ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 64, № 2 ФИЗИКА 2021

УДК 539.3 DOI: 10.17223/00213411/64/2/115

С.А. АФАНАСЬЕВА, В.В. БУРКИН, А.С. ДЬЯЧКОВСКИЙ, А.Н. ИЩЕНКО, К.С. РОГАЕВ, А.Ю. САММЕЛЬ, Е.Ю. СТЕПАНОВ, М.В. ХАБИБУЛЛИН, А.В. ЧУПАШЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОСКОЛКА С РАЗНЕСЕННОЙ МИШЕНЬЮ [*]

Представлена отработка методики для проведения исследований высокоскоростного взаимодействия ударника с разнесенной мишенью. Скорости находились в диапазоне 1500–2500 м/с. Разнесенная мишень состояла из оргстекла (ПММА) и преграды-«свидетеля» из алюминиевого сплава Д16, располагающейся от него на расстоянии 60 мм. С помощью математического моделирования проводилось более точное и подробное изучение всех эффектов, возникающих при процессах высокоскоростного взаимодействия

Ключевые слова: *высокоскоростное взаимодействие, математическое моделирование, разнесенная мишень.*

Введение

Разработка легких защитных конструкций повышенной баллистической стойкости является непростой задачей, поскольку часто возникают противоречивые требования с точки зрения стоимости, веса, толщины, доступности материалов, технологичности и т.д. Кроме того, при проектировании необходимо учитывать и спектры угроз, к которым относится, в частности, поражение преград при соударении с высокоскоростными осколками.

В условиях высокоскоростного соударения однослойные защитные керамические преграды являются хрупкими и ненадежными. Высокотвердые керамики содержат большое число концентраторов напряжений (границ зерен, трещин, пор и т.д.), на которых активируется зарождение разрушений даже в области упругого деформирования материала. Микроразрушения в таких материалах могут появиться при сжатии под действием девиаторных напряжений. С увеличением интенсивности импульса нагрузки степень микроразрушений в фазе сжатия резко возрастает, что приводит впоследствии к падению сопротивления растяжению. В [1] представлены экспериментальные и теоретические результаты в области прочностных, кинетических и упруго пластических свойств материалов разных классов при ударно-волновом нагружении. В качестве перспективного решения для защитных систем отмечается использование многослойных конструкций. Лицевой слой преграды должен иметь твердость, существенно превышающую твердость материала ударника, а гюгоньевский предел упругости должен превосходить возникающее на начальной стадии ударно-волновое давление в преграде. Только в этом случае удается обеспечить жесткость преграды, достаточную для разрушения ударников без проникания в преграду.

Цель данной работы – отработка методики для проведения исследований высокоскоростного взаимодействия стального сферического ударника с разнесенной мишенью, состоящей из двух слоев. В качестве каждого слоя мишени можно использовать различные материалы. В данной работе лицевой слой мишени выполнен из оргстекла (ПММА), а на расстоянии 60 мм от него расположен второй слой – это преграда-«свидетель» из алюминиевого сплава Д16. Отработка методики эксперимента проводилась в диапазоне скоростей 1500–2500 м/с. В методику также входит и математическое моделирование процессов высокоскоростного взаимодействия, реализованных в данной серии экспериментов, с целью более детального изучения возникающих при этом эффектов.

Экспериментальные исследования

Для отработки методики была проведена серия экспериментов по соударению стального сферического ударника (рис. 1, *а*) диаметром 5.85 мм с разнесенной мишенью. Разнесенная мишень состояла из оргстекла (ПММА) (рис. 1, *б*) толщиной 8 мм и преграды-«свидетеля» (рис. 1, *в*) из алюминиевого сплава Д16, располагающейся от него на расстоянии 60 мм.

[*] В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Л Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

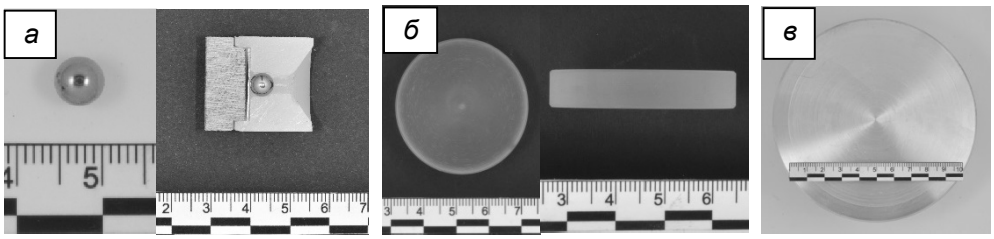

Рис. 1. Внешний вид: *а* – сферический ударник и метаемая сборка в разрезе; *б* – оргстекло (ПММА); *в* – преграда-«свидетель» из алюминиевого сплава Д16

На рис. 2, *а* показан внешний вид разнесенной мишени, расположенной в баллистической трассе [2] для проведения экспериментов. Весь процесс взаимодействия сферического ударника с разнесенной мишенью фиксировался с помощью высокоскоростной камеры «Fantom» (рис. 2, *б*).

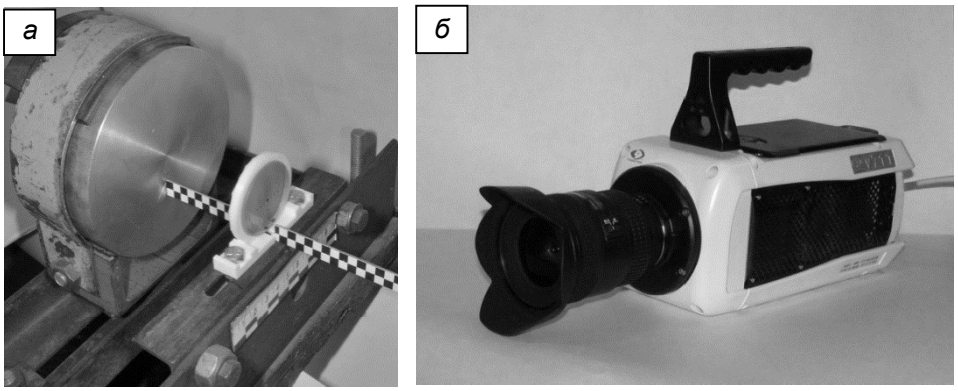

Рис. 2. Внешний вид: *а* – разнесенной мишени; *б* – высокоскоростной камеры «Fantom»

Фоторегистограммы процесса высокоскоростного взаимодействия стального сферического ударника с разнесенной мишенью для трех экспериментов, представлены на рис. 3. Как можно заметить, стальной сферический ударник после пробития прозрачной преграды из оргстекла во всех экспериментах практически не деформируется. С преградой-«свидетелем» ударник взаимодействует в целом состоянии, после чего в ней образуется кратер. Глубина полученного кратера измерялась, данные представлены в таблице.

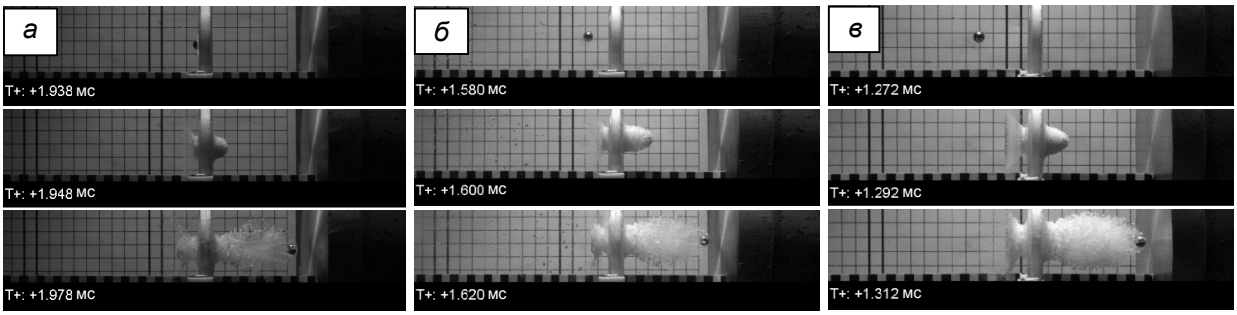

Рис. 3. Фоторегистограммы процесса взаимодействия стального сферического ударника с оргстеклом при скорости: *а* – V = 1569 м/с; *б* – V = 1906 м/с; *в* – V = 2361 м/с

Анализ представленных результатов показывает, что при скорости взаимодействия более 2300 м/с глубина кратера резко уменьшается и получается даже меньше, чем при скорости 1500 м/с. На рис. 4 показан внешний вид образовавшихся кратеров, а также остатки сферических ударников после эксперимента при скорости взаимодействия до 2000 м/с. При скорости выше 2300 м/с остатков ударника не наблюдалось.

Экспериментальные данные

№ эксперимента	Скорость взаимодействия V, м/с	Глубина кратера h, мм
4082	1569	19.12
4081	1528	18.24
4088	1906	22.37
4087	1942	21.94
4077	2361	13.76
4080	2354	13.49

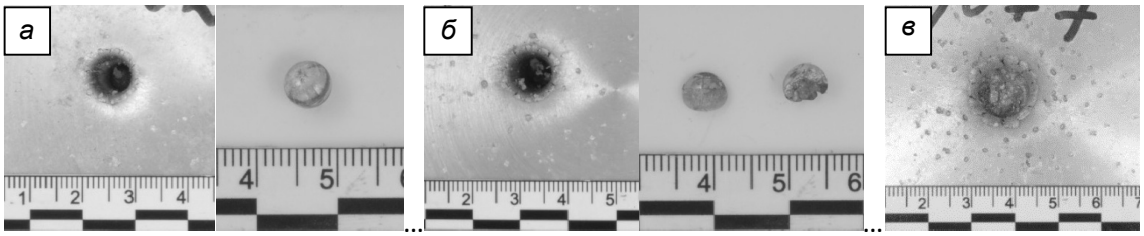

Рис. 4. Внешний вид кратеров и ударников при скорости: *а* – V = 1569 м/с; *б* – V = 1906 м/с; *в* – V = 2361 м/с

Опираясь на результаты, можно предположить, что при скоростях выше 2300 м/с сферический ударник полностью разрушился и поэтому образование глубокого кратера не происходило. Более подробно и наглядно процесс взаимодействия был рассмотрен при математическом моделировании.

Математическое моделирование

Математическое моделирование взаимодействия стального сферического ударника с разнесенной мишенью проводилось в рамках математической модели [3] в осесимметричной постановке с применением программного комплекса [4]. В качестве модели разрушения материалов используется модель роста сферических пор [5].

Результаты расчетов трех экспериментов из проведенной серии, показанные на рис. 5–7, представлены в виде поля скоростей относительно максимальной скорости U_{max} (слева) и поля давлений (справа) в цилиндрической системе координат x, z, (см) в различные моменты времени t взаимодействия сферического ударника и разнесенной преграды.

На рис. 5 представлены результаты математического моделирования взаимодействия ударника с разнесенной преградой при скорости V = 1569 м/с. В момент времени t = 0.9 мкс сферический ударник взаимодействует с первым слоем преграды из оргстекла. В правой части хронограммы процесса при данном времени можно заметить в области контакта ударника и преграды образование поля наибольшего давления. На протяжении всего времени процесса взаимодействия ударника с преградой из оргстекла давление на ударник снижается, и он не деформируется. При t = = 10.0 мкс преграда из оргстекла пробита насквозь, и стальной сферический ударник продолжает свое движение дальше. В момент времени t = 12.0 мкс сферический ударник взаимодействует с преградой-«свидетелем». Как и с оргстеклом в области контакта образуется поле высокого давления. К моменту времени взаимодействия t = 20.0 мкс ударник начинает деформироваться. Стальной сферический ударник останавливается при t = 44.0 мкс, он деформирован, но не разрушен. Как и в эксперименте, ударник не разрушился, а немного деформировался, оставшись целым. В расчете глубина кратера равна h = 18.79 мм, расхождение с экспериментом составило 1.7%.

Результаты следующего расчета моделируют взаимодействие стального сферического ударника с разнесенной преградой при скорости V = 1906 м/с (рис. 6). Как и в предыдущем случае, стальной сферический ударник в момент времени t = 0.9 мкс взаимодействует с оргстеклом. В месте контакта ударника и оргстекла также образуется область повышенного давления, но она больше чем при меньшей скорости. К моменту времени t = 10.0 мкс стальной ударник пробивает оргстекло и, не изменившись, продолжает свое движение ко второй преграде. Когда ударник взаимодействует с преградой-«свидетелем», в момент времени t = 12.0 мкс он начинает деформироваться. При дальнейшем его углублении в преграду деформация незначительно увеличивается.

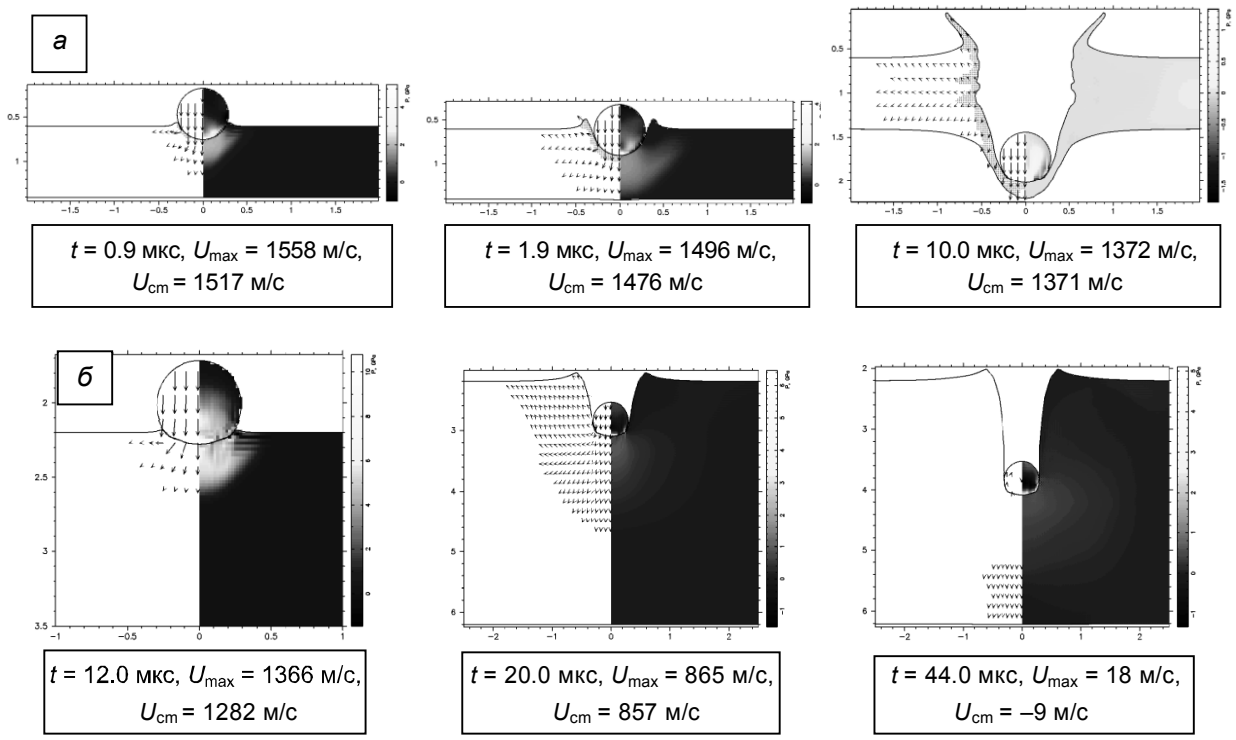

Рис. 5. Хронограмма процесса взаимодействия ударника при скорости V = 1569 м/с: *а* – с преградой из ПММА; *б* – с преградой-«свидетелем»

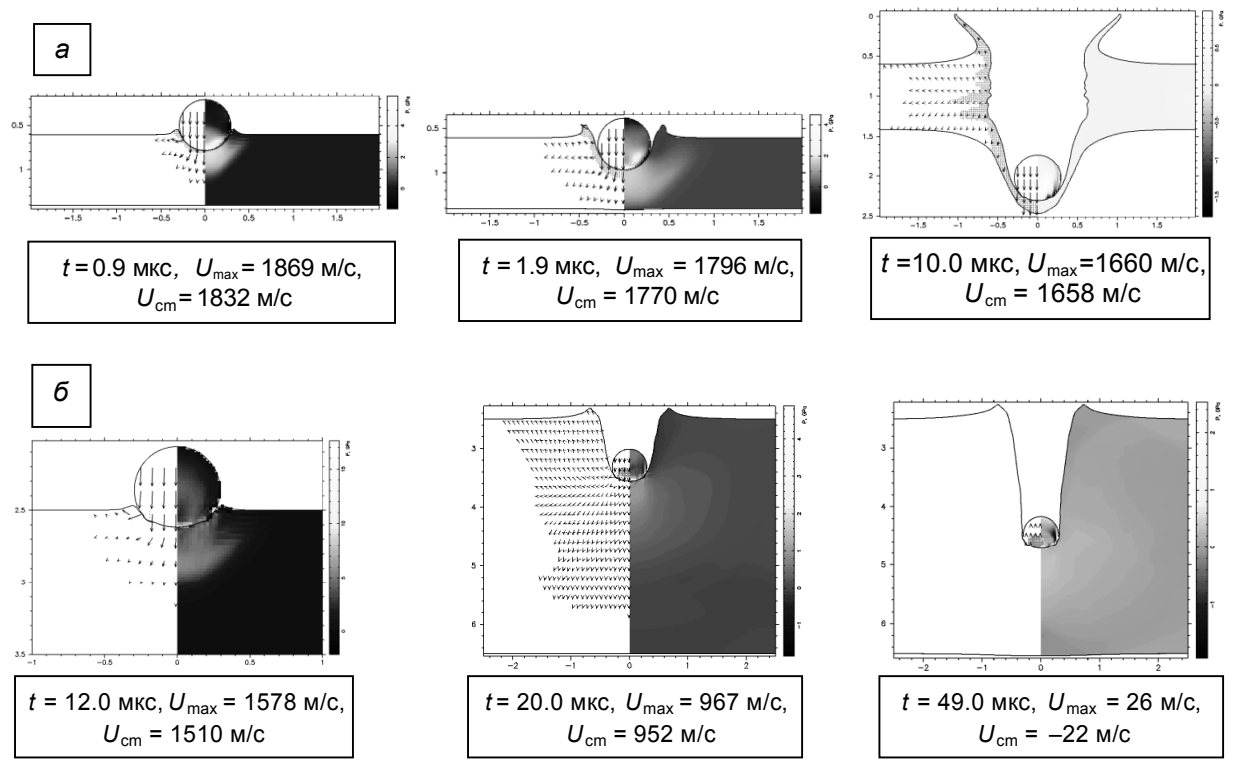

Рис. 6. Хронограмма процесса взаимодействия ударника при скорости V = 1906 м/с: *а* – с преградой из ПММА; *б* – с преградой-«свидетелем»

На границе контакта ударника с преградой-«свидетелем» в нем появляются области разрушения, что видно при времени t = 20.0 мкс, в правой части хронограммы. В момент времени t = 49.0 мкс ударник останавливается. Область разрушения к моменту времени остановки увеличилась, что приводит к частичному разрушению ударника. Результаты расчета повторяют данные экспери-

мента. Ударник, как и в эксперименте, рассыпался на части. Глубина образовавшегося кратера в расчете равна h = 22.12 мм, расхождение с экспериментом составило 1.1%.

Результаты третьего расчета получены при скорости удара V = 2361 м/с (рис. 7). Стальной сферический ударник в период взаимодействия с оргстеклом не деформируется и не обретает внутренних напряжений. Пробив насквозь первую преграду, продолжает движение к преграде-«свидетелю». В момент времени t = 9.0 мкс происходит контакт ударника с преградой-«свидетелем». Он начинает деформироваться и в нем сразу образуются внутренние напряжения. При дальнейшем его углублении в преграду-«свидетель» сферический ударник приобретает форму диска и начинает рассыпаться. К моменту времени t = 26.0 мкс происходит остановка ударника, так как он рассыпался на мелкие частицы, как и в эксперименте. Глубина образовавшегося кратера равна h = = 13.76 мм, расхождение с экспериментом составило 1.2%.

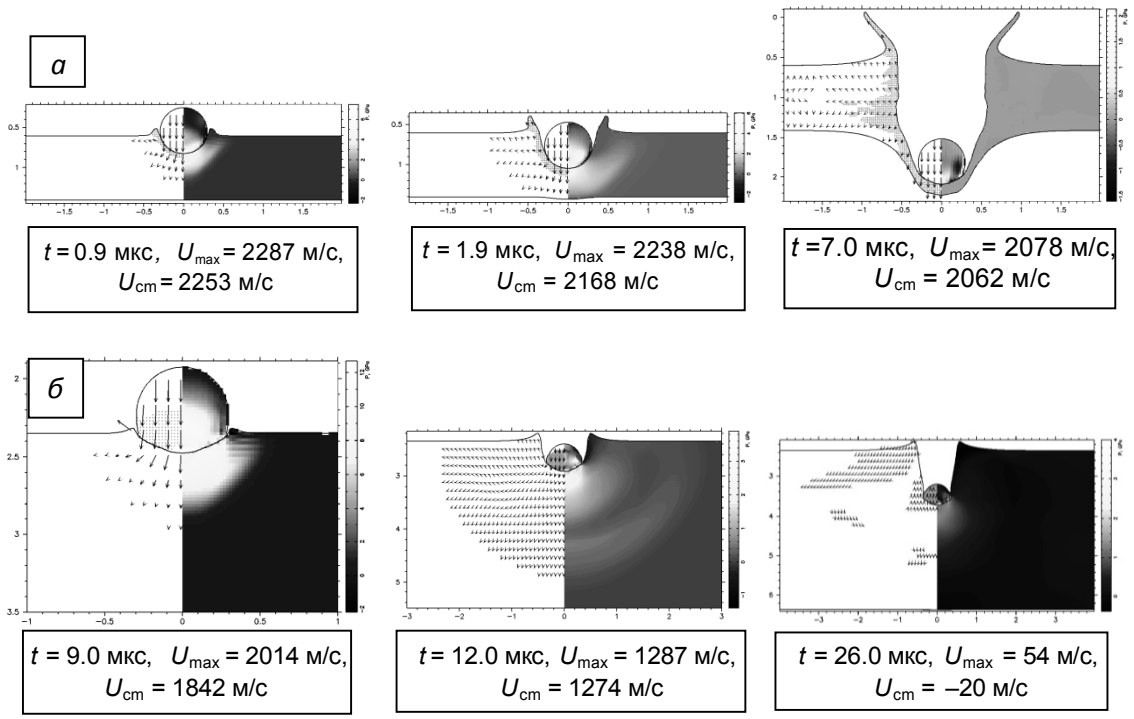

Рис. 7. Хронограмма процесса взаимодействия ударника при скорости V = 2361 м/с: *а* – с преградой из ПММА; *б* – с преградой-«свидетелем»

Таким образом, при взаимодействии ударника с разнесенной преградой типа оргстекло – сплав алюминия Д16 в диапазоне скоростей 1500–2000 м/с стальной сферический ударник деформируется, но не рассыпается на мелкие частицы. Образовавшийся кратер в преграде-«свидетеле» увеличивается с ростом скорости. При скоростях выше 2000 м/с стальной сферический ударник после взаимодействия с преградой-«свидетелем» рассыпается на мелкие частицы. Этот эффект детально прослеживается при математическом моделировании результатов проведенных экспериментов. Образование кратера по глубине меньше, чем при скорости V = 1569 м/с, можно объяснить тем, что энергия ударника, которая должна была пойти на образование кратера, пошла на его разрушение.

Заключение

Комплексная экспериментально-расчетная методика исследования высокоскоростного взаимодействия стального сферического ударника с разнесенной мишенью показала свою работоспособность в диапазоне скоростей 1500–2400 м/с. Все полученные в экспериментах данные удачно интерпретированы и подтверждены расчетами с помощью математической модели. Поэтому при замене оргстекла в разнесенной преграде на какой-либо другой защитный материал, включая керамику, комплексная методика может быть использована для изучения защитных свойств данного материала в широком диапазоне скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Янус-К, 1996. – 408 с.
2. Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Агафонов С.В., Рогаев К.С. // Патент на изобретение № 2591132 от 20 июня 2016.
3. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 1992. – Т. 35. – № 8. – С. 5–48.
4. Белов Н.Н., Корнеев А.И., Николаев А.П. // ПМТФ. – 1985. – № 3. – С. 132–136.
5. Хабибуллин М.В., Афанасьева С.А. Расчет явлений, происходящих в конденсированных средах в результате интенсивных импульсных воздействий, в осесимметричной постановке. Федеральная служба по интеллектуальной собственности // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617301. – М., 2012.

Поступила в редакцию 30.07.2020.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Афанасьева Светлана Ахмед-Рызовна, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ;
Буркин Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., зав. сектором 71 НИИ ПММ ТГУ, e-mail: v.v.burkin@mail.ru;
Дьячковский Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail: Lex_Okha@mail.ru;
Ищенко Александр Николаевич, д.ф.-м.н., зам. директора по НИР НИИ ПММ ТГУ, e-mail: ichan@niipmm.tsu.ru;
Рогаев Константин Сергеевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail: rogaev@ftf.tsu.ru;
Саммель Антон Юрьевич, мл. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail: anton_sammel@mail.ru;
Степанов Евгений Юрьевич, мл. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail stepanov_eu@mail.ru;
Хабибуллин Марат Варисович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail: lenmar07@rambler.ru;
Чупашев Андрей Владимирович, мл. науч. сотр. НИИ ПММ ТГУ, e-mail: ChupashevAV@Gmail.com.