

03

Особенности использования рельсотрона в задачах высокоскоростного взаимодействия тел с преградами

© М.А. Ядренкин, В.П. Фомичев, А.А. Голышев

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: yadrenkin@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2023 г.

В окончательной редакции 12 декабря 2023 г.

Принято к публикации 21 декабря 2023 г.

Показаны примеры использования рельсового ускорителя масс (рельсотрона) в составе многофункционального баллистического комплекса, предназначенного для решения задач высокоскоростного взаимодействия тел с преградами. Дано описание методик разгона тел микро- и макромасштаба внутри диэлектрического контейнера, толкаемого по каналу плазменным поршнем. Представлены результаты испытаний металлокерамических покрытий, образованных методом лазерной наплавки. Было показано существенное влияние газодинамических эффектов на характер ускорения порошковой смеси микрочастиц. Продемонстрирована возможность использования вакуумной камеры для проведения экспериментальных исследований импактного взаимодействия микрочастиц с преградами при низком давлении окружающего газа.

Ключевые слова: рельсовый ускоритель масс, плазменный поршень, микрочастицы, вакуумная камера, баллистическая трасса.

DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57073.272-23

Введение

Современные научно-технологические задачи, связанные с процессами ударного высокоскоростного взаимодействия твердых деформируемых тел, требуют развития экспериментальных и численных методов исследования поведения материалов в условиях высокоэнергетического импульсного нагружения. Актуальность таких исследований не вызывает сомнений. К таким задачам можно отнести исследования механических характеристик новых материалов и покрытий для защиты различных объектов от механического воздействия. Например, защита элементов космических аппаратов от попадания космического мусора или пыли [1,2], импактное взаимодействие космических тел [3] и многие другие [4–7]. Стоит отметить, что на практике процесс ударного взаимодействия тела с преградой проявляется в комплексе различных физических явлений: значительные деформации и разрушения, теплофизические преобразования, изменения структурно-фазового состава вещества, сопутствующие газо- и гидродинамические эффекты. Это определяет явный приоритет экспериментальных данных в прикладном аспекте их использования.

В настоящей работе рассмотрены методики разгона тел микро- и макроразмеров в канале рельсового электродинамического ускорителя масс для реализации экспериментальных исследований высокоскоростного взаимодействия твердых деформируемых тел различного размера при различных параметрах окружающей среды.

1. Баллистический стенд для исследования высокоскоростного взаимодействия тел на базе рельсового ускорителя масс

Очевидно, что экспериментальное исследование процессов высокоскоростного взаимодействия тел требует создания специальных установок и соответствующих им методик разгона тел, а также разработки современных методов исследования быстропротекающих высокоэнергетических процессов при заданных параметрах взаимодействия. Для достижения высоких скоростей соударения тел с преградами (более 1000 м/с) в эксперименте могут быть использованы различные баллистические установки — устройства для ускорения объектов с целью исследования их движения по баллистической траектории в условиях взаимодействия с веществами различной физической природы [8–10]. Электродинамические ускорители объектов, действие которых основано на преобразовании электрической энергии в кинетическую энергию снаряда, позволяют преодолеть основное ограничение максимально достижимой скорости движения тела, связанное с величиной скорости звука в канале. Среди электродинамических ускорителей тел можно выделить рельсовые ускорители — рельсотроны. Данный класс установок позволяет осуществить ускорение тел различной массы (10^{-4} – 10^{-2} кг) до скоростей свыше 5000 м/с [11–15]. По мнению авторов настоящей работы, использование рельсотронов является перспективным способом реализации условий высокоскоростно-

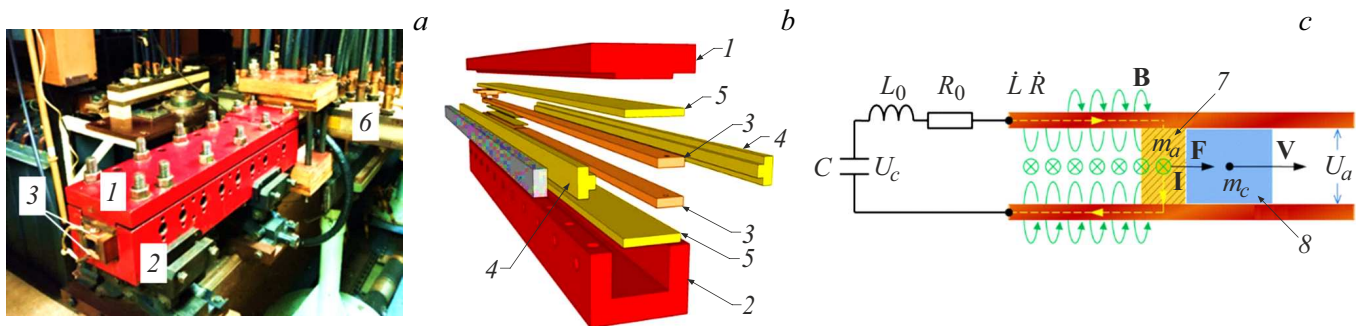


Рис. 1. Общий вид рельсотрона (а), сборка деталей канала (б) и схема рельсотрона с плазменным поршнем (с). 1 — крышка, 2 — корпус, 3 — электроды, 4, 5 — изоляторы, 6 — токосборник, 7 — плазменный поршень, 8 — ускоряемое тело.

го соударения тел при решении прикладных и фундаментальных задач таких, как ударное взаимодействие тел с преградами, проникание микроударников в металлы, создание и разрушение покрытий различной физической природы (в том числе и гетерогенных), фазовые преобразования веществ при импактном взаимодействии и другие.

Установка на базе рельсотрона состоит из собственно рельсового ускорителя, источника питания и баллистической трассы. Как правило, канал рельсотрона образован двумя диэлектрическими поверхностями и парой проводящих поверхностей — рельс. Принцип действия рельсового ускорителя масс заключается в преобразовании электрической энергии в кинетическую энергию ускоряемого объекта с электропроводными свойствами под действием электромагнитной силы, возникающей при прохождении через рабочий контур сильного электрического тока, получаемого с помощью конденсаторных батарей высокой емкости, либо с использованием взрывомагнитных генераторов [16]. В процессе разгона в канале рельсотрона под действием силы Ампера ускоряемое тело испытывает значительное сопротивление движению, связанное с газодинамическим сопротивлением выталкиваемого из канала газа, сопротивлением трения тела о стенки канала, а также с кинематическим сопротивлением, обусловленным ростом массы плазменного поршня, а следовательно, и общей ускоряемой массы ввиду непрерывной термической абляции поверхности электродов [17,18]. Несмотря на низкий коэффициент полезного действия (обычно около 10%), данный метод позволяет ускорять тела различной геометрии до скорости в несколько километров в секунду в относительно коротком канале (порядка 1 м), что является значительным преимуществом в сравнении с другими типами ускорителей, например, легкогазовыми пушками [8]. Среди явных недостатков электродинамического метода разгона тел можно выделить следующие: недолговечность канала, а также наличие продуктов горения и плавления стенок канала, движение которых вслед за ускоряемым объектом может негативно повлиять как на результат эксперимента, так и на диагностику

наблюдаемых явлений. Однако абсолютные характеристики данного класса установок в ряде случаев определяют данный метод ускорения тел как единственно возможный для реализации уникальных условий экспериментов.

Рельсотрон, разработанный и созданный в ИТПМ СО РАН, выполненный по схеме рельсового ускорителя с плазменным поршнем, представлен на рис. 1. Две противоположные стенки канала прямоугольного сечения образованы массивными медными электродами, а две другие стенки выполнены из стеклотекстолита — прочного диэлектрического композитного материала, обладающего хорошими показателями износостойкости. После сборки выполняется калибровка канала с помощью специального инструмента, а в глухом торце располагается полоска медной фольги, касающаяся рельс. При подаче мощного электрического импульса на электроды происходит электровзрыв фольги, в результате чего образуется плазменный поршень. Чтобы выдержать при этом скачок давления до значений порядка 10 МПа [19], канал рельсотрона заключен в стальной корпус. В зависимости от выбранной методики разгона и требуемых параметров эксперимента длина канала может варьироваться от 0.5 до 1 м, а его сечение — от 10×10 до 18×18 мм.

Система питания рельсового ускорителя представляет собой 5 последовательно соединенных секций высоковольтных конденсаторов общей емкостью 0.04 Ф. При максимальном напряжении 5 кВ величина значения тока, протекающего через плазменный поршень, может достигать 550 кА, а предельная величина запасаемой энергии в батарее составляет около 0.5 МДж. При необходимости формирования импульса тока определенного профиля и длительности включение конденсаторных батарей может осуществляться не одновременно, а поочередно с заданным интервалом времени. Такая энерговооруженность баллистической установки на базе рельсотрона позволяет ускорять тела различной массы в широком диапазоне сверхзвуковых скоростей (рис. 2).

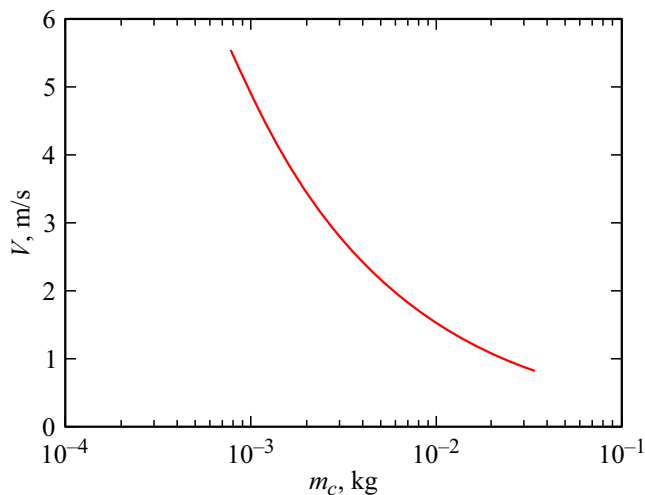


Рис. 2. Достижимая скорость объектов различной массы в рельсотроне ИТПМ СО РАН.

2. Методики разгона тел в канале рельсотрона

Различные методики разгона тел в канале рельсотрона и обеспечения их движения на всем протяжении баллистической трассы призваны обеспечить необходимые условия проведения эксперимента. Как правило, в работах, посвященных экспериментальным исследованиям высокоскоростного взаимодействия тел, уделяется большее внимание описанию физических процессов ударного взаимодействия и в меньшей степени — особенностям методик достижения результата исследований. В связи с этим могут возникать трудности при попытке повторения или подтверждения результата независимыми коллективами авторов. Не вызывает сомнений, что от методики проведения эксперимента зависит как сам результат, так и корректность интерпретации наблюдаемых явлений.

При ускорении тел в рельсотроне возможны различные схемы протекания электрического тока через ускоряемый объект. В случае если ускоряемое тело является электропроводным, то его ускорение происходит при возникновении внутренней электромагнитной силы, образованной при протекании тока непосредственно через тело при его плотном контакте с рельсами. Ускоряемое тело также может быть выполнено из диэлектрического материала, при этом протекание тока должно быть реализовано через плазменный поршень, который ускоряемый электромагнитной силой создает давление на тело, приводя его в движение. Первый способ применим в тех экспериментах, где сохранность формы и свойств ускоряемого объекта не столь важна, а небольшой унос массы из-за плавления металла в области контакта не вносит значительную погрешность в результаты исследований, либо ускоряемое тело является несущим металлическим контейнером с заключенным в нем

объектом исследований. Недостатком данного метода является также то, что ускоряемый объект должен быть выполнен точно по форме поперечного сечения канала, что приводит к трудностям изготовления либо тела в случае использования прямоугольного канала, либо самого канала при ускорении объекта цилиндрической формы.

Использование плазменного поршня позволяет ускорять тела произвольной формы, помещая их в диэлектрический контейнер. Образование плазменного поршня происходит при электровзрыве тонкого металлического проводника, например, полоски медной фольги, в момент прохождения через него сильного электрического тока с выделением джоулева тепла в начале электрического разряда [20,21]. Плазменный поршень оказывает значительное давление на ускоряемый объект как за счет теплового расширения паров металла, так и в результате возникновения электромагнитной силы в проводящем контуре. В качестве материала ускоряемого тела (контейнера) может быть использован любой диэлектрик, способный выдержать возникающие нагрузки при ускорении. Главным преимуществом данной методики является отсутствие электрического контакта ускоряемого тела со стенками канала, а также отсутствие значимого нагрева тела и его тепловых деформаций в момент разгона. Таким способом можно ускорить как одиночный объект, так и группу объектов, что необходимо при исследовании их совместного высокоскоростного влияния на деформацию преграды.

При исследовании процесса соударения тела с преградой необходимо обеспечить их взаимодействие в заданном диапазоне скоростей, сохранив целостность ускоряемого объекта вплоть до момента контакта. Эти условия возможно обеспечить путем разгона тестового образца в диэлектрическом контейнере с использованием плазменного поршня. Однако несмотря на то, что плотность контейнера может быть в несколько раз меньше плотности ударника, его масса, как правило, превышает массу тела, а попадание контейнера в преграду приводит к ее значительным деформациям. Чтобы исключить влияние контейнера на процесс взаимодействия, были реализованы методики ускорения тел с отделением контейнера либо аэродинамическим, либо механическим способом. Схематическое изображение основных стадий движения тел по баллистической трассе представлены на рис. 3.

В настоящей работе представлены примеры использования методик для разгона микро- и макроударников при различном давлении окружающего воздуха, реализуемых на экспериментальном стенде ИТПМ СО РАН.

2.1. Метание тел в разделяемом контейнере

Ускорение макроударников диаметром до 5 мм осуществлялось в разделяющемся контейнере согласно схеме на рис. 3, а. Конструкция контейнера состояла из двух одинаковых половин, которые имеют такую аэродинамическую форму, которая после вылета контейнера из

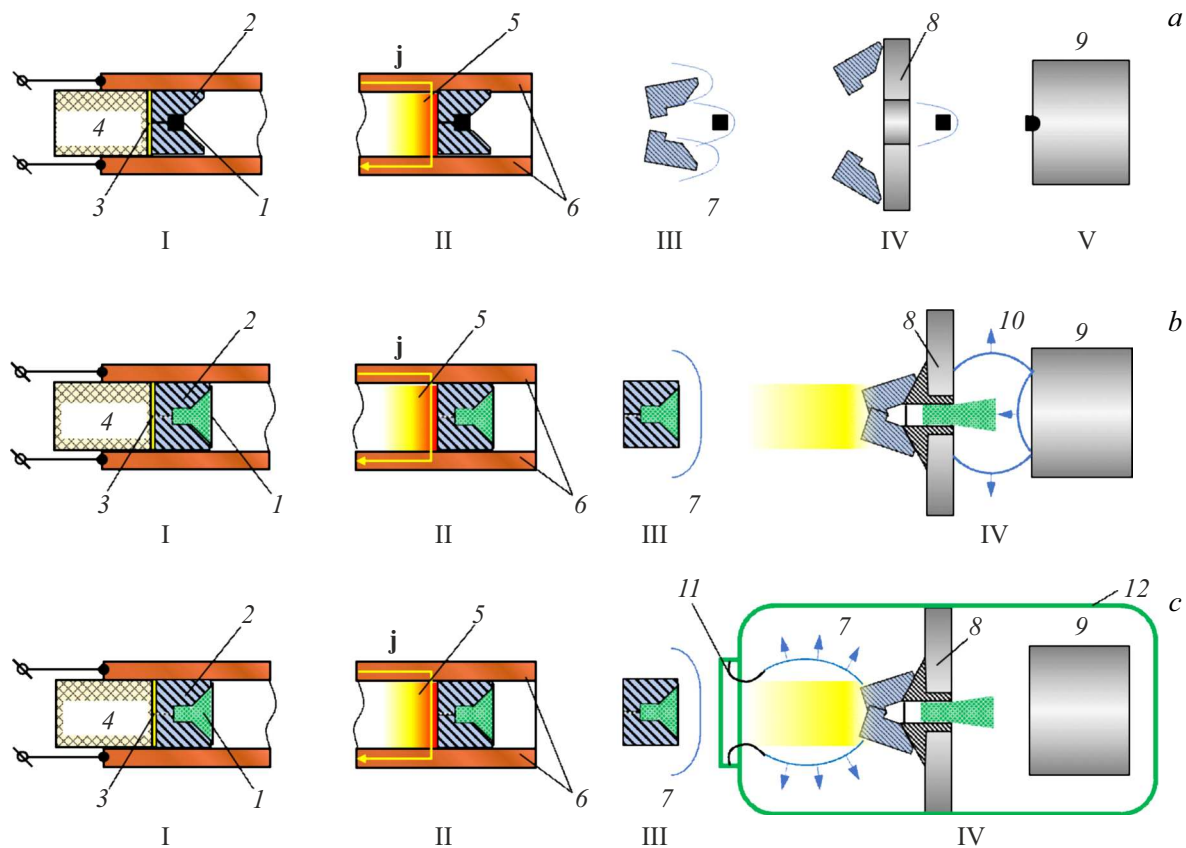


Рис. 3. Стадии ускорения макроударников в разделяющемся контейнере (а) [22] и микрочастиц в цельном контейнере в атмосфере (b) [23] с вакуумной камерой (с). 1 — ускоряемое тело, 2 — контейнер, 3 — медная фольга, 4 — затвор, 5 — плазменный поршень, 6 — рельсы, 7 — схема УВС течения вблизи контейнера, 8 — отсекатель, 9 — мишень, 10 — схема УВС течения в области взаимодействия, 11 — мембрана, 12 — вакуумная камера.

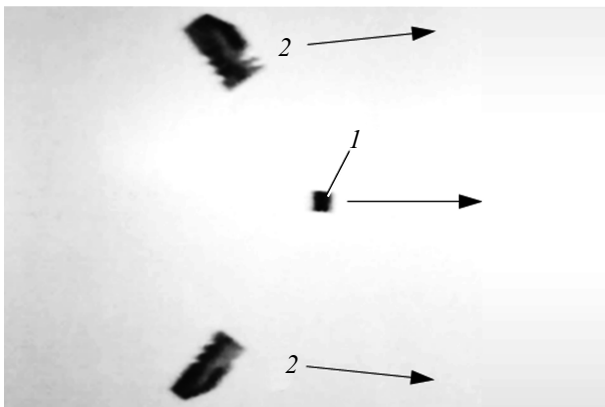


Рис. 4. Раскрытие контейнера и направления полета ускоряемых частей снаряда. 1 — цилиндрический ударник, 2 — части контейнера.

канала приводила к его раскрытию под действием сил и моментов, создаваемых давлением встречного потока воздуха (рис. 4).

Стадии ускорения и пролета ускоряемого тела на баллистической трассе представлены на рис. 3, а, где I —

начальное положение тела в контейнере, II — разгон контейнера с телом в канале при давлении на него плазменного поршня, III — фаза разделения контейнера под действием аэродинамических сил и образованием ударноволновой структуры, IV — момент остановки половин контейнера с помощью отсекателя, V — взаимодействие тела с преградой.

Контейнер должен быть выполнен из материала, обладающего достаточной ударной прочностью, чтобы выдерживать как давление плазменного поршня, так и давление ускоряемого тела на его донную часть. Для материала ускоряемого объекта также существуют определенные прочностные ограничения, вызванные деформацией тела силой ускорения, величина которого может достигать порядка 10^5 G.

Измерение скорости ударника может быть реализовано различными способами: пролетом контейнера через рам-мишени (система сеток из тонких металлических нитей, замкнутых на измерительную схему), либо с помощью высокоскоростной видеосъемки процесса пролета тела в непосредственной близости от преграды при фиксации положения ускоряемого объекта относительно масштабной линейки. Зная частоту съемки, время экспозиции кадра и пройденное телом расстояние, можно

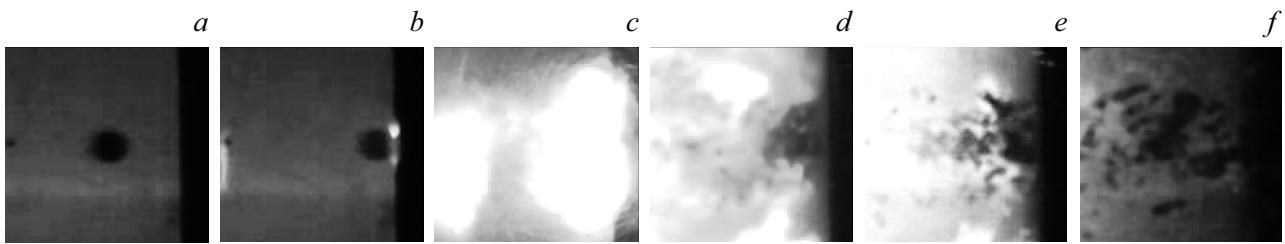


Рис. 5. Соударение ударника с металлокерамическим покрытием при начальной скорости 1165 м/с через 3 (c), 60 (d), 97 (e) и 263 μ s (f) после начала взаимодействия (b).

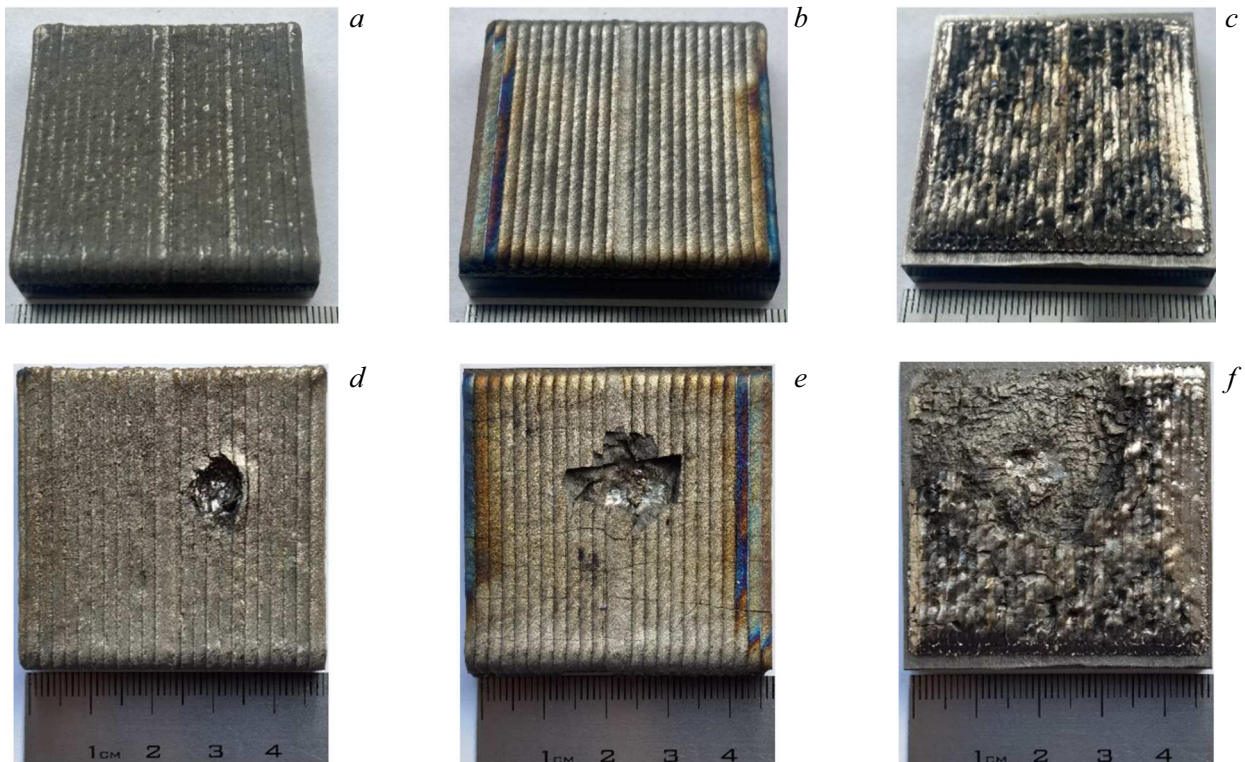


Рис. 6. Фотографии покрытия до (a, b, c) и после (d, e, f) [24,25] высокоскоростного ударного испытания.

определить скорость ударника с точностью до 5% в зависимости от условий эксперимента.

В работах [22,24,25] представлены результаты широкого ряда экспериментальных исследований стойкости к высокоскоростному соударению различных покрытий, создаваемых методами лазерной аддитивной печати. Испытания проводились как для металлических, так и для металлокерамических покрытий. Кроме того, рассматривался вопрос о влиянии типа армирования (частицы или дискретные волокна) покрытия на характер разрушения при взаимодействии с ускоряемым телом.

В представленных выше работах в качестве ускоряемого тела использовался шарик диаметром 4,8 мм и весом 0,5 г, выполненный из стали ШХ17. Скорость ударника определялась с помощью скоростной видеокамеры Photron Fastcam SA-Z. На рис. 5 представлены кадры видеосъемки процесса взаимодействия шарообразного

ударника из стали ШХ17 с металлокерамическим покрытием VT-6–SiC на скорости 1165 м/с. На рисунке видно, что после соударения происходит разрушение материала покрытия в области удара и разлет осколков.

На рис. 6 представлены фотографии покрытия до и после высокоскоростного ударного испытания металлокерамических покрытий на основе титана: a, d — чистый титан VT-6; b, e — VT-6 с порошком SiC в соотношении 9:1 массовых концентраций; c, f — VT-6 и дробленое волокно SiC в соотношении 1:1 объемных концентраций. Видно, что в результате взаимодействия ударника с покрытием образуется кратер с различным характером разрушения.

Обнаружено, что покрытие без керамики после испытания имеет кратер цилиндрической формы с ровными краями (рис. 6, d), а при высокоскоростном взаимодействии ударника с металлокерамическим покрытием про-

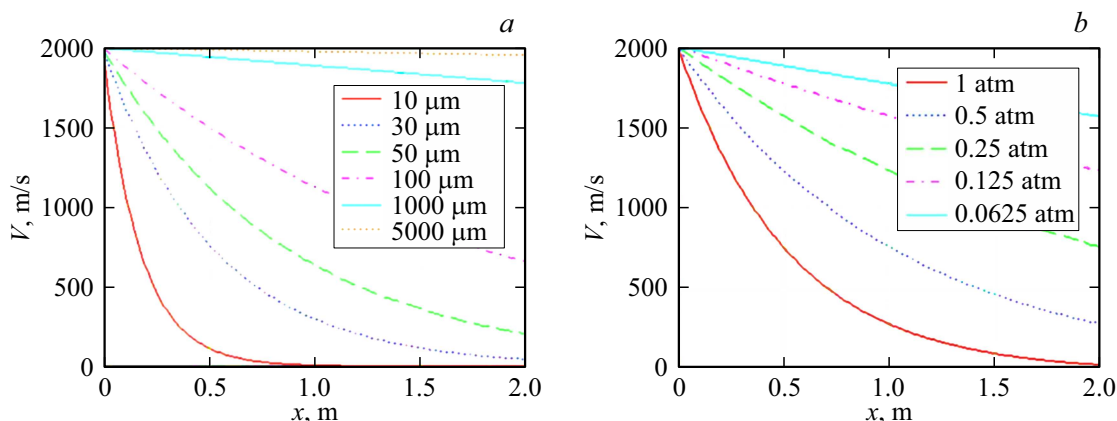


Рис. 7. Изменение скорости микрочастицы в зависимости от ее размера и давления окружающей среды.

исходит разрушение наплавленного слоя по периметру кратера. Причем для покрытия с частицами керамики разрушение происходит в виде отверстия с выкрашиванием (рис. 6, *e*), а для покрытия с керамическим волоконным разрушение происходит в виде дискообразования (рис. 6, *f*).

При определении глубины кратера получено, что для образца ВТ-6—порошок SiC глубина кратера составляет $1437\ \mu\text{m}$. В случае применения дискретных керамических волокон глубина кратера в покрытии уменьшилась на 22% и составляет $1137\ \mu\text{m}$. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что покрытие с волокнами обеспечивает более эффективное рассеяние кинетической энергии ударника по всему объему образца, а не только вблизи точки воздействия ударника.

2.2. Метание микрочастиц в цельном контейнере

Использование контейнера для разгона тел позволяет поместить в него как одиночные объекты, так и группу объектов. Особым случаем является задача взаимодействия порошковой смеси из частиц диаметром несколько микрометров с твердой преградой. Сложность организации такого эксперимента состоит в разделении этапа разгона частиц в контейнере и этапа их свободного пролета вдоль баллистической трассы до взаимодействия с преградой. Использование методики разгона тел с разделяющимся контейнером не применима при атмосферном давлении окружающей среды, поскольку критическую роль начинает играть гидродинамическое сопротивление окружающей среды, действующее на легкие микрочастицы. При диаметре частиц менее $100\ \mu\text{m}$ происходит существенное падение их скорости с каждым пройденным сантиметром дистанции. Например, при начальной скорости $2000\ \text{m/s}$ частицы диаметром $100\ \mu\text{m}$ потеряют скорость вдвое через $1.2\ \text{m}$ свободного пролета, а частицы диаметром $10\ \mu\text{m}$ — через $0.12\ \text{m}$. На рис. 7 показана зависимость скорости шарообразных частиц различного

диаметра, движущихся в атмосферном давлении воздуха (рис. 7, *a*) и для частицы диаметром $30\ \mu\text{m}$ при различном давлении окружающего воздуха (рис. 7, *b*). Оценки проводились для случая обтекания отдельной частицы. Из графика видно, что для обеспечения заданной скорости частиц диаметром менее $100\ \mu\text{m}$ необходимо обеспечить либо короткую дистанцию движения микрочастиц после их вылета из объема контейнера, либо снизить давление воздушной среды до величин порядка $1000\ \text{Pa}$ и ниже. Стоит отметить, что при групповом движении микрочастиц образующийся двухфазный поток будет испытывать, вероятно, меньшее газодинамическое сопротивление. Однако при наблюдаемом расширении сверхзвуковой двухфазной струи, состоящей из газа и микрочастиц, все больший вес будет иметь гидродинамическое сопротивление отдельных микрочастиц. Поэтому падение скорости частиц будет все равно существенным, а представленные оценки позволяют рассмотреть влияние размеров частиц и давления окружающей среды на динамику их распространения.

Короткая дистанция пролета микрочастиц может быть реализована при использовании неразделяемого контейнера, останавливаемого с помощью отсекающего устройства непосредственно перед взаимодействием с преградой. Контейнер может иметь форму призмы с углублением, а отсекающий — форму усеченного конуса со сквозным отверстием вдоль оси симметрии. Отсекатель закрепляют в стенке массивной конструкции, установленной на траектории пролета контейнера. Так как отверстие отсекающего имеет диаметр меньше габаритов контейнера, но больше диаметра ускоряемого тела, содержимое контейнера беспрепятственно продолжает свое движение в направлении мишени, в то время как сам контейнер разрушается при ударе об отсекающий. При этом контейнер значительно расходует свою кинетическую энергию, а те осколки контейнера, которым удалось достичь поверхности мишени, не приводят к сколь-нибудь значимым повреждениям ее поверхности. Стадии ускорения и пролета ускоряемых микрочастиц на баллистической трассе представлены на рис. 3, *b* (где

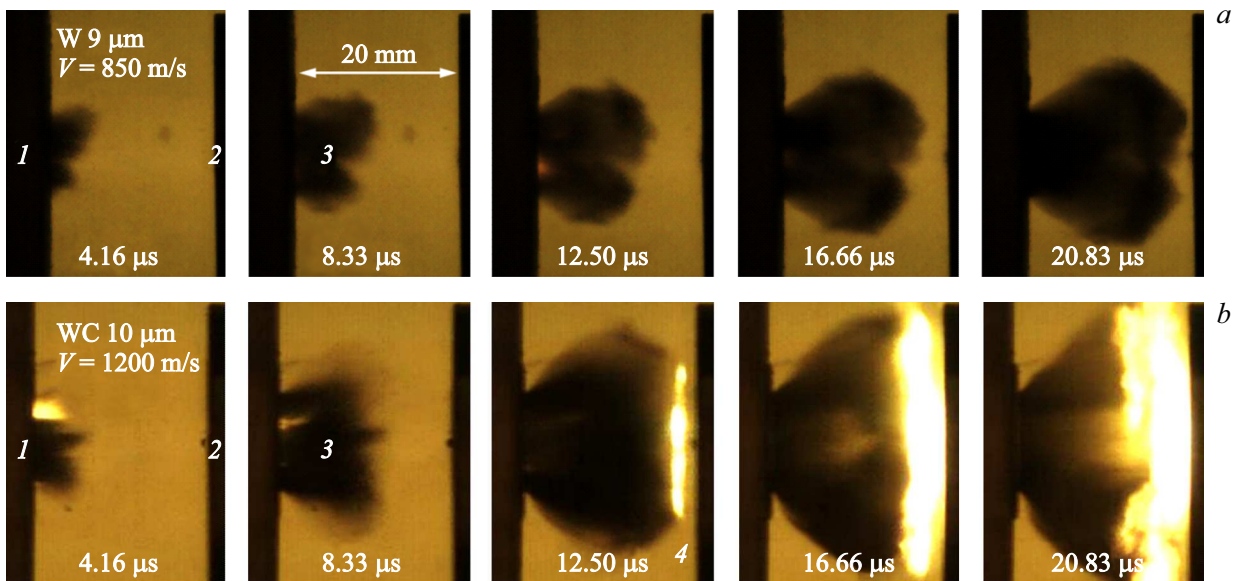


Рис. 8. Вылет микрочастиц из канала отсекаателя [26]: *a* — частицы вольфрама с диаметром около $9\ \mu\text{m}$ и начальной скоростью около $850\ \text{m/s}$; *b* — частицы карбида вольфрама с диаметром около $10\ \mu\text{m}$ и начальной скоростью около $1200\ \text{m/s}$; 1 — отсекаатель, 2 — мишень, 3 — поток микрочастиц, 4 — свечение газа в области взаимодействия с микрочастицами.

I — начальное положение частиц в контейнере, II — разгон контейнера с частицами в канале при давлении на него плазменного поршня, III — фаза пролета контейнера вдоль баллистической трассы с образованием ударно-волновой структуры, IV — разрушение контейнера при его столкновении с отсекаателем и пролет микрочастиц по каналу отсекаателя с последующим взаимодействием с отраженной ударной волной и поверхностью мишени).

Чтобы избежать значительной потери скорости микрочастиц после их вылета из отсекаателя, необходимо расположить мишень на расстоянии нескольких сантиметров [23]. Таким образом, возможно исследовать высокоскоростное взаимодействие множества микрочастиц с преградой, обеспечивая заданную скорость соударения. Однако у данной методики есть ряд особенностей, которые могут отрицательно влиять на качество проводимого эксперимента. Прежде всего, к ним относятся газодинамические ударно-волновые эффекты, возникающие вблизи поверхности мишени [26]. До момента столкновения контейнера с отсекаателем перед ним образуется головной скачок уплотнения, вызванный сжатием газа при движении контейнера со сверхзвуковой скоростью. Сжатие воздуха продолжается и при движении плотного потока микрочастиц в отсекателе, а после выхода из канала образуется сложная ударно-волновая структура (УВС) течения после того, как ударная волна распространяется в направлении преграды и затем отражается от нее. Проходя через границу отраженной ударной волны, передний фронт потока микрочастиц испытывает возросшее сопротивление более плотной окружающей среды. Кроме того, частицы, которые двигались не перпендикулярно фронту ударной волны, отклоняются от своей траектории и либо не достигают поверх-

ности, либо взаимодействуют с ней не по нормали и, следовательно, не эффективно. На рис. 8 показаны кадры скоростной видеосъемки ($240\ \text{kHz}$) вылета микрочастиц вольфрама 3 диаметром около $9\ \mu\text{m}$ из канала отсекаателя 1 в направлении поверхности мишени 2 с начальной скоростью $850\ \text{m/s}$ (рис. 8, *a*) и микрочастиц карбида вольфрама диаметром около $10\ \mu\text{m}$ с начальной скоростью $1200\ \text{m/s}$ (рис. 8, *b*).

Так как частицы двигаются со сверхзвуковой скоростью, их вылет из канала отсекаателя сопровождается распространением ударной волны, которая должна отразиться от поверхности мишени и столкнуться с потоком микрочастиц. При скорости частиц выше $1000\ \text{m/s}$ в экспериментах наблюдалось яркое свечение области 4, расположенной на некотором расстоянии от мишени. Чтобы определить возможные причины данного явления, были проведены оценки происходящих газодинамических процессов и динамики нагрева частиц в одномерном приближении. Установлено, что используемые в работе микрочастицы не успеют прогреться до температуры излучения за время пролета. Однако при скорости частиц $1000\ \text{m/s}$ и выше температура торможения газа на поверхности частиц (определяемая переходом кинетической энергии потока в тепловую), двигающихся в области газа за отраженной ударной волной, составит как минимум $2000\ \text{K}$, что соответствует температуре начала диссоциации молекул азота. Поэтому наблюдаемое свечение вызвано нагревом воздуха при столкновении плотного двухфазного потока с микрочастицами и сжатого газа за фронтом отраженной ударной волны.

Таким образом, при метании частиц в воздушной среде при атмосферном давлении значительную роль

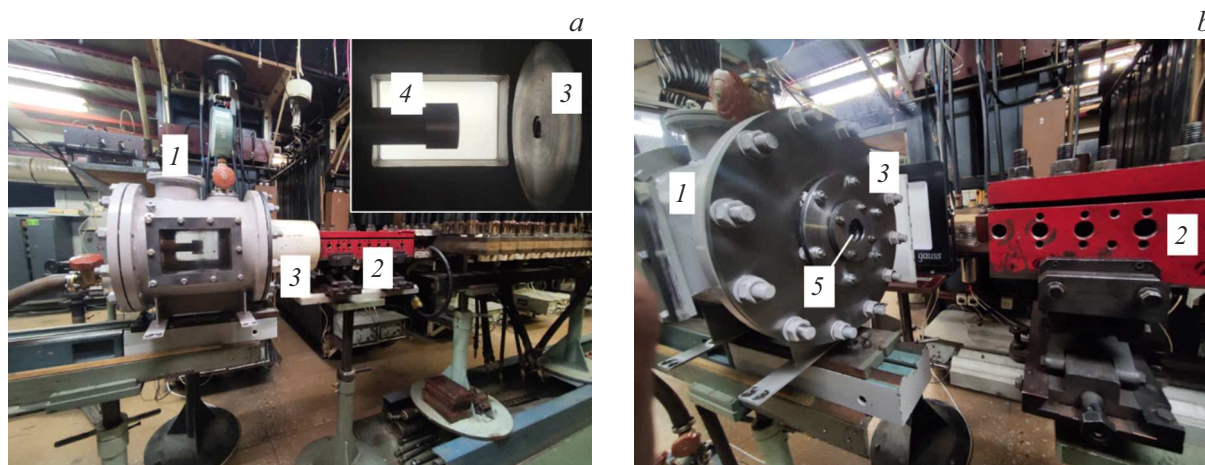


Рис. 9. Вакуумная баллистическая установка на базе рельсотрона. 1 — вакуумная камера, 2 — рельсотрон, 3 — шлюз с отсекателем, 4 — мишень, 5 — мембрана.

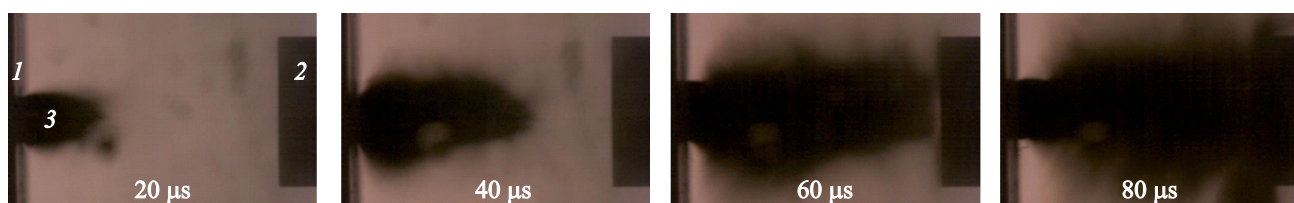


Рис. 10. Вылет микрочастиц из канала отсекателя в направлении мишени при давлении воздуха 0.001 atm. 1 — отсекающий канал, 2 — мишень, 3 — поток микрочастиц.

играют газодинамические процессы, оказывающие существенное влияние на оптическую диагностику ударного взаимодействия частиц с преградой.

3. Разгон микрочастиц при пониженном давлении окружающего воздуха

Очевидно, что возможность увеличения дистанции свободного пролета микрочастиц и минимизации газодинамических потерь требует вакуумирования экспериментального объема, что является технически сложной задачей. Она может быть решена либо помещением экспериментальной установки в вакуумную емкость, либо созданием вакуумной баллистической трассы, к корпусу которой будет герметично присоединен канал рельсотрона. Реализация таких методов требует сложных и дорогих технических решений. В целях снижения стоимости эксперимента был разработан способ ускорения контейнера с порошком при его пролете через небольшую вакуумную камеру, в которой установлена мишень. Общий вид баллистической установки с вакуумной камерой представлен на рис. 9. Схема эксперимента представлена на рис. 3, с.

Вакуумная камера представляет собой цилиндрическую емкость с расположенным в торце шлюзом, про-

летая через который, микрочастицы переходят из атмосферной среды в зону с пониженным давлением. На входе в шлюз располагается тонкая и легкая полимерная диафрагма, способная выдержать внешнее атмосферное давление при откачивании воздуха из рабочей камеры и обеспечить практически беспрепятственный пролет контейнера без существенных потерь скорости в процессе разрушения диафрагмы. За диафрагмой в емкости шлюза располагается отсекающий канал, аналогичный по конструкции с представленным в предыдущей схеме взаимодействия. При столкновении с отсекателем происходит преобразование кинетической энергии контейнера с порошком в энергию деформаций и разрушения. Микрочастицы при этом продолжают свое движение в направлении мишени. Стоит отметить, что по оценкам при перепаде давлений на входе в вакуумную камеру 1:1000 скорость распространения атмосферного воздуха внутри камеры после разрыва диафрагмы составит порядка 800 м/с. Следовательно, при движении контейнера с большей скоростью, повышение давления вблизи мишени стоит ожидать позже момента начала высокоскоростного взаимодействия. На рис. 10 представлены кадры высокоскоростной видеосъемки (100 kHz) процесса распространения микрочастиц карбида вольфрама диаметром около $30\ \mu\text{m}$ в направлении мишени при давлении около 0.001 atm. Мишень выполнена из высокоуглеродистой стали. Скорость микрочастиц составила около 1200 м/с.

Установлено, что форма потока микрочастиц существенно отличается от случая распространения микрочастиц в плотной воздушной среде. Влияние внешних газодинамических процессов на динамику распространения микрочастиц также не наблюдается. Слабое свечение в зоне взаимодействия микрочастиц с мишенью может быть объяснено превращением кинетической энергии частиц в тепловую энергию при значительных деформациях частиц и поверхности мишени в результате ударного взаимодействия.

Реализованный способ взаимодействия может быть использован для моделирования процессов взаимодействия потоков микрочастиц с материалами и покрытиями различной физической природы. В практическом применении данная технология может быть использована для экспериментального моделирования процесса взаимодействия космической пыли и космического мусора с элементами конструкций космических аппаратов.

Заключение

В работе приведены примеры применения рельсового электродинамического ускорителя масс для решения различных междисциплинарных задач. Созданная на базе рельсотрона вакуумная баллистическая установка позволяет проводить экспериментальные исследования стадийности поврежденности (кратерообразование) и перехода к разрушению мишени при высокоскоростном соударении.

Представленные методики разгона объектов в контейнерах позволяют ускорять как одиночные объекты, так и группы объектов размером от десятков микрометров до нескольких миллиметров при различном давлении окружающей среды. При этом начальные свойства объектов остаются неизменными во время ускорения до момента их взаимодействия с мишенью.

В результате испытаний металлокерамических покрытий, создаваемых методами лазерной аддитивной печати, было обнаружено, что в зависимости от типа армирования материала меняется характер кратерообразования, что вероятно связано с неізотропным характером диссипации энергии удара. Показано, что покрытия с наличием керамических волокон обеспечивают более эффективное рассеяние кинетической энергии ударника в объеме образца, чем покрытия с частицами.

В ходе экспериментальных исследований высокоскоростного взаимодействия порошковой смеси из микрочастиц с преградой было показано существенное влияние ударно-волновых процессов на структуру образованного двухфазного течения, что выразилось в свечении газа за отраженной ударной волной до непосредственного взаимодействия частиц с поверхностью мишени.

Создание вакуумной камеры с входным шлюзом позволило реализовать высокоскоростное распространение порошковой смеси из микрочастиц в безвоздушной среде и исключить влияние газодинамических процессов

на процесс их взаимодействия с поверхностью мишени. Разработанная технология может быть использована для экспериментального моделирования процесса взаимодействия космической пыли с элементами конструкций аппаратов в безвоздушной среде.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 21-79-10213 „Разработка научных основ создания металлокерамических композитов методом селективного лазерного плавления с использованием керамических волокон“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Кузьмин, С.И. Герасимов, А.В. Зубанков, А.Г. Сироткина, Е.П. Акашева, Р.В. Герасимова. *ЖТФ*, **89** (8), 1213 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47893.44-19 [V.A. Kuz'min, S.I. Gerasimov, A.V. Zubankov, A.G. Sirotkina, E.P. Akasheva, R.V. Gerasimova. *Tech. Phys.*, **64** (8), 1145 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219080103]
- [2] S. Heimbs, D. Schueler, T. Bergmann, N. Toso-Pentecote. *Composite Structures*, **111** (1), 158 (2014). DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.12.0312014
- [3] Н.Д. Семкин, А.В. Пияков, А.П. Погодин. *Прикладная физика*, **4**, 153 (2018).
- [4] С.А. Атрошенко, А.Ю. Григорьев, Г.Г. Савенков. *ФТТ*, **61** (10), 1738 (2019). DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48242.476 [S.A. Atroshenko, A.Y. Grigor'ev, G.G. Savenkov. *Phys. Solid State*, **61** (10), 1690 (2019). DOI: 10.1134/S106378341910007X]
- [5] V.G. Reyes, W.J. Cantwell. *Compos. Sci. Technol.*, **64** (1), 35 (2004).
- [6] E.I. Kraus, V.M. Fomin, I.I. Shabalin. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **61** (5), 855 (2020).
- [7] В.М. Фомин, А.И. Гулидов, Г.А. Сапожников и др. *Высокоскоростное взаимодействие тел* (Изд-во СО РАН, Новосибирск, 1999)
- [8] Н.А. Златин, А.П. Красильщиков, Г.И. Мишин, Н.Н. Попов. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях* (Наука, М., 1974), 344 с.
- [9] Н.Д. Семкин, К.И. Сухачёв, А.С. Дорофеев. *Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь*, **14** (4), 171 (2015).
- [10] К.И. Сухачёв, Н.Д. Семкин, А.В. Пияков. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, **17** (2), 49 (2014).
- [11] М.П. Галанин, А.Д. Лебедев, А.П. Лотоцкий, К.К. Миляев. *Тепловые и электромагнитные процессы на контактах электродинамического ускорителя* (Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2000), № 42, с. 32.
- [12] В.Б. Железный, А.Д. Лебедев, А.В. Плеханов. *Воздействие на динамику ускорения якоря в РЭУ. II Всесоюзный семинар по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле* (4–6 декабря, Новосибирск, 1991), с. 16–32.

- [13] W. Witt, M. Loffler. *Military Technol.*, 5, 80 (1998).
- [14] С.А. Поняев, Б.И. Резников, Р.О. Куракин, П.А. Попов, Б.Г. Жуков. Письма в ЖТФ, **45** (2), 10 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47214.17550 [S.A. Ponyaev, B.I. Reznikov, R.O. Kurakin, P.A. Popov, B.G. Zhukov. *Tech. Phys. Lett.*, **45** (2), 8 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010322]
- [15] V.E. Fortov, E.F. Lebedev, S.N. Luzganov, A.V. Kozlov, S.A. Medin, A.N. Parshikov, V.P. Polistchook, A.V. Shurupov. *Intern. J. Impact Eng.*, **33**, 254 (2008). DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2006.09.008
- [16] E.F. Lebedev, V.E. Ostashev, V.E. Fortov. *Megagauss Magnetic Field Generation, its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology. EXPLOSIVE MHD GENERATORS* (2004). DOI: 10.1142/9789812702517_0096
- [17] А.Г. Анисимов, А.Д. Матросов, Г.А. Швецов. Прикл. мех. и тех. физика, **43** (3), 39 (2002).
- [18] Э.М. Дробышевский, Э.Н. Колесникова, В.С. Юферев. Письма в ЖТФ, **25** (7), 25 (1999).
- [19] С.В. Бобашев, Б.Г. Жуков, Р.А. Куракин, С.А. Поняев, Б.И. Резников, С.И. Розов. ЖТФ, **80** (12), 45 (2010).
- [20] В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский. *Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках* (Энергоатомиздат, М., 1990)
- [21] А.Н. Григорьев, А.В. Павленко. Письма в ЖТФ, **35** (18), 65 (2009).
- [22] V.M. Fomin, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.A. Filippov, V.S. Shikalov, M.A. Yadrenkin, A.M. Orishich. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **95**, 1773 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02649-x>
- [23] V.M. Fomin, T.A. Brusentseva, A.A. Filippov, M.A. Yadrenkin, P.E. Tyustin. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **95** (7), 1659 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02635-3>
- [24] A. Malikov, A. Golyshev. *Materials*, **16**, 783 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16020783>
- [25] A. Golyshev, A. Malikov, I. Vitoshkin. *Crystals*, **13** (7), 1112 (2023). <https://doi.org/10.3390/cryst13071112>
- [26] M.A. Yadrenkin, R.E. Tyustin. *Features of High-Speed Microparticles Flow Accelerated by Railgun. XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR–2022)* (Novosibirsk, 8–14 Aug. 2022, Abstr. Pt.I. Novosibirsk: SB RAS, 2022), p. 210–211. https://doi.org/10.53954/9785604788967_210