

Научная статья

УДК 539.42

doi: 10.17223/19988621/87/10

## Численное исследование высокоскоростного взаимодействия вращающихся ударников с различной формой головной части с преградой конечной толщины

Павел Андреевич Радченко<sup>1</sup>, Андрей Васильевич Радченко<sup>2</sup>,  
Станислав Павлович Батуев<sup>3</sup>

*<sup>1, 2, 3</sup> Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения РАН, Томск, Россия*

*<sup>1</sup> pavel@ispms.ru*

*<sup>2</sup> andrey@ispms.ru*

*<sup>3</sup> spbatuev@gmail.com*

**Аннотация.** Исследуется влияние вращения ударников на процесс их взаимодействия с преградой при высокоскоростном ударе. Рассмотрены различные типы головных частей ударников. Частота вращения варьировала от 0 до 10 000 об/с. Рассмотрен диапазон углов взаимодействия от 0 до 75°. Показано, что отличия в проникании вращающегося и невращающегося ударника обусловлены наличием во вращающемся ударнике напряженно-деформированного состояния, вызванного вращательным движением. Определены условия возникновения рикошета ударников для различных углов взаимодействия, скоростей вращения и форм головной части.

**Ключевые слова:** разрушение, деформация, удар, рикошет, вращение

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00407, <https://rscf.ru/project/22-21-00407>

**Для цитирования:** Радченко П.А., Радченко А.В., Батуев С.П. Численное исследование высокоскоростного взаимодействия вращающихся ударников с различной формой головной части с преградой конечной толщины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 87. С. 120–134. doi: 10.17223/19988621/87/10

Original article

## A numerical study of the high-velocity interaction of rotating strikers having different head shapes with a barrier of finite thickness

Pavel A. Radchenko<sup>1</sup>, Andrey V. Radchenko<sup>2</sup>, Stanislav P. Batuev<sup>3</sup>

*<sup>1, 2, 3</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of RAS,  
Tomsk, Russian Federation*

*<sup>1</sup> pavel@ispms.ru*

<sup>2</sup> andrey@ispms.ru

<sup>3</sup> spbatuev@gmail.com

**Abstract.** Numerical simulation methods are used to study the effect of rotation of cylindrical strikers made of high-strength steel on the high-velocity interaction with a steel barrier. Three types of striker head shapes are considered: ogival, hemispherical, and flat. The initial velocity of the striker is 1000 m/s, and the rotation frequency varies from 0 to 10000 revolutions per second. The striker–barrier interaction angle varies from 0° to 75°. The modeling is carried out in a three-dimensional formulation using the author’s EFES 2.0 software package. This allows the simulation of the fragmentation of interacting bodies with the formation of new contact and free surfaces, as well as the erosion of materials. The obtained results show that the difference in the penetrating power of rotating and non-rotating strikers is due to the presence of a stress–strain state in the rotating striker caused by rotational motion. The effect of the rotation of the striker on its penetrating power is studied. The conditions for the striker ricochet are determined for various striker–barrier interaction angles, rotation velocities, and head part shapes.

**Keywords:** destruction, deformation, impact, ricochet, rotation

**Acknowledgments:** This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-21-00407), <https://rscf.ru/project/22-21-00407>

**For citation:** Radchenko, P.A., Radchenko, A.V., Batuev, S.P. (2024) A numerical study of the high-velocity interaction of rotating strikers having different head shapes with a barrier of finite thickness. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 87. pp. 120–134. doi: 10.17223/19988621/87/10

## Введение

Представленные ранее результаты [1] показали, что вращение ударника оказывает влияние на процесс его взаимодействия с преградой. Вместе с тем систематические исследования влияния вращения ударника на динамику процесса взаимодействия и разрушения материалов отсутствуют. Это отчасти связано с предположением, что при взаимодействии вращающегося ударника основное влияние будет оказывать трение. Но проведенные Джозефом Краффтом эксперименты по исследованию проникающей способности вращающихся и невращающихся ударников показали, что вклад трения несуществен: для низкоскоростного взаимодействия он не превышает 3–4%, а при высокоскоростном ударе менее 1% [2]. В дальнейшем, основываясь на выводах работы [2], влиянием вращения на процесс проникания ударников в преграды пренебрегали [3], и влияние вращения не исследовалось. Кстати, эти результаты явились обоснованием использования условия идеального скольжения на контактной поверхности между ударником и преградой при математическом и численном моделировании процессов ударного взаимодействия твердых тел.

Влиянию геометрических параметров взаимодействия ударника с преградой (форма головной части ударника, угол взаимодействия, толщина преграды и т.п.) посвящено достаточно много как экспериментальных, так аналитических и численных исследований. Можно выделить ряд работ, отражающих основные направления исследований [3–14]. В работе [14] экспериментально исследуется нормаль-

ное внедрение жестких ударников с конической и с полусферической формами головной части в преграды из мягкой низкоуглеродистой стали со скоростями до 600 м/с. Полученные результаты свидетельствуют, что форма головной части при рассмотренных условиях не оказывает существенного влияния на глубину кратера в преграде. Аналогичный вывод содержится и в работе [9] для случая нормального внедрения ударника в преграду.

Данная работа посвящена подробному анализу влияния вращательного движения ударника и геометрии его головной части на кинематику взаимодействия и разрушение материалов.

### Основные уравнения математической модели

Задача решается в трехмерной адиабатической постановке. В произвольной системе координат  $x^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) система уравнений включает следующие уравнения [1, 9]:

– неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla_i v^i = 0; \quad (1)$$

– движения

$$\rho a^k = \nabla_i \sigma^{ik} + F^k, \quad (2)$$

где  $a^k = \frac{\partial v^k}{\partial t} + v^i \nabla_i v^k$ ,  $\nabla_i \sigma^{ik} = \sigma_{,i}^{ik} + \Gamma_{im}^k \sigma^{im} + \Gamma_{im}^m \sigma^{ik}$ ;

– энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma^{ij} e_{ij}. \quad (3)$$

Здесь  $F^k$  – компоненты вектора массовых сил;  $\Gamma_{ij}^k$  – символы Кристоффеля;  $\sigma^{ij}$  – контравариантные компоненты симметричного тензора напряжений;  $E$  – удельная внутренняя энергия;  $\rho$  – плотность среды;  $v^i$  – компоненты вектора скорости;  $e_{ij}$  – компоненты симметричного тензора скоростей деформаций:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i).$$

Тензор напряжений представляется в виде суммы девиаторной  $S^{ki}$  и шаровой части (давления)  $P$ :

$$\sigma^{ij} = -P g^{ij} + S^{ij}, \quad (4)$$

где  $g^{ij}$  – метрический тензор.

Шаровая часть тензора напряжений (давление) определяется уравнением Ми-Грюнайзена:

$$P = \sum_{n=1}^3 K_n \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right)^n + K_0 \rho E, \quad (5)$$

где  $K_0, K_1, K_2, K_3$  – константы материала,  $V_0$  – начальный удельный объем,  $V$  – текущий удельный объем.

Связь компонент тензора скоростей деформаций и дивергента имеет вид:

$$2G \left( g^{im} g^{jk} e_{mk} - \frac{1}{3} g^{mk} e_{mk} g^{ij} \right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij}, \quad (\lambda \geq 0). \quad (7)$$

Влияние поворота на напряженно-деформированное состояние (НДС) описывается коротационной производной Яуманна

$$\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - g^{im} \omega_{mk} S^{kj} - g^{jm} \omega_{mk} S^{ik},$$

где  $\omega_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j - \nabla_j v_i)$ ,  $G$  – модуль сдвига.

Материал ведет себя упруго ( $\lambda = 0$ ), если выполняется условие Мизеса

$$S^{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} \sigma_d^2, \quad (8)$$

и пластически ( $\lambda > 0$ ), если оно нарушается,  $\sigma_d$  – динамический предел текучести.

Для описания разрушения используется предельная величина интенсивности пластических деформаций

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (9)$$

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

### Постановка задачи

Исследуется как нормальное ( $\alpha = 0^\circ$ ), так и косое ( $\alpha \neq 0^\circ$ ) взаимодействие цилиндрических стальных ударников с различной формой головной части: оживальной (рис. 1, *a*), полусферической (рис. 1, *b*) и плоской (рис. 1, *c*), со стальной преградой. Процесс удара рассматривается в декартовой системе координат  $XYZ$  ( $x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z, \Gamma_{ij}^k = 0, \sigma^{ij} = \sigma_{ij}, g^{ij} = \delta_{ij}, \delta_{ij}$  – символ Кронеккера,  $i, j = 1, 2, 3$ ).

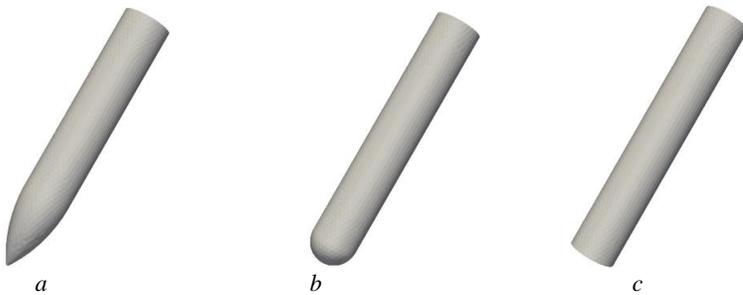
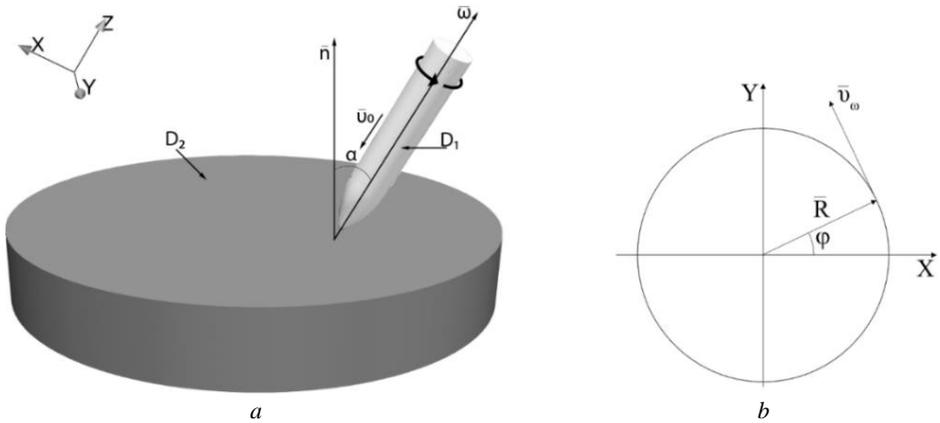


Рис. 1. Типы исследуемых ударников  
Fig. 1. Design of the strikers under study

В момент времени  $t = 0$  ось симметрии ударника совпадает с  $Z$  (рис. 2, *a*), вектором скорости ударника  $\mathbf{v}_0$  и образует с нормалью к преграде угол  $\alpha$ . Помимо поступательного движения с скоростью  $\mathbf{v}_0$ , ударник вращается вокруг своей оси с начальной угловой скоростью  $|\boldsymbol{\omega}_0| = 2\pi\nu$ , где  $\nu$  – частота вращения, показыва-

ющая количество оборотов ударника в секунду (об/с). Линейную скорость вращательного движения точек ударника определим из векторного произведения  $\mathbf{v}_\omega = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ , где  $\mathbf{R}$  – радиус-вектор точки. Проекции вектора скорости  $\mathbf{v}_\omega$  на оси  $X$  и  $Y$  определяются соотношениями  $v_\omega^1 = |\mathbf{v}_\omega| \sin \varphi$  и  $v_\omega^2 = |\mathbf{v}_\omega| \cos \varphi$  соответственно (рис. 2, *b*). Проекция  $\mathbf{v}_\omega$  на ось  $Z$  будет равна нулю:  $v_\omega^3 = 0$ .



**Рис. 2.** Постановка задачи  
**Fig. 2.** Formulation of the problem

Начальные условия ( $t = 0$ ):

$$\sigma_{ij} = P = E = 0 \text{ при } (x^i) \in D_1 \cup D_2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (10)$$

$$v^1 = |\mathbf{v}_\omega| \sin \varphi, \quad v^2 = |\mathbf{v}_\omega| \cos \varphi, \quad v^3 = -|\mathbf{v}_0|, \text{ при } (x^i) \in D_1, \quad i = 1, 2, 3, \quad (11)$$

$$v^i = 0 \text{ при } (x^i) \in D_2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (12)$$

$$\rho = \rho_i \text{ при } (x^i) \in D_k, \quad i = 1, 2, 3; \quad k = 1, 2. \quad (13)$$

Граничные условия:

– на контактной поверхности между ударником и преградой реализовано условие скольжения без трения

$$T_{mn}^+ = T_{mn}^-, \quad T_{nr}^+ = T_{nr}^- = T_{ns}^+ = T_{ns}^- = 0, \quad v_n^+ = v_n^-, \quad (14)$$

– на свободных поверхностях задано условие отсутствия напряжений

$$T_{mn} = T_{ns} = T_{nr} = 0. \quad (15)$$

Здесь  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке,  $\boldsymbol{\tau}$  и  $\mathbf{s}$  – взаимно перпендикулярные единичные векторы в плоскости, касательной к поверхности в этой точке,  $\mathbf{T}_n$  – вектор силы на площадке с нормалью  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости. Нижние индексы у векторов  $\mathbf{T}_n$  и  $\mathbf{v}$  означают проекции на соответствующие векторы базиса; знак «+» характеризует значение параметров в ударнике, знак «-» в преграде. Система уравнений (1)–(9) совместно с начальными и граничными условиями (10)–(15) полностью определяет краевую задачу.

Материал ударника – высокопрочная сталь плотностью  $\rho_0 = 8020 \text{ кг/м}^3$  с динамическим пределом текучести  $\sigma_d = 1.72 \text{ ГПа}$ . Диаметр ударника  $D = 25.4 \text{ мм}$ ,

длина  $L = 142.9$  мм,  $L/D = 5.65$ . Материал преграды – сталь плотностью  $\rho_0 = 7850$  кг/м<sup>3</sup> и динамическим пределом текучести  $\sigma_d = 1.01$  ГПа. Толщина преграды  $h = 50$  мм, диаметр 350 мм. Начальная скорость ударника в расчетах составляла  $|v_0| = 1000$  м/с, частота вращения  $\nu = 0 \div 10000$  об/с. Рассмотрен диапазон углов взаимодействия  $\alpha = 0 \div 75^\circ$ . Для численного решения задачи используется авторский программный 3D комплекс EFES 2.0 [1].

### Результаты численных исследований

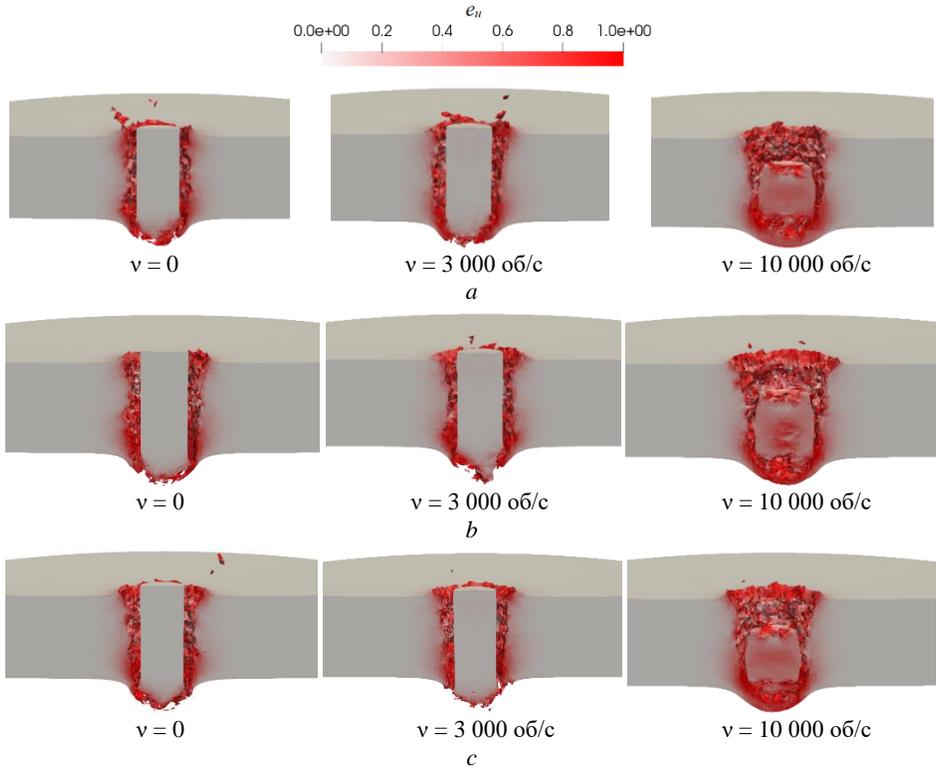
Предложенная модель поведения материала и реализующие ее численные алгоритмы были протестированы сравнением с экспериментальными данными, которые подтвердили адекватность численных результатов [1, 15, 16].

На рис. 3 в сечении ZX представлены конфигурации ударников с различной формой головной части, преграды и распределение интенсивности пластической деформации (9) при нормальном ударе в момент времени 150 мкс после начала взаимодействия. В этом случае для всех типов ударников наблюдается перфорация преграды. Наибольшие значения интенсивности пластической деформации в преграде локализованы на контактной поверхности с ударником и боковой поверхности кратера, переходящего в процессе взаимодействия в сквозное отверстие. В ударнике при  $\nu = 0$  и  $\nu = 3000$  об/с максимальные значения интенсивности пластической деформации локализованы в головной части ударника в зоне контакта с материалом преграды, при этом на боковой поверхности ударника и во внутренней области ударника уровень  $e_{ii}$  невысокий. При частоте вращения  $\nu = 10000$  об/с за счет увеличения центробежной силы наблюдаются увеличение диаметра деформирующегося ударника и, как следствие, увеличение диаметра отверстия в преграде.

В невращающемся ударнике НДС возникает только в результате его взаимодействия с преградой, во вращающемся ударнике дополнительно возникает НДС, вызванное его вращением вокруг своей оси, в этом случае в ударнике возникают как нормальные растягивающие напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$ , вызванные действием центробежной силы на материал ударника, так и сдвиговые напряжения  $\sigma_{xy}$ , возникающие за счет градиента линейной скорости материала ударника вдоль его радиуса (рис. 4). Таким образом, в момент взаимодействия с преградой во вращающемся ударнике уже существует ненулевое поле напряжений, интенсивность которого будет определяться частотой вращения ударника. Максимальные значения напряжений, вызванных вращательным движением ударника, локализованы вблизи боковой поверхности. Особенно это характерно для сдвиговых напряжений (см. рис. 4, b).

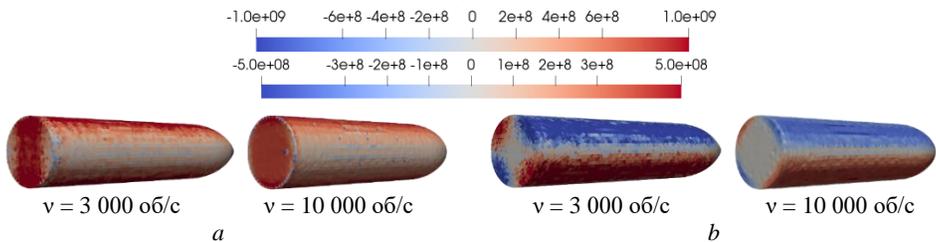
В табл. 1 представлены значения остаточной длины ударников и их остаточной скорости после перфорации преграды при нормальном ударе. Для всех рассмотренных форм головной части наблюдается уменьшение остаточной длины ударника с увеличением скорости его вращения. Это обусловлено интенсификацией пластического деформирования и эрозионного разрушения ударника в результате его вращения. Остаточная длина ударников при  $\nu = 10000$  об/с составляет от 13 до 16%. Остаточная скорость ударника с оживальной головной частью с увеличением скорости вращения уменьшается, для ударников с полусферической и плоской формой головной части, напротив, остаточная скорость ударника

с ростом частоты вращения увеличивается. Это связано с двумя факторами: увеличением областей пластического течения и разрушения в преграде за счет большей площади контактной зоны, обусловленной формой ударников, и большей кинетической энергией ударников с полусферической и плоской формой головной части: их массы на 11 и 14% соответственно больше массы оживальной ударника.



**Рис. 3.** Конфигурации ударников и преграды, распределение интенсивности пластической деформации (сечение ZX,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $t = 150 \mu\text{с}$ ): *a* – оживальная головная часть, *b* – полусферическая головная часть, *c* – плоская головная часть

**Fig. 3.** Distribution of plastic deformation intensity in the barrier for different design of strikers (ZX-section,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $t = 150 \mu\text{s}$ ): (*a*) ogival-headed, (*b*) hemispherical-headed, and (*c*) flat-headed



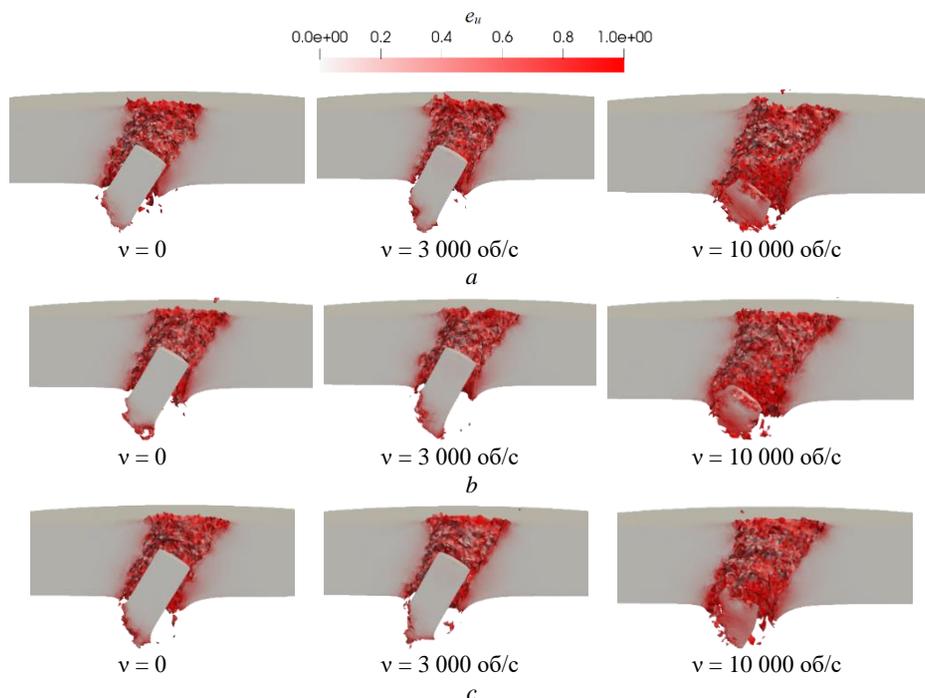
**Рис. 4.** Распределение в ударнике нормальной и сдвиговой компонент напряжения в Па при  $t = 1 \mu\text{с}$ : *a* –  $\sigma_{xx}$ , *b* –  $\sigma_{xy}$

**Fig. 4.** Distribution of normal and shear stress components along the striker in Pa at  $t = 1 \mu\text{s}$ : (*a*)  $\sigma_{xx}$  and (*b*)  $\sigma_{xy}$ ,

Итоговые значения параметров взаимодействия для  $\alpha = 0^\circ$ 

Форма головной части	Частота вращения $v$ , об/с	Остаточная длина ударника $l_r$ , мм / %	Остаточная скорость ударника $v_r$ , М/с	Результат взаимодействия
Оживало	0	53 / 37	806	Перфорация
	3 000	51 / 36	804	Перфорация
	10 000	18 / 13	781	Перфорация
Полусфера	0	59 / 41	810	Перфорация
	3 000	58 / 40.6	817	Перфорация
	10 000	23 / 16	852	Перфорация
Плоскость	0	63 / 44	816	Перфорация
	3 000	63 / 44	835	Перфорация
	10 000	22 / 15	857	Перфорация

На рис. 5 приведены конфигурации ударников и преграды и распределение интенсивности пластической деформации для угла взаимодействия  $\alpha = 30^\circ$  в момент времени 200 мкс. В этом случае так же, как и при нормальном ударе, происходит перфорация преграды для всех типов ударников. При ударе под углом увеличивается эффективная толщина преграды  $h_{ef}$ , определяемая соотношением  $h_{ef} = h/\cos\alpha$ , что приводит к большей потере скорости ударника (табл. 2).



**Рис. 5.** Конфигурации ударников и преграды, распределение интенсивности пластической деформации (сечение ZX,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $t = 200$  мкс): *a* – оживальная головная часть, *b* – полусферическая головная часть, *c* – плоская головная часть

**Fig. 5.** Distribution of plastic deformation intensity in the barrier for different design of strikers (ZX-section,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $t = 200$   $\mu$ s): (a) ogival-headed, (b) hemispherical-headed, and (c) flat-headed

Итоговые значения параметров взаимодействия для  $\alpha = 30^\circ$

Форма головной части	Частота вращения $v$ , об/с	Остаточная длина ударника $l_r$ , мм / %	Остаточная скорость ударника $v_r$ , м/с	Результат взаимодействия
Оживало	0	51 / 36	770	Перфорация
	3 000	49 / 34	769	Перфорация
	10 000	13 / 9	704	Перфорация
Полусфера	0	59 / 41	776	Перфорация
	3 000	58 / 40.5	764	Перфорация
	10 000	23 / 16	754	Перфорация
Плоскость	0	64 / 45	778	Перфорация
	3 000	63 / 44	790	Перфорация
	10 000	22 / 15	813	Перфорация

Увеличение угла взаимодействия до  $\alpha = 60^\circ$  приводит к тому, что перфорация преграды происходит не для всех типов рассматриваемых ударников и скоростей вращения (рис. 6). Так, для оживального ударника перфорация преграды происходит только когда отсутствует вращение ударника ( $v = 0$ ). В случае вращающегося ударника происходит торможение ударника в преграде без сквозного пробития (см. рис. 6, а).

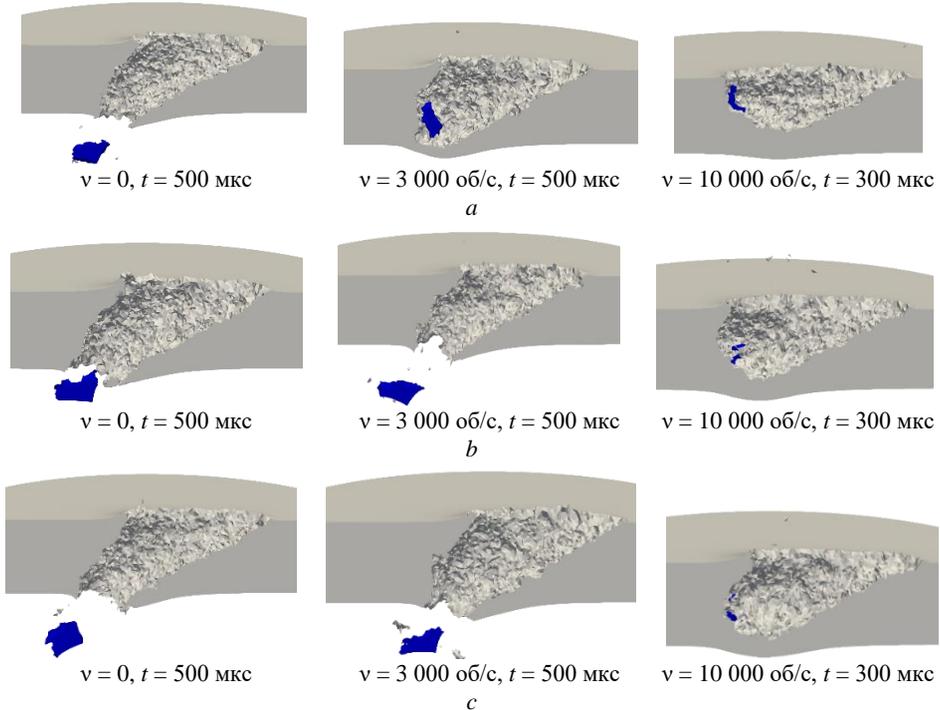


Рис. 6. Конфигурации ударников и преграды (сечение ZX,  $\alpha = 60^\circ$ ): а – оживальная головная часть, б – полусферическая головная часть, с – плоская головная часть  
 Fig. 6. Configuration of the barrier with different design of strikers (ZX-section,  $\alpha = 60^\circ$ ): (a) ogival-headed, (b) hemispherical-headed, and (c) flat-headed

Для ударников с полусферической и плоской формой головной части сквозное пробитие преграды происходит в случае отсутствия вращения ударника и для частоты вращения  $\nu = 3\ 000$  об/с; при  $\nu = 10\ 000$  об/с (см. рис. 6, *b*, *c*) наблюдается торможение ударников. В табл. 3 приведены значения интегральных параметров, характеризующих процесс взаимодействия ударников с преградой при ударе под углом  $\alpha = 60^\circ$ . В данном случае эффективная толщина преграды увеличивается в два раза, что увеличивает время взаимодействия ударника с преградой и приводит к большему разрушению ударника. Так, при  $\nu = 10\ 000$  об/с происходит практически полное срабатывание ударников.

Таблица 3

Итоговые значения параметров взаимодействия для  $\alpha = 60^\circ$

Форма головной части	Частота вращения $\nu$ , об/с	Остаточная длина ударника $l_r$ , мм / %	Остаточная скорость ударника $v_r$ , м/с	Глубина кратера в преграде $h$ , мм	Результат взаимодействия
Оживало	0	14 / 10	290	–	Перфорация
	3 000	8 / 5	–	50	Кратер
	10 000	–	–	34	Кратер
Полусфера	0	14 / 10	347	–	Перфорация
	3 000	15 / 12	378	–	Перфорация
	10 000	–	–	40	Кратер
Плоскость	0	13 / 9	408	–	Перфорация
	30 00	12 / 8	389	–	Перфорация
	10 000	–	–	45	Кратер

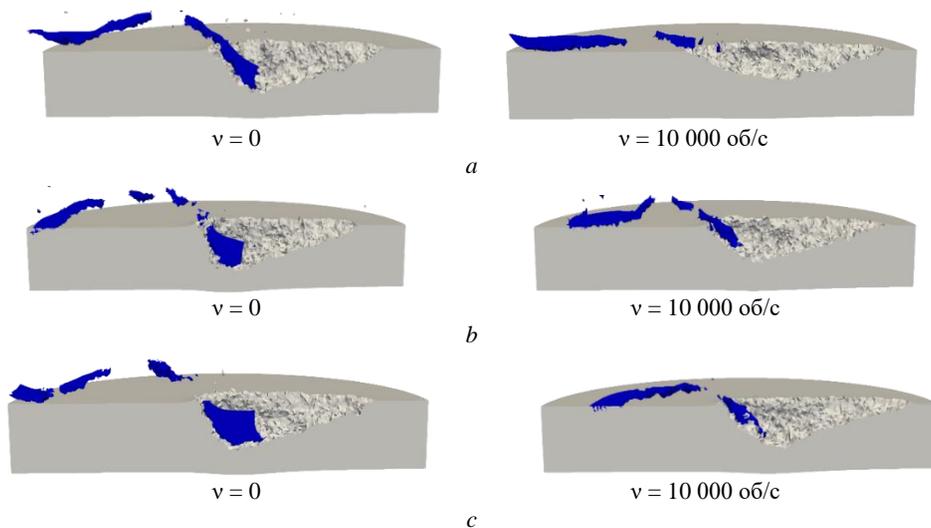


Рис. 7. Конфигурации ударников и преграды (сечение ZX,  $\alpha = 70^\circ$ ,  $t = 250$  мкс): *a* – оживальная головная часть, *b* – полусферическая головная часть, *c* – плоская головная часть

Fig. 7. Configuration of the barrier with different design of strikers (ZX-section,  $\alpha = 70^\circ$ ,  $t = 250$   $\mu$ s): (*a*) ogival-headed, (*b*) hemispherical-headed, and (*c*) flat-headed

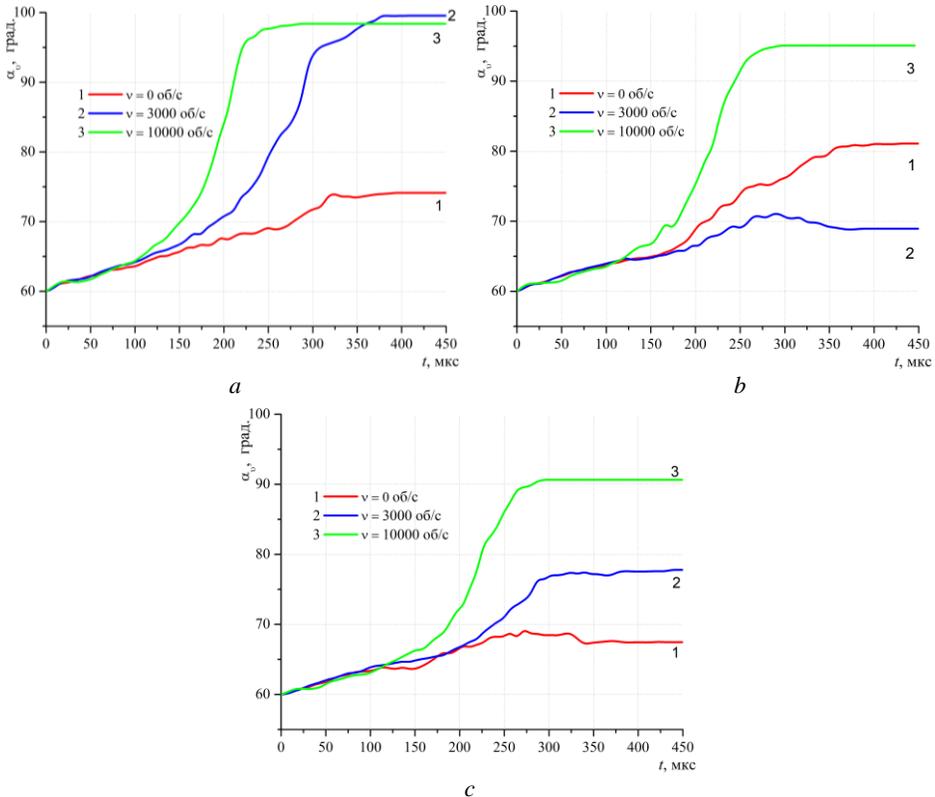
При угле взаимодействия  $\alpha = 70^\circ$  происходит рикошет всех типов ударников как в случае отсутствия вращения ударника, так и при его вращении. На рис. 7 представлены конфигурации невращающихся ударников и вращающихся с ча-

стойкой  $v = 10\,000$  об/с. В данном случае происходит фрагментация ударников с образованием осколков различных размеров, а в преграде формируются кратеры, протяженные вдоль оси  $X$ .

Таблица 4

Глубины кратеров в преграде для  $\alpha = 70^\circ$

Форма головной части	$v$ , об/с	Глубина кратера в преграде, $h$ , мм	Результат взаимодействия
Оживало	0	33	Рикошет
	3 000	32	Рикошет
	10 000	25	Рикошет
Полусфера	0	40	Рикошет
	3 000	36	Рикошет
	10 000	29	Рикошет
Плоскость	0	40	Рикошет
	3 000	35	Рикошет
	10 000	33	Рикошет



**Рис. 8.** Изменение во времени угла между вектором скорости центра масс ударника и нормалью к преграде для различных форм головной части ударника: *a* – оживальная, *b* – полусферическая, *c* – плоская

**Fig. 8.** Time variation of the angle between the velocity vector of the striker's center of mass and the normal to the barrier for different striker head shapes: (*a*) ogival, (*b*) hemispherical, and (*c*) flat

В табл. 4 приведены значения глубин кратеров, образованных ударниками в преграде при ударе под углом  $\alpha = 70^\circ$ . Для всех типов ударников наблюдается уменьшение глубины кратера с увеличением скорости вращения. При частоте вращения ударника  $\nu = 10\,000$  об/с глубина кратера в преграде для оживального ударника по сравнению с невращающимся ударником уменьшается на 24%, для ударников с полусферической и плоской головной частью на 28 и 18% соответственно.

Влияние вращения ударника на процесс взаимодействия ударников с преградой иллюстрируют графики изменения во времени угла между вектором скорости центра масс внедряющегося ударника  $\alpha_0$  и нормалью к преграде  $\mathbf{n}$  для угла взаимодействия  $\alpha = 60^\circ$ , приведенные на рис. 8. С течением времени значение  $\alpha_0$  увеличивается для всех типов ударника. Если значения  $\alpha_0 \geq 90^\circ$ , то это свидетельствует о рикошете ударника от преграды. Так, для оживального ударника для скоростей вращения  $\nu = 3\,000$  об/с и  $\nu = 10\,000$  об/с значения  $\alpha_0 = 90^\circ$  достигаются в 300 и 210 мкс соответственно (см. рис. 8, *a* кривые 2, 3). Для ударников с полусферической и плоской головной частью значения  $\alpha_0 = 90^\circ$  достигаются только для частоты вращения  $\nu = 10\,000$  об/с (см. рис. 8, *b, c*, кривые 3). Характер кривых 3 для всех типов ударников одинаков, но для оживального ударника момент времени, когда начинается резкий рост  $\alpha_0$ , наступает раньше, при  $t = 100$  мкс, для ударников с полусферической и плоской формой головной части это происходит в 125 и 140 мкс соответственно. Для оживального ударника значения частот вращения  $\nu \geq 3\,000$  об/с при угле взаимодействия  $\alpha = 60^\circ$  приводят к рикошету ударника.

### Заключение

Проведенные параметрические исследования показали:

1. При вращении ударника в нем формируется напряженно-деформированное состояние, влияющее как на разрушение ударника и преграды, так и на кинематические параметры процесса взаимодействия.
2. Увеличение скорости вращения приводит к увеличению объема материала, находящегося в пластическом состоянии, и, как следствие, интенсификации эрозионного разрушения и срабатывания ударника.
3. Рикошет вращающегося ударника для рассмотренного соотношения физико-механических свойств материалов ударника и преграды зависит от формы головной части и может происходить при меньших углах взаимодействия, причем для ударника с оживальной формой головной части эта закономерность выражена наиболее ярко.

### Список источников

1. 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
2. Krafft J.M. Surface Friction in Ballistic Penetration // Journal of Applied Physics. 1955. V. 26, № 10. P. 1248–1253. doi: 10.1063/1.1721884
3. Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets // Int. J Impact Eng. 1999. V. 22. P. 95–395. doi: 10.1016/s0734-743x(98)00031-1

4. Gupta N.K., Madhu V. Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates // *Int. J Impact Eng.* 1992. V. 12, № 3. P. 333–343. doi: 10.1016/0734-743X(92)90101-X
5. Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets // *Int. J. Impact Eng.* 2014. V. 69. P. 39–54. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.010
6. Seidt J.D., Pereira J.M., Gilat A., Revilock D.M., Nandwana K. Ballistic impact of anisotropic 2024 aluminum sheet and plate // *Int. J. Impact Eng.* 2013. V. 62. P. 27–34. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.06.001
7. Børvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Malo K.A. Ballistic penetration of steel plates // *Int. J. Impact Eng.* 1999. V. 22. P. 855–886. doi: 10.1016/S0734-743X(99)00011-1
8. Iqbal M.A., Senthil K., Madhu V., Gupta N.K. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles // *Int. J. Impact Eng.* 2017. V. 110. P. 26–38. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011
9. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. The influence of steel projectile shape on its fracture at high strain rates // *Russian Physics Journal.* 2021. V. 64, № 5. P. 811–819. doi: 10.1007/s11182-021-02396-1
10. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. Impact resistance of ceramics in a numerical experiment // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2020. V. 61 (5). P. 847–854. doi: 10.1134/S002189442005020X
11. Баничук Н.В., Иванова С.Ю. Оптимизация формы затупленных осесимметричных тел, движущихся поступательно с вращением в упругопластической среде // *Проблемы прочности пластичности.* 2015. Т. 77, № 4. С. 367–378.
12. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Афанасьева С.А., Югов А.А., Архипов И.Н., Федосов О.Ю. Исследование особенностей ударного взаимодействия длинных стержней с пространственно-разнесенными защитными конструкциями // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика.* 2010. № 3. С. 77–87.
13. Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф., Тырышкин И.М. Анализ эффективности противоударной стойкости двух групп керамических и композитных материалов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика.* 2022. № 80. С. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
14. Голубев В.К., Медведкин В.А. О внедрении жесткого снаряда в толстую стальную преграду при умеренных скоростях удара // *Проблемы прочности.* 2001. № 4. С. 138–146.
15. 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
16. Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Радченко А.В., Радченко П.А., Саммель А.Ю., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Экспериментально-теоретические исследования взаимодействия суперкавитирующих ударников с подводными разнесенными преградами // *Известия вузов. Физика.* 2023. Т. 66, № 2. С. 113–117. doi: 10.17223/00213411/66/2/113.

### References

1. 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
2. Krafft J.M. (1955) Surface friction in ballistic penetration. *Journal of Applied Physics.* 26(10). pp. 1248–1253. doi: 10.1063/1.1721884
3. Goldsmith W. (1999) Non-ideal projectile impact on targets. *International Journal of Impact Engineering.* 22. pp. 95–395. doi: 10.1016/s0734-743x(98)00031-1

4. Gupta N.K., Madhu V. (1992) Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates. *International Journal of Impact Engineering*. 12(3). pp. 333–343. doi: 10.1016/0734-743X(92)90101-X
5. Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. (2014) Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *International Journal of Impact Engineering*. 69. pp. 39–54. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.010
6. Seidt J.D., Pereira J.M., Gilat A., Revilock D.M., Nandwana K. (2013) Ballistic impact of anisotropic 2024 aluminum sheet and plate. *International Journal of Impact Engineering*. 62. pp. 27–34. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.06.001
7. Børvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Malo K.A. (1999) Ballistic penetration of steel plates. *International Journal of Impact Engineering*. 22. pp. 855–886. doi: 10.1016/S0734-743X(99)00011-1
8. Iqbal M.A., Senthil K., Madhu V., Gupta N.K. (2017) Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 110. pp. 26–38. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011
9. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. (2021) The influence of steel projectile shape on its fracture at high strain rates. *Russian Physics Journal*. 64(5). pp. 811–819. doi: 10.1007/s11182-021-02396-1
10. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. (2020) Impact resistance of ceramics in a numerical experiment. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 61(5). pp. 847–854. doi: 10.1134/S002189442005020X
11. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu. (2015) Optimizatsiya formy zatuplennykh osesimmetrichnykh tel, dvizhushchikhsya postupatel'no s vrashcheniem v uprugoplasticheskoy srede [Optimization of the shape of blunt axisymmetric bodies moving translationally with rotation in an elastic-plastic medium]. *Problemy prochnosti plastichnosti – Problems of Strength and Plasticity*. 77(4). pp. 367–378.
12. Belov N.N., Yugov N.T., Afanas'eva S.A., Yugov A.A., Arkhipov I.N., Fedosov O.Yu. (2010) Issledovanie osobennostey udarnogo vzaimodeystviya dlinnykh sterzhney s prostanstvenno-raznesennymi zashchitnymi konstruktivnymi [Investigation of the features of impact interaction of long rods with spatially spaced protective structures]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 3(11). pp. 77–87.
13. Zelepugin S.A., Tolkachev V.F., Tyryshkin I.M. (2022) Analiz effektivnosti protivoudarnoy stoykosti dvukh grupp keramicheskikh i kompozitnykh materialov [Analysis of impact resistance for two groups of ceramic and composite materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
14. Golubev V.K., Medvedkin V.A. (2001) O vnedrenii zhestkogo snaryada v tolstuyu stal'nyuyu pregradu pri umerennykh skorostyakh udara [On the penetration of a rigid projectile into a thick steel barrier at moderate impact velocities]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*. 4. pp. 138–146.
15. Batuev S.P., D'yachkovskiy A.S., Radchenko P.A., Radchenko A.V., Sammel' A.Yu., Chupashev A.V. (2022) Modelirovanie vzaimodeystviya konicheskikh udarnikov s podvodnymi pregradami pri nalichii u udarnikov ugla ataki [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
16. Batuev S.P., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Radchenko A.V., Radchenko P.A., Sammel' A.Yu., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2023) Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya vzaimodeystviya superkavitiruyushchikh udarnikov s podvodnymi raznesennymi pregradami [Experimental and theoretical studies of the interaction of

supercavitating projectiles with underwater spaced barriers]. *Izvestiya vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*. 66(2). pp. 113–117. doi: 10.17223/00213411/66/2/113

**Сведения об авторах:**

**Радченко Павел Андреевич** – доктор физико-математических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия. E-mail: pavel@ispms.ru

**Радченко Андрей Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия. E-mail: andrey@ispms.ru

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

**Information about the authors:**

**Radchenko Pavel A.** (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: pavel@ispms.ru

**Radchenko Andrey V.** (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: andrey@ispms.ru

**Batuev Stanislav P.** (Candidate of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russian Federation). E-mail: spbatuev@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 10.04.2023; принята к публикации 12.02.2024*

*The article was submitted 10.04.2023; accepted for publication 12.02.2024*