

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/89/5

Оценка влияния ведущих поясков на взаимодействие удлиненных ударников с легкосплавными преградами

Станислав Павлович Батуев¹, Виктор Владимирович Буркин²,
Алексей Сергеевич Дьячковский³, Александр Николаевич Ищенко⁴,
Павел Андреевич Радченко⁵, Андрей Васильевич Радченко⁶,
Антон Юрьевич Саммель⁷

^{1, 5, 6} Институт физики прочности и материаловедения

Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ spbatuev@gmail.com

² v.v.burkin@mail.ru

³ lex_okha@mail.ru

⁴ ichan@niipmm.tsu.ru

⁵ pavel@radchenko.site

⁶ andrey@radchenko.site

⁷ anton_sammel@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние ведущего пояска на процесс внедрения удлиненного ударника в алюминиевые преграды. Получены экспериментальные данные высокоскоростного взаимодействия удлиненных ударников с алюминиевыми преградами в диапазоне скоростей 200–450 м/с. С использованием модифицированного расчетного комплекса EFES проведены параметрические расчеты взаимодействия удлиненных ударников различных конструкций с алюминиевыми преградами.

Ключевые слова: ведущие пояски, высокоскоростное взаимодействие, удлиненный ударник, математическая модель

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Радченко П.А., Радченко А.В., Саммель А.Ю. Оценка влияния ведущих поясков на взаимодействие удлиненных ударников с легкосплавными преградами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 89. С. 66–76. doi: 10.17223/19988621/89/5

Original article

Analysis of the effect of driving belts on the interaction between elongated projectiles and light alloy barriers

Stanislav P. Batuev¹, Viktor V. Burkin², Aleksey S. D'yachkovskiy³,
Aleksandr N. Ishchenko⁴, Pavel A. Radchenko⁵, Andrey V. Radchenko⁶,
Anton Yu. Sammel⁷

^{1, 5, 6} Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ spbatuev@gmail.com

² v.v.burkin@mail.ru

³ lex_okha@mail.ru

⁴ ichan@niipmm.tsu.ru

⁵ pavel@radchenko.site

⁶ andrey@radchenko.site

⁷ anton_sammel@mail.ru

Abstract. To assess the effect of a driving belt on the elongated projectile penetration into a barrier, it is necessary to perform mathematical modeling considering all the physical and mechanical properties of the projectile and barrier. Using the modified EFES software package, the high-speed interaction of elongated steel projectiles with aluminum barriers is calculated in the speed range of 200 – 450 m/s. Two configurations of the projectile, namely, the projectiles with and without belts, are studied numerically. The developed mathematical model is validated using experimental results for the high-speed interaction of elongated projectiles with aluminum barriers. A comparison of the calculated and experimental results yields a discrepancy in the behind-the-barrier speed, which does not exceed 9.5%. The obtained data show an insignificant influence of the driving belts on the behind-the-barrier speed; the difference in the values is less than 4%.

Keywords: driving belts, high-speed interaction, elongated projectile, mathematical model

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority 2030).

For citation: Batuev, S.P., Burkin, V.V., D'yachkovskiy, A.S., Ishchenko, A.N., Radchenko, P.A., Radchenko, A.V., Sammel, A.Y. (2024) Analysis of the effect of driving belts on the interaction between elongated projectiles and light alloy barriers. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 89. pp. 66–76. doi: 10.17223/19988621/89/5

Введение

При создании однослойных защит применяют оценочные расчеты по инженерным формулам, которые позволяют без учета сложного напряженно-деформированного состояния преграды и ударника оценить ее свойства по величине предела сквозного пробития. В этом случае точность полученных результатов будет напрямую зависеть от знания скорости ударника после пробития преграды.

Запреградная скорость зависит от многих факторов взаимодействия элементов ударника с конструкцией. Одним из таких факторов является ведущий пояс, используемый для ведения ударников по каналу метательной установки. Очевидно, что для предотвращения контакта ударника с каналом метательной установки диаметр пояса должен быть больше диаметра самого ударника. Поясок должен обеспечивать центрирование ударника и обладать определенными механическими прочностными свойствами. При взаимодействии ударника с преградой в зависимости от материала пояса и его геометрических характеристик он может повлиять на динамику взаимодействия ударника с преградой.

При высокоскоростном взаимодействии ударника сложной конструкции с преградой для получения полной расчетной картины необходима математическая постановка задачи в полной мере, учитывающая все физико-механические свойства исследуемых материалов ударника и преграды, а также понимание физических процессов и явлений, происходящих в материалах. Все эти факторы приводят к формированию сложной нелинейной системы дифференциальных уравнений, для решения которой требуется применение современных вычислительных серверов с высокой частотой обработки информации и большим объемом оперативной памяти. Высокоскоростное взаимодействие ударника с преградой описывается задачами динамического деформирования неупругих тел. Для решения задач подобного типа разработаны эффективные алгоритмы численного решения [1–5]. Оценка погрешности численного решения таких задач является затруднительной.

Для оценки влияния ведущего пояса на процесс внедрения удлиненного ударника проведено экспериментально-теоретическое исследование. С применением модифицированного расчетного комплекса EFES получены расчетные результаты высокоскоростного взаимодействия удлиненных ударников с преградами из алюминия. Расчеты проводились в диапазоне скоростей 200–450 м/с для двух типов ударников: с поясками и без.

Экспериментальные результаты

Для исследования высокоскоростного взаимодействия с алюминиевой преградой использовался удлиненный ударник, внешний вид которого представлен на рис. 1. Результаты высокоскоростного взаимодействия получены на экспериментальном стенде [6].



Рис. 1. Внешний вид удлиненного ударника
Fig. 1. Design of an elongated projectile

В экспериментах использовался ударник, изготовленный из стали. Для ведения по каналу метательной установки применялись медные пояски. В кормовой части ударник имеет диаметр 8 мм, а диаметр медных поясков равен 8.1 мм.

Проведено три эксперимента в диапазоне скоростей 200–450 м/с. На рис. 2 представлен один из процессов высокоскоростного взаимодействия данного ударника с алюминиевой преградой. Ударник взаимодействовал с алюминиевой преградой толщиной 8 мм со скоростью 395 м/с.

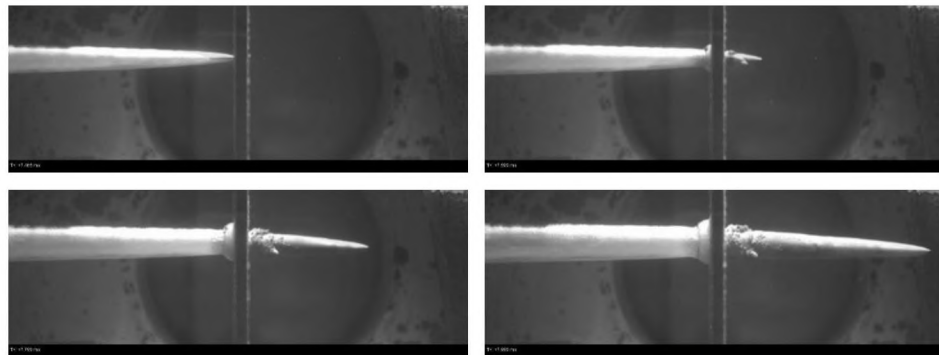


Рис. 2. Видеокадры процесса высокоскоростного взаимодействия ударника с алюминиевой преградой толщиной 8 мм

Fig. 2. Video frames of the high-speed interaction between a projectile and an 8-mm-thick aluminum barrier

Ударник к преграде подходит ровно. В процессе взаимодействия с преградой он образует круглое сквозное отверстие с небольшим выносом материала преграды на тыльной стороне. Пробив преграду насквозь, ударник продолжает свое движение со скоростью 345 м/с, затратив на пробитие преграды всего 50 м/с. На рис. 3 показано отверстие в преграде с лицевой и тыльной сторон, образованное ударником.

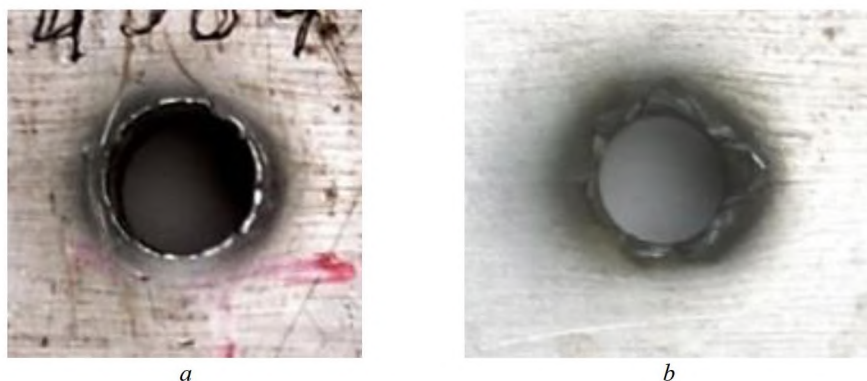


Рис. 3. Внешний вид отверстия в преграде с лицевой (а) и тыльной (b) сторон

Fig. 3. Physical form of the hole in a barrier from the (a) front and (b) back sides

Диаметр получившегося отверстия равен 8.24 мм. На рис. 3, b можно заметить участки отверстия, где имеется вынос материала. Результаты проведенных экспериментов использовались для тестирования математической модели (см. ниже). Определить влияние изменения диаметра медных поясков на процесс взаимодей-

ствия с преградой только экспериментальным путем очень трудозатратно и сложно, поэтому для дальнейшего анализа применялся аппарат математического моделирования.

Результаты численного моделирования

Анализ высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами и параметрические исследования проводились на модифицированном расчетном комплексе EFES [7–9]. Для оценки влияния ведущего пояска на процесс внедрения ударника проведена серия параметрических расчетов. В данной работе исследовалось взаимодействие ударников с преградами в рамках схемы, показанной на рис. 4. Стальной ударник занимает область D_1 , медные пояски – D_2 , преграда D_3 . Взаимодействие происходит в нормаль со скоростью v_0 . На контактной границе между ударником и преградой реализованы условия скольжения без трения, на границе между ударником и поясками – условие «слипания».

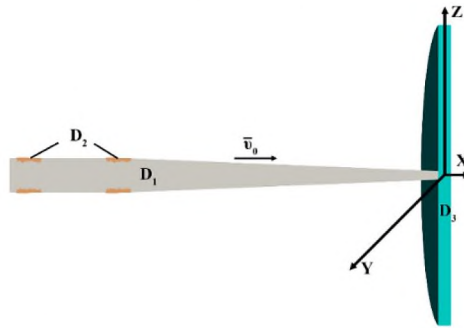


Рис. 4. Расчетная схема взаимодействия
Fig. 4. Computational model of the interaction

В таблице приведены значения запреградных скоростей ударника с поясками, полученные в эксперименте (v_{rb}^e) и расчете (v_{rb}^c), относительное расхождение между экспериментом и расчетом (δ_1), запреградная скорость ударника без поясков (v_r^c), относительное расхождение расчетных запреградных скоростей ударника с пояском и без пояска (δ_2) для различных начальных скоростей ударника (v_0) и толщин преграды (h).

Сравнение запреградных скоростей ударника.

v_0 , М/с	h , мм	v_{rb}^e , М/с	v_{rb}^c , М/с	δ_1 , %	v_r^c , М/с	δ_2 , %
216	3	147	161	9,5	167	3,7
395	8	345	320	7,2	318	0,6
411	3	384	386	0,5	386	0

Представленные результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласии экспериментальных и численных результатов: расхождение не превышает 9.5%. Также результаты свидетельствуют о незначительном влиянии ведущих поясков на запреградную скорость ударника – менее 4%.

Расчетные конфигурации ударников и преграды для рассмотренных условий взаимодействия представлены на рис. 5–10.

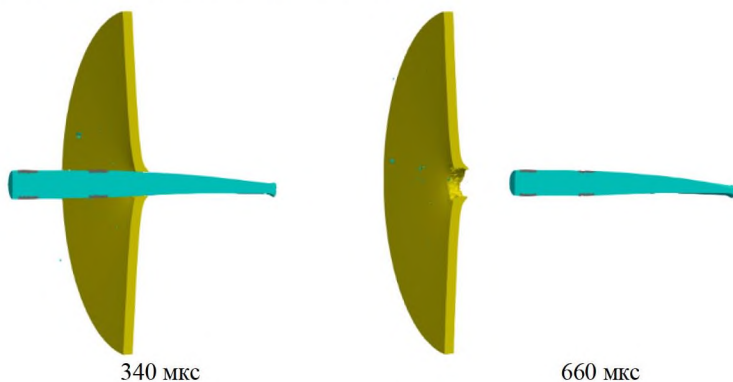


Рис. 5. Конфигурация ударника с поясками и преграды: $v_0 = 216$ м/с, $h = 3$ мм
Fig. 5. Configuration of the projectile with belts and barriers at $v_0 = 216$ m/s, $h = 3$ mm

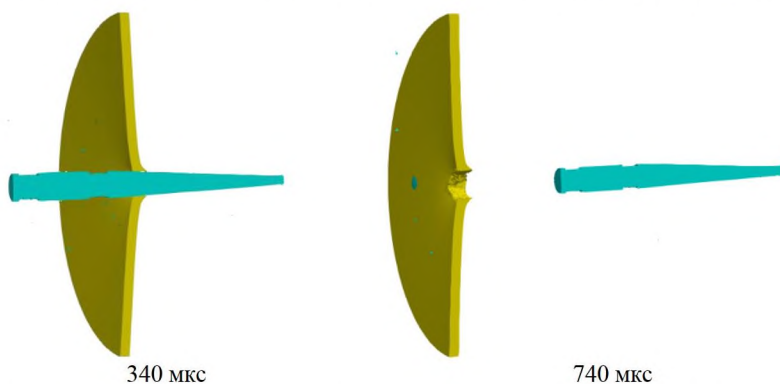


Рис. 6. Конфигурация ударника без поясков и преграды: $v_0 = 216$ м/с, $h = 3$ мм
Fig. 6. Configuration of the projectile without belts and barriers at $v_0 = 216$ m/s, $h = 3$ mm

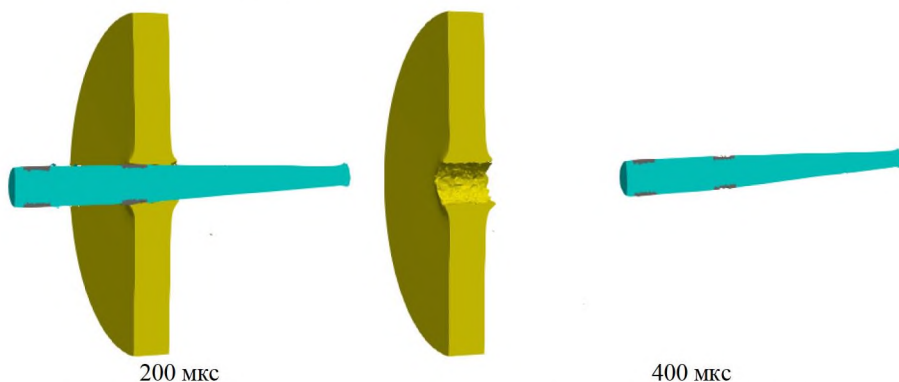


Рис. 7. Конфигурация ударника с поясками и преграды. $v_0 = 395$ м/с, $h = 8$ мм
Fig. 7. Configuration of the projectile with belts and barriers at $v_0 = 395$ m/s, $h = 8$ mm

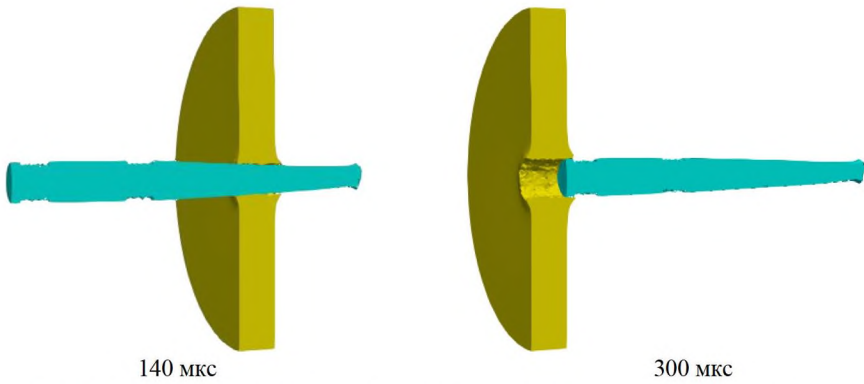


Рис. 8. Конфигурация ударника без поясков и преграды: $v_0 = 395$ м/с, $h = 8$ мм
Fig. 8. Configuration of the projectile without belts and barriers at $v_0 = 395$ m/s, $h = 8$ mm

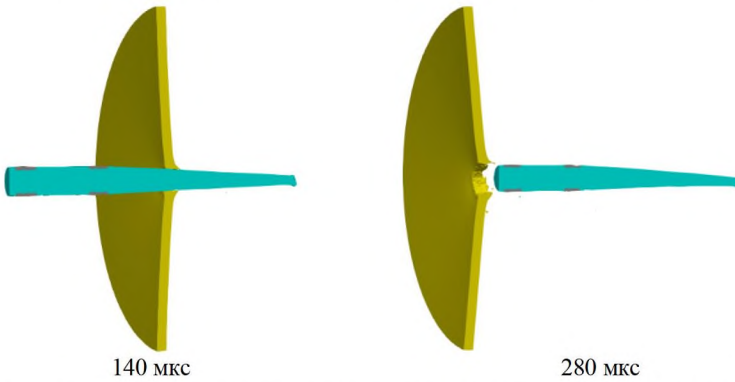


Рис. 9. Конфигурация ударника с поясками и преграды: $v_0 = 411$ м/с, $h = 3$ мм
Fig. 9. Configuration of the projectile with belts and barriers at $v_0 = 411$ m/s, $h = 3$ mm

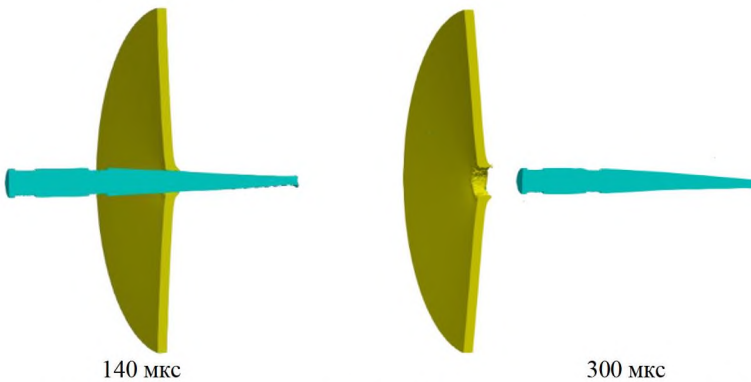


Рис. 10. Конфигурация ударника без поясков и преграды: $v_0 = 411$ м/с, $h = 3$ мм
Fig. 10. Configuration of the projectile without belts and barriers at $v_0 = 411$ m/s, $h = 3$ mm

В процессе внедрения в преграду происходит частичное разрушение медных поясков в результате их взаимодействия с боковой поверхностью образованного

цилиндрического отверстия в преграде (см. рис. 5, 7, 9). Это может приводить к незначительному торможению ударника. Степень подобного воздействия на скорость ударника будет зависеть от свойств материала преграды и времени контакта поясков с боковой поверхностью отверстия в преграде, определяемого толщиной преграды и начальной скоростью ударника. С одной стороны, наличие поясков увеличивает массу ударника и, как следствие, его кинетическую энергию, с другой стороны, взаимодействие поясков с преградой способствует снижению его скорости на заключительном этапе внедрения в преграду.

Заключение

Проведена серия экспериментов высокоскоростного взаимодействия удлиненных ударников с алюминиевыми преградами в диапазоне скоростей 200–450 м/с. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с расчетными, расхождение по запреградной скорости не превышает 9.5%. Используя математическую модель на основе модифицированного расчетного комплекса EFES, проведены расчеты высокоскоростного взаимодействия ударников без поясков с начальными данными, повторяющими эксперименты. Полученные результаты показали незначительное влияние ведущих поясков на запреградную скорость, разница составила менее 4%.

Список источников

1. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Численная реализация граничных условий в динамических контактных задачах. Новосибирск, 1987. (Препринт / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 12).
2. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Расчет контактных границ с учетом трения при динамическом взаимодействии деформируемых тел в пространственном случае // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности : материалы X Всесоюз. конф., Красноярск, 23–27 февраля 1987 г. Новосибирск : Ин-т теор. и прикл. механики СО АН СССР, 1988. С. 70–75.
3. Волчков Ю.М., Иванов Г.В., Кургузов В.Д. Аппроксимация уравнений упругопластического деформирования в задачах динамики // Динамика сплошной среды : сб. науч. тр. Новосибирск : Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1984. Вып. 66. С. 60–68.
4. Волчков Ю.М., Иванов Г.В., Кургузов В.Д. Схема численного решения динамических задач с условиями трения Кулона на поверхностях контакта // Теория распространения волн в упругих и упругопластических средах : сб. науч. тр. Новосибирск : Ин-т горного дела СО АН СССР, 1987. С. 80–83.
5. Волчков Ю.М., Иванов Г.В., Кургузов В.Д. Об аппроксимации уравнений упругопластического деформирования // Неклассические задачи механики твердого тела : сб. науч. тр. Новосибирск : Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1989. Вып. 92. С. 45–54.
6. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В., Фуфачев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Розаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д. Патент № 2683148 С1 Российская Федерация, МПК G01M 10/00, F41F 3/07. Гидробаллистический стенд: № 2017135871: заявл. 09.10.2017; опубл. 26.03.2019; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ).
7. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. Numerical analysis of concrete fracture under shock wave loading // Physical Mesomechanics. 2021. V. 24 (1). P. 40–45.

8. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. Effect of Projectile Rotation on High-Velocity Impact Fracture // *Physical Mesomechanics*. 2022. V. 25 (2). P. 119–128.
9. Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В. Трёхмерное моделирование деформации и разрушения гетерогенных материалов и конструкций при динамических нагрузках (EFES 2.0) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Государственная регистрация программы для ЭВМ. № 2019664836 от 14.11.2019.

References

1. Gulidov A.I., Shabalin I.I. (1987) *Chislennaya realizatsiya granichnykh usloviy v dinamicheskikh kontaktnykh zadachakh* [Numerical implementation of boundary conditions in dynamic contact problems]. Novosibirsk: Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of USSR Academy of Sciences.
2. Gulidov A.I., Shabalin I.I. (1988) Raschet kontaktnykh granits s uchetom treniya pri dinamicheskom vzaimodeystvii deformiruemykh tel v prostranstvennom sluchae [Calculation of contact boundaries with account for friction during dynamic interaction of deformable bodies in a three-dimensional case]. *Proceedings of the X All-Union Conference "Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity"*, Krasnoyarsk. Novosibirsk: Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. pp. 70–75.
3. Volchkov Yu.M., Ivanov G.V., Kurguzov V.D. (1984) Approksimatsiya uravneniy uprugoplasticheskogo deformirovaniya v zadachakh dinamiki [Approximation of elastoplastic deformation equations in dynamic problems]. In: *Collection of Scientific Papers "Continuum Dynamics"*. Novosibirsk: Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. 66. pp. 60–68.
4. Volchkov Yu.M., Ivanov G.V., Kurguzov V.D. (1987) Skhema chislennogo resheniya dinamicheskikh zadach s usloviyami treniya Kulona na poverkhnostyakh kontakta [Numerical algorithm for dynamic problems with Coulomb friction conditions on contact surfaces]. In: *Collection of Scientific Papers "Theory of Wave Propagation in Elastic and Elastoplastic Media"*. Novosibirsk: Institute of Mining of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. pp. 80–83.
5. Volchkov Yu.M., Ivanov G.V., Kurguzov V.D. (1989) Ob approksimatsii uravneniy uprugoplasticheskogo deformirovaniya [On the approximation of elastoplastic deformation equations]. In: *Collection of Scientific Papers "Non-classical Problems of Solid Mechanics"*. Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. 92. pp. 45–54.
6. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Maystrenko I.V., Fufachev V.M., D'yachkovskiy 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) *Gidroballysticheskiy stend: № 2017135871* [Hydroballistic testing unit No. 2017135871]. RF Patent 2683148.
7. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. (2021) Numerical analysis of concrete fracture under shock wave loading. *Physical Mesomechanics*. 24(1). pp. 40–45. doi: 10.1134/S1029959921010069
8. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. (2022) Effect of projectile rotation on high-velocity impact fracture. *Physical Mesomechanics*. 25(2). pp. 119–128. doi: 10.1134/S1029959922020035
9. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. (2019) *Trekhmernoe modelirovanie deformatsii i razrusheniya geterogennykh materialov i konstruktsey pri dinamicheskikh nagruzkakh (EFES 2.0)* [Three-dimensional modeling of deformation and destruction of heterogeneous materials and structures under dynamic loads (EFES 2.0)]. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2019664836. Moscow: Federal Service for Intellectual Property.

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; старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: spbatuev@gmail.com

Буркин Виктор Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором 71 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

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

Ищенко Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Радченко Павел Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН; старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (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; ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: andrey@radchenko.site

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

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 Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Senior Researcher, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: spbatuev@gmail.com

Burkin Viktor V. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

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

Ishchenko Aleksandr N. (Doctor of Physics and Mathematics, Director, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.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 Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Senior Researcher, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, 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 Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Leading Researcher, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University Tomsk, Russian Federation). E-mail: andrey@radchenko.site

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

Статья поступила в редакцию 19.12.2023; принята к публикации 03.06.2024

The article was submitted 19.12.2023; accepted for publication 03.06.2024