

УДК 534.222.2 (634.454)

КОЛЛЕКТИВНЫЙ РАЗГОН И РЕГИСТРАЦИЯ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ВЗРЫВНОМ ОБЖАТИИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОБЛИЦОВОК ПОЛУСФЕРА — ЦИЛИНДР

С. И. Герасимов^{*,**,***,****}, А. С. Князев^{*,**},
Д. В. Маляров^{*,**}, Б. А. Яненко^{**,****},
Р. В. Герасимова^{**,***}, Е. С. Хорошайло^{**}

* Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Россия

** Саровский физико-технический институт — филиал Национального
исследовательского ядерного университета “МИФИ”, 607186 Саров, Россия

*** Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
115409 Москва, Россия

**** Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева,
603950 Нижний Новгород, Россия

***** Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина,
111250 Москва, Россия

E-mails: s.i.gerasimov@mail.ru, knjazas@gmail.com, dvmal@yandex.ru,
boryanenko@yandex.ru, r.v.gerasimova@mail.ru, horos2018@yandex.ru

Разработана схема получения и регистрации высокоскоростных компактных металлических элементов, движущихся с гиперзвуковыми скоростями, при высокоинтенсивном ударном нагружении. Для этого используются легкогазовая баллистическая установка и схема теневого фотографирования. Применение облицовки полусфера — цилиндр позволило отработать кумулятивный заряд, устойчиво формирующий компактный стальной элемент, движущийся со скоростью, приближенно равной 6 км/с. Приводятся результаты численной и экспериментальной отработки такого разгонного устройства.

Ключевые слова: противометеоритная стойкость, кумулятивный заряд, компактный элемент, ударное нагружение, взрывное метаяющее устройство.

DOI: 10.15372/PMTF20180401

Засорение космического пространства техногенным “мусором”, а также возможность столкновений космических аппаратов с метеоритными частицами обуславливают необходимость защиты приборов и конструкций от высокоскоростного удара компактным эле-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-01096) и в рамках Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”.

© Герасимов С. И., Князев А. С., Маляров Д. В., Яненко Б. А.,
Герасимова Р. В., Хорошайло Е. С., 2018

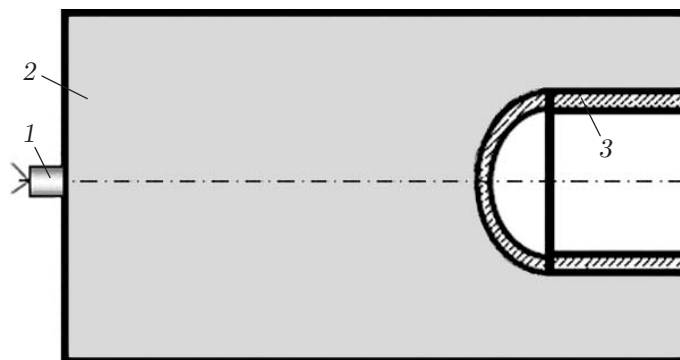


Рис. 1. Схема кумулятивного заряда с комбинированной облицовкой полусфера — цилиндр:
1 — детонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — облицовка

ментом (КЭ) [1, 2]. Определение реакции сложных конструкций при ударе о них частиц, движущихся с космическими скоростями, является сложной задачей, для решения которой не всегда достаточно применения расчетных методов и часто требуется проведение экспериментальных исследований. Для их проведения в наземных условиях используются кумулятивные взрывные метательные устройства, которые при относительной простоте конструкции и небольшой стоимости обеспечивают метание КЭ массой от нескольких долей грамма до нескольких десятков граммов со скоростями более 5 км/с. Особенностью таких устройств является то, что КЭ формируется из головной части кумулятивной струи, поэтому его масса априори неизвестна. Более того, при движении КЭ в воздушной среде с большой скоростью эта величина вследствие горения и абляции может существенно изменяться. Однако для корректного моделирования процесса взаимодействия метеоритно-техногенной частицы с корпусом космического аппарата необходимо достаточно точно определить ее состояние перед ударом. Данная задача еще более усложняется при необходимости создания коллективного воздействия на преграду, когда требуется регистрация каждого отдельного ударника. Таким образом, необходима относительно недорогая компактная взрывная метательная установка, которая позволяет с высокой надежностью получать КЭ с требуемыми массой и скоростью и на основе которой можно осуществить коллективное нагружение при одновременном использовании нескольких метательных установок. Также необходимо иметь отработанную схему регистрации, позволяющую фиксировать состояние каждого КЭ в процессе разгона.

1. Экспериментальная установка. Для коллективного нагружения преграды компактными элементами массой от 15 до 20 г, движущимися со скоростями в диапазоне $5 \div 6$ км/с, использовалась схема взрывного метательного устройства (ВМУ) типа полусфера — цилиндр [3]. Устройство состоит из цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ), в торце которого выполнена полость, имеющая форму полусфера — цилиндр. В эту полость помещена металлическая облицовка аналогичной формы (рис. 1).

При подрыве заряда ВВ облицовка сходится к оси. Из полусферической части облицовки формируется относительно толстая слабоградиентная растягивающаяся кумулятивная струя. Под действием сходящейся цилиндрической части облицовки создается требуемое распределение скорости в струе — безградиентный головной участок и высокоградиентная “шейка”. В результате такого распределения скорости головной участок струи отделяется от растягивающейся и разрушающейся в полете “шейки”, образуя КЭ.

2. Модель процесса и численная схема решения. Для понимания процессов, происходящих при работе ВМУ типа полусфера — цилиндр, а также определения параметров

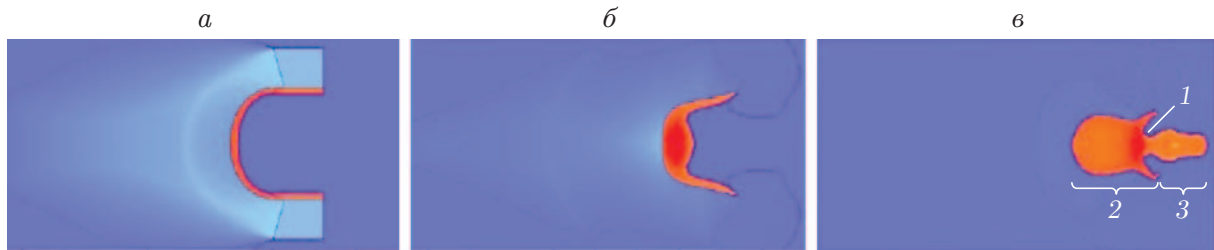


Рис. 2. Результаты численного расчета полей плотности в различные моменты времени: a — $t = 14$ мкс, b — $t = 20$ мкс, v — $t = 28$ мкс; 1 — “шейка”, 2 — пест, 3 — КЭ

формируемого им КЭ проведены двумерные численные исследования с использованием комплекса программ ЭГАК [4, 5]. В комплексе реализованы методики, позволяющие проводить расчеты газо- и гидродинамических течений с учетом физической вязкости, прочностных свойств среды, теплопроводности, детонации ВВ, турбулентного перемешивания, наличия дисперсных примесей, тонких оболочек, магнитного поля и фазовых переходов.

Используется регулярная четырехугольная расчетная сетка, узлы которой при расчете могут двигаться достаточно произвольно. Применение специальных программ дает возможность создавать расчетные сетки, представляющие собой произвольную комбинацию лагранжевых (движущихся со скоростью, равной массовой скорости среды) и эйлеровых (движущихся с произвольной скоростью) сеток. Это позволяет использовать в расчетах сетки, с одной стороны, максимально адаптирующиеся к течению, с другой — не допускающие искажений, приводящих к авостам. В комплексе применяются континуальный подход и непрерывное представление потоков через стороны расчетных ячеек. При этом для предотвращения схемной диффузии (размывания) контактных границ между компонентами в расчетах используется метод концентраций, сформулированный ранее для газодинамических течений [6].

Двумерное численное моделирование рассматриваемых задач проводилось в осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Расчетная сетка была прямоугольной, при этом в зоне облицовки ячейки представляли собой квадраты, а в зоне заряда ВВ — прямоугольники. Минимальные размеры ячейки составляли $h \approx 0,1$ мм и были выбраны в результате тестовых расчетов на сходимость результатов. Задавались следующие граничные условия: на всех границах расчетной области, кроме оси симметрии, — условие вытекания, на оси симметрии — условие абсолютно жесткой стенки.

Для учета упругопластических свойств металлов использовалась расчетная схема Уилкинса [7]. Уравнение состояния материалов задавалось в форме уравнения Ми — Грюнайзена [8]. Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов выбраны из библиотеки программного комплекса. Продукты взрыва заряда ВВ описывались с помощью уравнения состояния Зубарева [9] с параметрами из библиотеки программного комплекса. Разрушение материала происходило при достижении растягивающим напряжением величины откольной прочности. При этом значение откольной прочности принято меньше известных для данных материалов (указанных, например, в [10]) приблизительно на 30 %. Это сделано с целью предотвращения преждевременного разрушения. Результаты визуализации численно полученных полей плотности представлены на рис. 2.

Из результатов расчета следует, что в момент $t = 28$ мкс сформировалась кумулятивная струя с утолщенной головной частью и высокоградиентной растягивающейся “шейкой”, за которой следует массивный низкоскоростной пест (рис. 3). В процессе движения практически безградиентная головная часть струи отделяется от растягивающейся и раз-

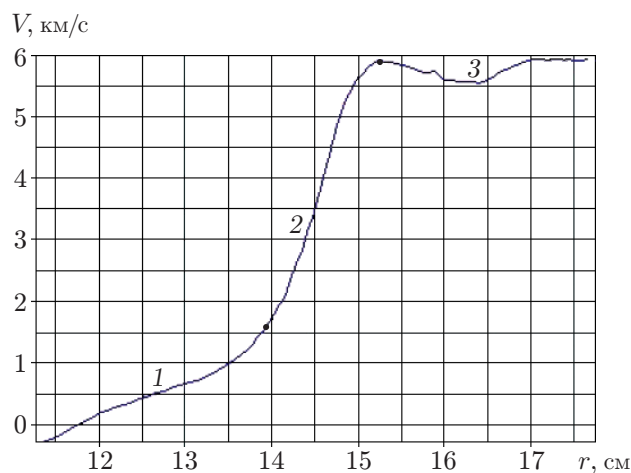


Рис. 3. Распределение скорости кумулятивной струи по оси симметрии в момент $t = 28$ мкс:
1 — пест, 2 — шейка, 3 — КЭ

рушающейся “шейки”, образуя КЭ. Согласно результатам расчета масса КЭ приблизительно равна 17 г, скорость — 5,8 км/с.

3. Экспериментальная отработка установки. Предлагаемая конструкция прошла экспериментальную отработку. Для проведения рентгеновской съемки быстро движущихся объектов непосредственно в воздушной среде разработан переносной импульсный рентгеновский аппарат.

Излучатель аппарата выполнен в виде двухъярусной конструкции, на верхнем ярусе которой расположен высоковольтный блок, а на нижнем — управляемый разрядник и плата схемы управления. Высоковольтный блок аппарата заполнен смесью элегаза и азота, находящегося под давлением 1,5 МПа [11]. Вследствие газовой изоляции в конструкции отсутствует температурный компенсатор, а диапазон значений температуры эксплуатации прибора составляет от -30 до $+50$ °С. Для получения необходимого рентгеновского импульса в рентгеновском аппарате используется импульсная рентгеновская трубка собственной разработки, обеспечивающая безопасную эксплуатацию аппаратов с газовой изоляцией и выдерживающая давление до 3 МПа.

Рентгеновский аппарат имел следующие параметры: рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки — 150 кВ, диаметр фокусного пятна — 2,3 мм, экспозиционная доза рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от анода — не менее 0,15 мР, длительность рентгеновского импульса — не более 7 нс, масса высоковольтного блока — 4 кг.

Данный рентгеновский аппарат позволяет получать теневые картины объектов при фокусном расстоянии до 1 м с использованием рентгеновской пленки с чувствительностью не менее $900 \div 1000 \text{ Р}^{-1}$ и флюоресцентных усиливающих экранов.

Экспериментально подтверждено, что используемое ВМУ формирует стальной КЭ, скорость и масса которого с доверительной вероятностью 0,95 составляют $(5,9 \pm 0,1)$ км/с и (17 ± 1) г.

Для получения из одиночных КЭ осколочного поля необходимо расположить и сориентировать заряды в пространстве определенным образом. С этой целью разработана кассетная установка модульного типа.

Для получения необходимого угла между плоскостью фронта осколочного поля и вектором скорости компактных элементов ВМУ устанавливались на стойках, что позволяло исключить взаимовлияние зарядов. В случае если вектор скорости неперпендикулярен



Рис. 4. Сборка с взрывными метаяющими устройствами (а) и плита-мишень после воздействия поля КЭ (б):
1-9 — ВМУ

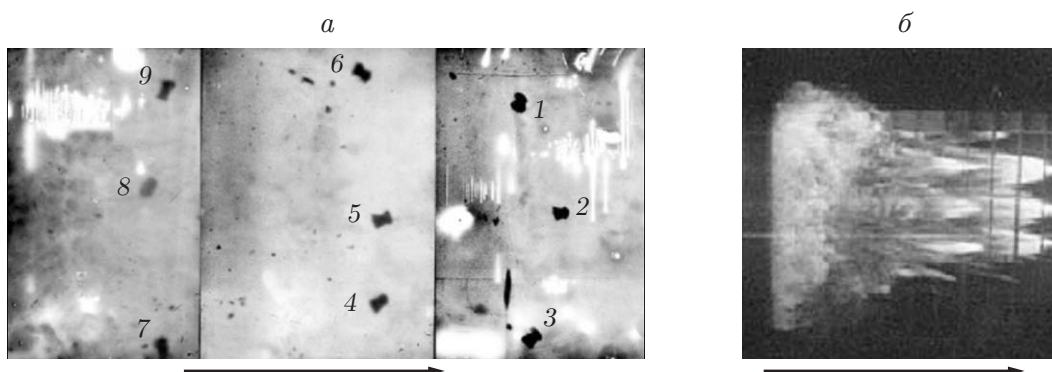


Рис. 5. Характерная рентгенограмма (а) и фрагмент кинограммы (б) поля КЭ:
1-9 — ВМУ; стрелки — направление полета КЭ

фронту поля, “задние” КЭ пролетают через облако, образованное продуктами взрыва “передних” зарядов, в результате чего они могут разрушиться и отклониться от требуемого направления. Стойки ограничивают разлет продуктов взрыва “передних” зарядов и значительно уменьшают их взаимовлияние.

Прицеливание проводилось последовательно для каждого ВМУ с помощью лазерного целеуказателя, вставляемого в облицовку. После завершения прицеливания всех ВМУ в специальные розетки на заднем торце пенопластовой обоймы устанавливались детонаторы, которые затем подключались к подрывной магистрали и взрывались.

На рис. 4 представлена кассетная установка, состоящая из девяти ВМУ, и показан результат воздействия сформированного с ее помощью поля КЭ на плиту-мишень.

При рентгенографировании использовались три кассеты с пленками. Ось рентгенографирования совмещалась с центром средней рентгеновской кассеты и пересекалась с предполагаемой осью полета элемента, формируемого ВМУ 2.

На рис. 5 показаны рентгенограмма и кадр с фотопленки скоростной аналоговой камеры ЖЛВ-2, полученный при съемке в отраженном свете в режиме лупы времени со скоростью 250 000 кадр/с. С использованием полученной рентгенограммы можно определить контуры и оценить углы тангажа компактных элементов, в то время как съемка в

отраженном свете вследствие ионизации воздуха, обтекающего элементы при гиперзвуковых скоростях полета, позволяет оценить их скорость с помощью реперной системы вертикальных полос.

Анализ рентгенограммы показывает, что имеется некоторая “неровность” поля (например, КЭ 1 и 3 отстают от КЭ 2), обусловленная неодновременным инициированием зарядов, неодновременным срабатыванием ВМУ, различием скоростей полета КЭ. Величина этой “неровности” оценивалась по среднеквадратичному отклонению от среднего значения времени прилета КЭ в плоскость, соответствующую плоскости фронта осколочного поля, для чего параллельно плоскости поля элементов устанавливался полиэтиленовый экран с наклеенными на него лавсановыми контактными датчиками.

Среднеквадратичное отклонение времени прилета КЭ в плоскость, параллельную плоскости фронта поля, составило 13 мкс, что соответствует “глубине” осколочного поля, приближенно равной 8 см, при средней скорости КЭ 5,8 км/с.

По рентгенограмме, представленной на рис. 5,а, можно судить также об ориентации КЭ в полете. Видно, что при движении их ориентация меняется, при этом КЭ остаются неразрушенными.

На пути движения КЭ устанавливалась хронографическая база с двумя контактными фольговыми датчиками. По времени их срабатывания определялась скорость КЭ. Скорость определялась также по расстоянию между ВМУ и датчиками на мишени, а также по кинограмме, полученной с помощью камеры ЖЛВ-2 (см. рис. 5,б). Ее значение составило $(5,8 \pm 0,2)$ км/с.

Согласно результатам обработки экспериментальных данных среднее отклонение по углу равно $0,39^\circ$, среднее отклонение от точек прицеливания на базе полета, приближенно равной 4,5 м, составило 30 мм. Направление этого отклонения является случайным и не зависит от положения ВМУ в установке.

Таким образом, экспериментально отработана кассетная установка для получения осколочного поля высокоскоростных компактных поражающих элементов с заданными скоростью, плотностью поля, углом между вектором скорости и плоскостью фронта поля и разработана компактная передвижная рентгеновская установка для получения мгновенной картины полета группы КЭ с гиперзвуковой скоростью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вениаминов С. С.** Космический мусор — угроза человечеству. 2-е изд., испр. и доп. М.: Ин-т косм. исслед. РАН, 2013.
2. **Волков О. В., Горбенко А. В., Шевченко И. В.** Защита российских модулей международной космической станции от техногенных частиц // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1. С. 480–482.
3. **Физика взрыва:** В 2 т. 3-е изд., перераб. / Под ред. П. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.
4. **Янилкин Ю. В., Шанин А. А., Ковалев Н. П. и др.** Комплекс программ ЭГАК для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1993. № 4. С. 69–75.
5. **Торопова Т. А., Янилкин Ю. В.** Методика расчета двумерных течений многокомпонентной среды с учетом прочностных свойств среды // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1994. № 4. С. 58–66.
6. **Бахрах С. М., Глаголева Ю. П., Самигулин М. С. и др.** Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
7. **Уилкинс М. Л.** Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.

8. **Копышев В. П.** О простейшем уравнении состояния твердых тел // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 2002. № 1/2. С. 4–8.
9. **Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.** Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 127–132.
10. **Дерюгин Ю. Н., Могилев В. А., Тарасов И. Б. и др.** Методы взрывного разгона тяжелых крупногабаритных пластин с малыми искажениями плоской поверхности // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2000. С. 238–243.
11. **Авилов Э. А., Балтаков Ф. Н., Завьялов Н. В. и др.** Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та эксперим. физики. 2003. Вып. 5. С. 190–195.

*Поступила в редакцию 27/VI 2017 г.,
в окончательном варианте — 8/IX 2017 г.*
