рикошет	–

Выполненные расчеты показали, что рикошет ударника происходит при $\alpha \geq 55^\circ$. Рисунки 3–5 иллюстрируют процесс взаимодействия ударников с преградой при встрече под углом. В рассматриваемом случае напряженно-деформированное состояние в ударнике несимметрично относительно продольной оси, что приводит к возникновению изгибных моментов. Наличие при этом смещенного к кормовой части ударника центра тяжести дополнительно увеличивает тенденцию к изгибу ударника.

При взаимодействии ударника с преградой под углом увеличивается эффективная толщина преграды h_{ef} , определяемая соотношением:

$$h_{ef} = h / \cos \alpha, \quad (2)$$

где h – толщина преграды.

Увеличение эффективной толщины преграды приводит к увеличению времени контакта ударника с преградой и интенсифицирует деформирование и срабатывание ударника. При $\alpha = 50^\circ$ эффективная толщина преграды увеличивается в 1.5 раза, при этом наблюдается существенное увеличение срабатывания ударника за счет эрозии и пластического деформирования по сравнению с взаимодействием под углом $\alpha = 30^\circ$.

В представленных численных экспериментах рассмотрены случаи, когда в момент начала взаимодействия ударника с преградой угол атаки $\beta = 0^\circ$. Под углом атаки будем понимать угол

$$\beta = \alpha_0 - \alpha, \quad (3)$$

где α_0 – угол между вектором скорости ударника и нормалью к преграде, α – введенный ранее угол встречи (взаимодействия).

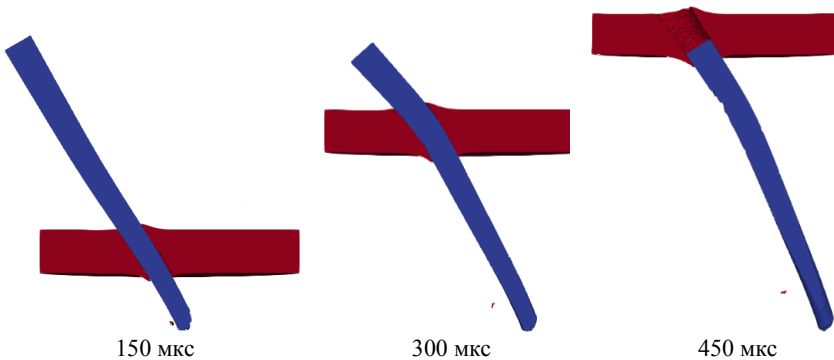


Рис. 3. Хронограмма процесса взаимодействия (сечение ZX, $v_0 = 251$ м/с, $\alpha = 30^\circ$)
 Fig. 3. Chronogram of the interaction process (section ZX, $v_0 = 251$ m/s, $\alpha = 30^\circ$)

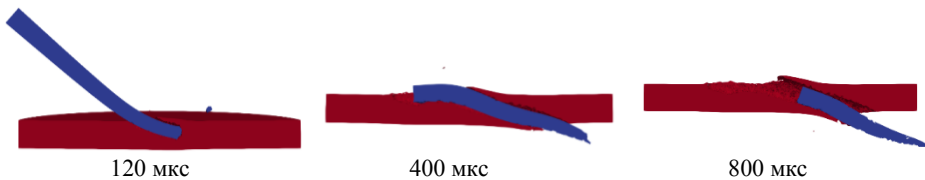


Рис. 4. Хронограмма процесса взаимодействия (сечение ZX, $v_0 = 250$ м/с, $\alpha = 50^\circ$)
 Fig. 4. Chronogram of the interaction process (section ZX, $v_0 = 250$ m/s, $\alpha = 50^\circ$)

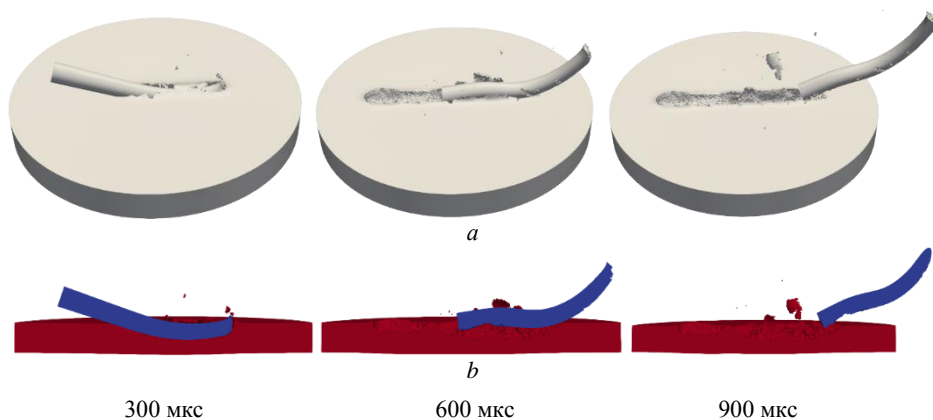


Рис. 5. Хронограмма процесса взаимодействия: *a* – в объеме, *b* – в сечении ZX ($v_0 = 250$ м/с, $\alpha = 55^\circ$)
Fig. 5. Chronogram of the interaction process: (*a*) in the volume, (*b*) in section ZX ($v_0 = 250$ m/s, $\alpha = 55^\circ$)

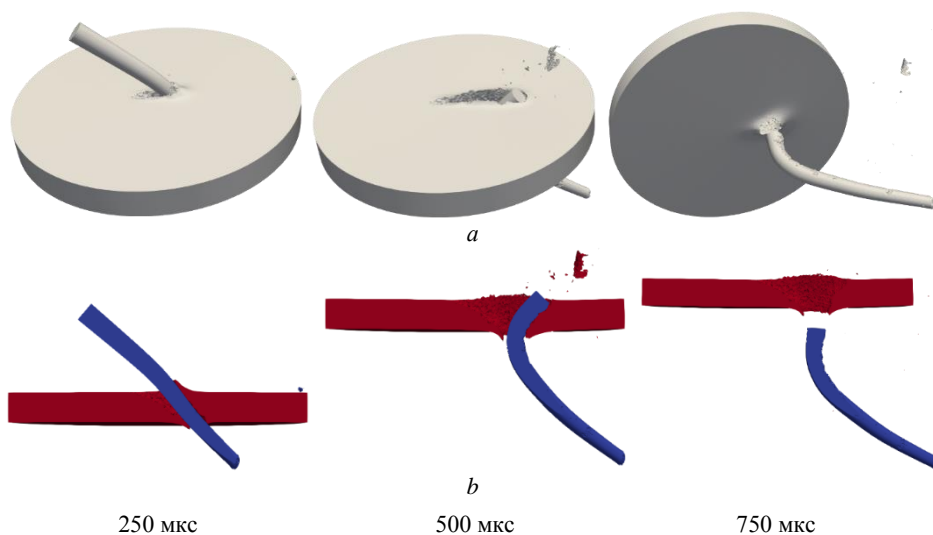


Рис. 6. Хронограмма процесса взаимодействия: *a* – в объеме, *b* – в сечении ZX ($v_0 = 250$ м/с, $\alpha = 50^\circ$, $\alpha_0 = 60^\circ$, $v_r = 93$ м/с)
Fig. 6. Chronogram of the interaction process: (*a*) in the volume, (*b*) in section ZX ($v_0 = 250$ m/s, $\alpha = 50^\circ$, $\alpha_0 = 60^\circ$, $v_r = 93$ m/s)

На рис. 6 представлена расчетная хронограмма проникания ударника для условий, когда вектор скорости не совпадает с продольной осью ударника: $\alpha = 50^\circ$, $\alpha_0 = 60^\circ$. Угол атаки при этом будет положительным: $\beta = 10^\circ$. В этом случае процесс взаимодействия ударника с преградой будет существенно отличаться от случая с $\beta = 0^\circ$ (см. рис. 4). При $\beta = 10^\circ$ наблюдается процесс нормализации ударника – угол α в процессе проникания уменьшается, что приводит к уменьшению эффективной толщины преграды, уменьшению объема разрушений в ударнике

и увеличению остаточной скорости ударника ν . Следует отметить, что кормовая часть ударника из-за смещенного к ней центра тяжести является более «тяжелой» и будет обладать большей инерцией, что усиливает тенденцию к нормализации ударника.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили определить условия возникновения рикошета удлинённого ударника в форме усеченного конуса из тяжелого сплава ВНЖ-95 при высокоскоростном взаимодействии с преградой из алюминиевого сплава. При этом установлено, что при рассмотренных кинематических и геометрических параметрах ударника и преграды положительный угол атаки $\beta \leq 10^\circ$ приводит к нормализации ударника, уменьшению эффективной толщины преграды и ее перфорации, отрицательный угол атаки, напротив, способствует рикошету ударника от преграды.

Список источников

1. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глассирования и кавитации // Труды ЦАГИ. 1980. Вып. 2052. 271 с.
2. Савченко Ю.Н., Семенов В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладная гидромеханика. 1999. Т. 73, № 1, С. 79–97.
3. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, вып. 2. С. 15–20. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/10815>
4. Фомин Н.А. Диагностика быстропротекающих процессов в механике жидкости, газа и плазмы // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 1. С. 68–80.
5. Добросельский К.Г. Применение $\rho\text{-v}$ метода для исследования течения вблизи поперечно обтекаемого цилиндра // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 3. С. 687–693.
6. Логвинович Г.В. Гидродинамика тонкого гибкого тела (оценка гидродинамики рыб) // Ученые записки ЦАГИ. 1970. Т. 1, № 2. С. 11–17.
7. Афанасьева С.А., Бондарчук И.С., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Рогов К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Экспериментально-теоретические исследования особенностей высокоскоростного движения в воде суперкавитирующих ударников, изготовленных из разных материалов // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 6. С. 1528–1537.
8. *Byoung-Kwon Ahn, Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup Lee.* Experimental investigation of supercavitating flows // Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 2012. V. 4. P. 123–131.
9. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М. –Л. : Гостехиздат, 1951. 444 с.
10. Савченко Ю.Н. Моделирование суперкавитационных процессов // Прикладна гідромеханіка. 2000. № 2 (74). С. 75–86.
11. Шахтин А.А. Численный метод расчета суперкаверн // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 2 (22). С. 105–109.
12. Герасимов А.В. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами конечной толщины: рикошет, внедрение, пробитие // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 1-1 (81). С. 140–143.
13. Бивин, Ю.К. Проникание, пробивание, рикошет // Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН / Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М. : Наука, 2015. С. 406–425.

14. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2019664836. Трехмерное моделирование деформации и разрушения гетерогенных материалов и конструкций при динамических нагрузках (EFES 2.0) / Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В., 2019.
15. Буркин В.В., Иценко А.Н., Майстренко И.В., Фуфаев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В.; Рогов К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д. заяв. 09.10.2017; Патент 2683148 РФ. Гидробаллистический стенд, опубл. 26.03.2019.
16. Radchenko P.A., Radchenko A.V., Batuev S.P. Effect of Projectile Rotation on High-Velocity Impact Fracture // *Physical Mesomechanics*. 2022. V. 25. P. 119–228. doi: 10.1134/S1029959922020035

References

1. Logvinovich G.V. (1980) Nekotorye voprosy glissirovaniya i kavitatsii [Some issues of planing and cavitation]. *Trudy TSAGI*. 2052. pp. 250–270.
2. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I. (1999) Nestatsionarnye protsessy pri superkavitatsionnom dvizhenii tel [Non-stationary processes during supercavitation motion of bodies]. *Prikladnaya gidromekhanika*. 73(1). pp. 79–97.
3. Fedorov S.V., Veldanov V.A. (2013) Determination of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Technical Physics*. 58(2). pp. 165–169. doi: 10.1134/S1063784213020072
4. Fomin N.A. (2008) Diagnostics of rapidly proceeding processes in fluid and plasma mechanics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 81(1). Article 68. pp. 68–81. doi: 10.1007/s10891-008-0010-y
5. Dobrosel'skii K.G. (2016) Use of the PIV method for investigation of motion near a cylinder in transverse flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 89(3). pp. 695–701. doi: 10.1007/s10891-016-1428-2
6. Logvinovich G.V. (1970) Gidrodinamika tonkogo gibkogo tela (Otsenka gidrodinamiki ryb) [Hydrodynamics of a thin flexible body (Assessment of fish hydrodynamics)]. *Uchenye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*. 1(2). pp. 11–17.
7. Afanas'eva S.A., Bondarchuk I.S., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Ishchenko A.N., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov A.D., Stepanov E.Ya, Chupashev A.V. (2021) Experimental and theoretical investigations of the specific features of high-velocity motion of supercavitating strikers made of various materials in water. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 94(6). pp. 1494–1503. doi: 10.1007/s10891-021-02429-z
8. Ahn B.-K., Lee T.-K., Kim H.-T., Lee Ch.-S. (2012) Experimental investigation of supercavitating flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 4(2). pp. 123–131. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0083
9. Sedov L.I. (1951) *Ploskie zadachi gidrodinamiki i aerodinamiki* [Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics]. Moscow–Leningrad: Gostekhizdat.
10. Savchenko Yu.N. (2000) Modelirovanie superkavitatsionnykh protsessov [Modeling of supercavitation processes]. *Prikladnaya gidromekhanika*. 74(2). pp. 75–86.
11. Shakhtin A.A. (2013) Chislennyy metod rascheta superkavern [Numerical method for calculating supercaverns]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 22(2). pp. 105–109.
12. Gerasimov A.V. (2014) Chislennoe modelirovanie vysokoskorostnogo vzaimodeystviya udarnikov s pregradami konechnoy tolshchiny: rikoshet, vnedrenie, probitie [Numerical simulation of high-velocity interaction of projectiles with a barrier of finite thickness: ricochet, penetration, perforation]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta – Izvestiya of Altai State University*. 81(1-1). pp. 140–143.
13. Bivin Yu.K. (2015) Pronikanie, probivanie, rikoshet [Penetration, perforation, rebound]. *Advanced Problems in Mechanics. 50 years of the Institute of Problems of Mechanics named after A.Yu. Ishlinsky RAS, Moscow*. pp. 406–425.

14. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. (2019) *Trekhmernoe modelirovanie deformatsii i razrusheniya geterogennykh materialov i konstruksiy pri dinamicheskikh nagruzkakh (EFES 2.0)* [Three-dimensional modeling of the deformation and destruction of heterogeneous materials and structures under dynamic loads (EFES 2.0)]. State registration of the software No. 2019664836.
15. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Maystrenko I.V., Fufachev V.M., D'achkovskiy A.S., Burakov V.A., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov A.D. (2019) *Gidrobalisticheskiy stend* [A hydroballistic track]. RF Patent 2683148.
16. Radchenko P.A., Radchenko A.V., Batuev S.P. (2022) Effect of projectile rotation on high-velocity impact fracture. *Physical Mesomechanics*. 25. pp. 119–228. doi: 10.1134/S1029959922020035

Сведения об авторах:

Батуев Станислав Павлович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск, Россия. E-mail: spmatuev@gmail.com

Дьячковский Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела быстропотекающих процессов Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: Lex_Okha@mail.ru

Радченко Павел Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск, Россия. E-mail: pavel@radchenko.site

Радченко Андрей Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск, Россия. E-mail: andrey@radchenko.site

Саммель Антон Юрьевич – младший научный сотрудник отдела быстропотекающих процессов Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: anton_sammel@mail.ru

Чупашев Андрей Владимирович – младший научный сотрудник отдела быстропотекающих процессов Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: ChupashevAV@Gmail.com

Information about the authors:

Batuev Stanislav P. (Candidate of Physics and Mathematics, Researcher, Laboratory of Mechanics of Heterogeneous Media, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: spmatuev@gmail.com

D'yachkovskiy Aleksey S. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Department of High-Speed Processes, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex_okha@mail.ru

Radchenko Pavel A. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Researcher, Laboratory of Mechanics of Heterogeneous Media, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: pavel@radchenko.site

Radchenko Andrey V. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Senior Official, Laboratory of Mechanics of Heterogeneous Media, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: andrey@radchenko.site

Sammel' Anton Yu. (Junior Researcher, Department of High-Speed Processes, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Chupashev Andrey V. (Junior Researcher, Department of High-Speed Processes, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: chupashevav@gmail.ru

Статья поступила в редакцию 21.07.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 21.07.2022; accepted for publication 01.12.2022