

УДК 539.42

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ГИПЕРЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИКИ

С. И. Герасимов^{*,**,***,****}, В. И. Ерофеев^{****},
А. Г. Сироткина^{**}, А. В. Зубанков^{*,**}, Р. В. Герасимова^{**}

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

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

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

**** Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН,
603024 Нижний Новгород, Россия
E-mails: s.i.gerasimov@mail.ru, erof.vi@yandex.ru, sag@sarfti.ru,
alex-zub@yandex.ru, r.v.gerasimova@mail.ru

Рассматривается возможность использования измерительных сечений с индукционными датчиками для фиксации во времени гиперзвуковых частиц при моделировании соударения объектов с космическим “мусором”. Предложены методика определения средней скорости гиперзвуковых частиц, моделирующих космический “мусор”, и методика запуска регистрирующей аппаратуры для оптической бесконтактной регистрации этих частиц. Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия частиц с имитатором сеточной экранной защиты космического аппарата.

Ключевые слова: измерительное сечение, гиперзвуковая частица, космический “мусор”, бесконтактный способ, высокоскоростное соударение.

DOI: 10.15372/PMTF20190406

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач экспериментальной физики является разработка быстрых и надежных методов контроля гиперзвуковых частиц диаметром $1 \div 7$ мм. Такие методы наиболее востребованы при моделировании соударения космического “мусора” с элементами конструкции космического аппарата. В работе [1] рассматривались взаимодействия алюминиевых ударников со стальными сетками со скоростями до 3,5 км/с. Анализ результатов фрагментации ударников на сетке проводился на основе данных исследования морфологии поверхности препятствий.

Для изучения проблемы защиты космического аппарата от космического “мусора” необходимо рассматривать скорости соударения, превышающие 5 км/с, в условиях вакуумирования испытательной камеры. Разгон ударников проводился с использованием легкогазовой пушки на стенде для исследований высокоскоростных соударений [2]. Исследо-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 17-08-01096, 18-29-10073).

© Герасимов С. И., Ерофеев В. И., Сироткина А. Г., Зубанков А. В., Герасимова Р. В., 2019

вალაშ ფრაგმენტაცია უდარნიკოვ ალუმინიუოვო სპლავო მარკო АД1 დიამეტრომ 6,35 მმ ნა სტალური სეტიკო ს აპერტურო 2,0 მმ დიამეტრომ პროვოლოკო 0,5; 0,6; 1,0 მმ.

დღო რეგისტრაციო სოსტოიანი უდარნიკოვ ბედი სოუდარენიო ს სეტიკური ეკრანიო დ პროცესო იო ფრაგმენტაციო ისოლზოვალაშ რენტგენოვსო სემკო.

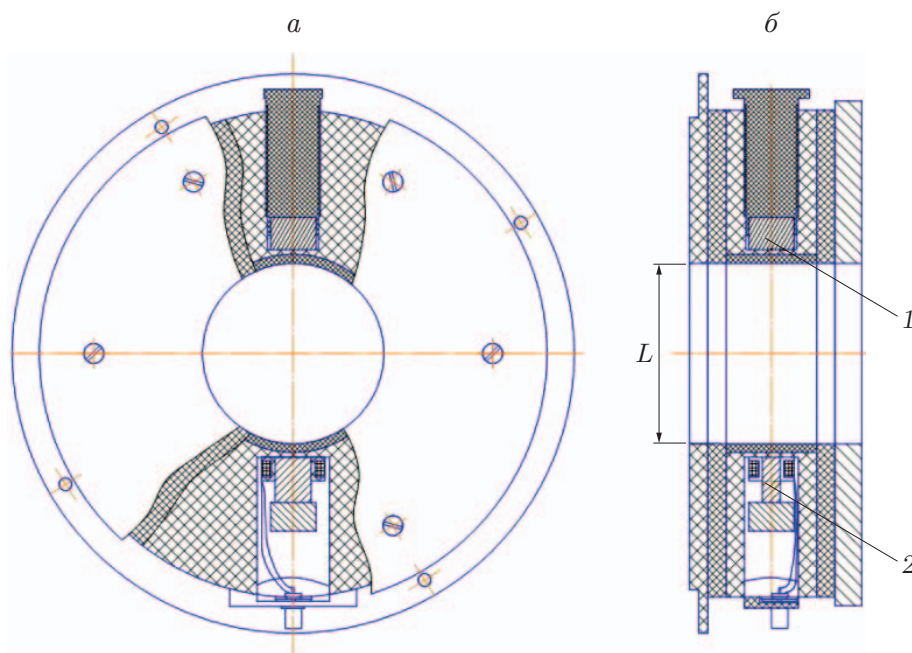
კაკ ბრავილო, ნოვიე ჯადოკო მოდელირავანი სოუდარენიო ბეჯოტო ს კოსმიკური “მოსორომ” ბრებოტო ფიკსაციო ვო ვრემენი ჰიპერსოვოკოვო ჩატიცო, ბედილენიო სრედნიე სოკოროსი დ ჯოპოკო ოპტიკო-ფიზიკური აპარატურო ნა უჩატიკო, ჯდო ნე დოპოუსკაეტო ბრენიენიე კონტაქტური დატიკოვო.

დღო რეშენიო ბოსტაბლენიო ჯადოკო რაზბოტანი იზმერიტელიე სეჩენიე, ბედილენიოვსოე ვოზმოჟნოტი ნე ბოლოკო ბესკონტაქტური ბედილენიო სრედნიე სოკოროსი ჰიპერსოვოკოვო ჩატიცო, ნო დ ჯოპოკო ოპტიკო-ფიზიკური აპარატურო ვო მომენტი პროლეთი იმი ბლосკოტი იზმერიტელიე სეჩენიე. ბრეიმუჟესოვო ბოლოკო მეთოდიო ჯოკო ინდუქციონური დატიკო იზმერიტელიე სეჩენიე ნე ვნოსოტო ნეობრავიტიე იზმენიენიე ვო ფიზიკური სტრუქტურო ისოლზოვანიე ჰიპერსოვოკოვო ჩატიცო ბრენიენიე ექსპერიმენტიო.

ვო ნოსოთენიე რაბოტიო რასმარბრავოტო მეთოდიკო ბედილენიო სრედნიე სოკოროსი ჰიპერსოვოკოვო ჩატიცო, მოდელირავანიე კოსმიკური “მოსორომ”, მეთოდიკო ჯოპოკო რეგისტრირავანიე აპარატურო დღო ოპტიკური ბესკონტაქტური რეგისტრაციო ეტიე ჩატიცო დ რეზოლტატი ექსპერიმენტიე ისოლზოვანიე ვაიზოდეიქტიე ჩატიცო ს ვოზდუხო დ იმიტატორი სეტიკური ეკრანიე ჯატიტი კოსმიკური აპარატო.

მეთოდიკო ბრენიენიე ექსპერიმენტიე ისოლზოვანიე. ისოლზოვანიე ვო ბლასტი ჰიპერსოვოკოვო აეროდინამიკო ოსოუჟესოვანიე მეთოდიო ბოტსრელა ვოკოკო სოკოროსი ჩატიცო იზ ლეგოგაზოვო ბალისტიკური უსოთოვო ვო ვაკუუმიური ტრაქტი იზმერიტელიე სეჩენიე. ობოიე ვიდი იზმერიტელიე სეჩენიე ბოკანი ნა რის. 1.

ინდუქციონური დატიკო დ ბოსოთანიე მაგნიტი რაზმეჟაოტო სტოკო სოოსო ბრეპოტივი ბრუგ ბრუგო ორთოგონალიე ოსი ბოლეთი ჰიპერსოვოკოვო ჩატიცო ვო ბოდიე იზმერიტელიე სეჩენიე (სმ. რის. 1), ბოკანი ბრენიენიე ბრეიმო-რეგისტრირავანიე კონტური. ვნეშური დიამეტრი ინდუქციონური დატიკო რავენი $D = 25$ მმ, ვნუტრენური — $d = 3$ მმ. ბოსოთანიე მაგნიტი ვოპოლენიე ვო ფორმე ცილინდრი, იზოტოვლენიე იზ მატერიალი NdFeB , ბოლადოე-



რის. 1. ობოიე ვიდი (ა) დ ვიდი სბოკო (ბ) იზმერიტელიე სეჩენიე:
1 — ბოსოთანიე მაგნიტი NdFeB , 2 — ინდუქციონური დატიკო



Рис. 2. Измерительный участок:

1 — ИС1, 2 — ИС2, 3 — рентгеновский аппарат (РА)

го максимальной остаточной индукцией и коэрцитивной силой. Диаметр магнита равен $d_1 = 25$ мм, высота $h = 70$ мм, рабочий зазор измерительного сечения (между датчиком и магнитом) составляет 100 мм.

Измерительное сечение ИС1 устанавливается первым, ИС2 — вторым в направлении движения гиперзвуковых частиц на измерительном участке. Измерительный участок показан на рис. 2.

При пролете гиперзвуковой частицей плоскости измерительных сечений происходит изменение начального уровня колебаний в приемно-регистрирующем контуре (изменяется амплитуда ЭДС индукции в индукционных датчиках при изменении магнитного потока Φ магнитного поля \mathbf{B} , созданного постоянными магнитами).

Во всех экспериментах электрические сигналы с индукционных датчиков записываются с помощью цифрового запоминающего осциллографа с дальнейшей обработкой на ЭВМ.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. На рис. 3 представлены зарегистрированные сигналы с измерительных сечений (зависимости напряжения на выходе индукционных датчиков от времени $\varepsilon(t)$).

Анализ представленных на рис. 3 данных показывает, что форма электрических сигналов с индукционных датчиков ИД1 и ИД2 соответствует изменениям магнитного потока $\varepsilon = -\partial\Phi/\partial t$. Сигналы идентичны по форме и длительности, при этом характерные точки A_1 и A_2 на зависимости $\varepsilon(t)$ соответствуют области с максимальным значением магнитного потока магнитного поля (магнитного поля постоянных магнитов, установленных в индукционных сечениях) [3, 4]. Это позволяет измерять время пролета гиперзвуковой частицей плоскостей измерительных сечений. Моментам времени $t_{ИС1}$ и $t_{ИС2}$ соответствуют характерные точки A_1 и A_2 . Интервал времени срабатывания измерительного сечения определялся по формуле $\Delta t = t_{ИС2} - t_{ИС1}$.

Значение скорости частицы при ее пролете через измерительный участок определяется по формуле $v = S/\Delta t$, где S — расстояние между геометрическими центрами индукционных датчиков (фиксированное значение, которое выставляется до проведения опытов).

Однако для определения средней скорости с погрешностью менее 1 %, требуемой методикой, необходима установка измерительных сечений строго ортогонально линии полета

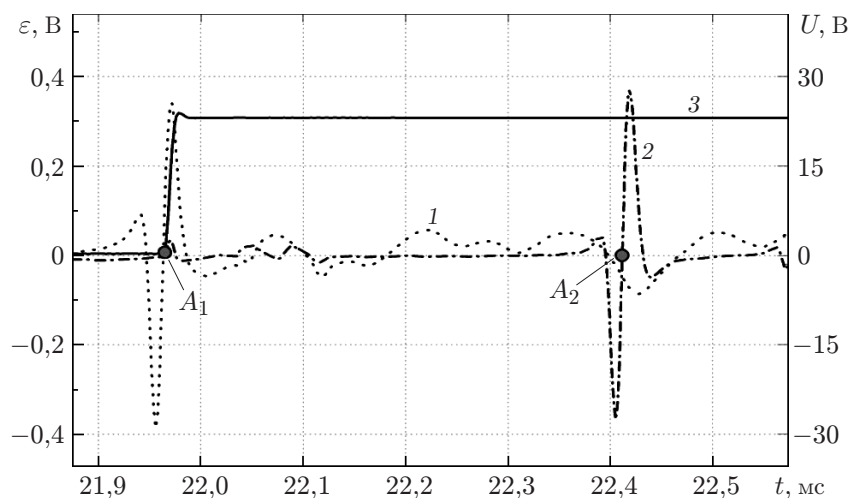


Рис. 3. Зависимости напряжения на выходе индукционных датчиков (1, 2) и генератора нормированных импульсов для запуска РА (3) от времени: 1 — сигнал с ИД1, 2 — сигнал с ИД2, 3 — сигнал, соответствующий запуску РА

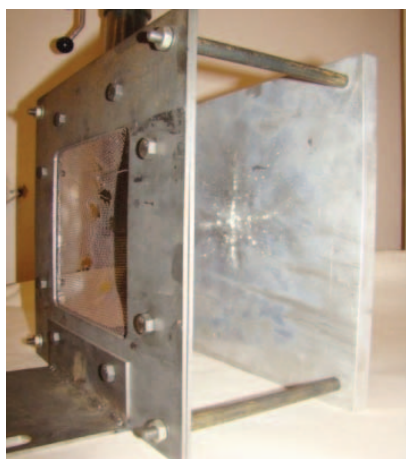


Рис. 4

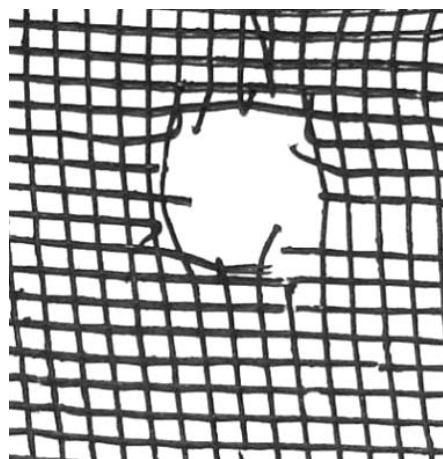


Рис. 5

Рис. 4. Сборка сеточного экрана с пластиной-свидетелем после эксперимента

Рис. 5. Сетка, поврежденная ударником

гиперзвуковых частиц и измерение базы между ними с точностью до 1 мм. Кроме того, на рис. 3 показан сигнал, соответствующий запуску РА и сформированный генератором нормированных импульсов для запуска РА в момент времени, когда частица находилась в плоскости сечения ИС1.

Сборка сеточного экрана с пластиной-свидетелем после проведения эксперимента и сетка, поврежденная ударником (отверстие в сетке диаметром 16 мм), показаны на рис. 4, 5 соответственно. Анализ полученных экспериментальных результатов свидетельствует о своевременности бесконтактного запуска РА от индукционного датчика ИД1. Это означает, что индукционное сечение совместно с генератором нормированного импульса и РА работают как единая синхронизированная система, максимально учитывающая не только времена инерции аппаратуры, но и временные задержки при формировании синхронизирующих сигналов. Следует также отметить, что рентгеновский аппарат и используемая регистрирующая аппаратура запускались в рамках единой временной шкалы.

С помощью методики определения средней скорости с использованием измерительных сечений ИС1 и ИС2, установленных на фиксированном расстоянии друг от друга ($S = 1550$ мм), вычислена скорость полета ударника в вакуумном тракте, составившая 5,81 км/с. На пластине-свидетеле из сплава марки АМг6 повреждения имеют вид восьми цепочек кратеров длиной $45 \div 100$ мм. В геометрическом центре всех повреждений сосредоточено пять крупных кратеров с диаметрами $4,5 \div 5,0$ мм, глубиной центрального кратера, приблизительно равной 6 мм, глубинами периферийных кратеров, приблизительно равными $3 \div 4$ мм. На расстоянии $19 \div 22$ мм от геометрического центра повреждений на цепочках кратеров расположена еще одна группа больших кратеров общим объемом 310 мм^3 . Измеренный общий объем кратеров составил приблизительно 340 мм^3 , что больше, чем в эксперименте, в котором скорость удара была меньше. Таким образом, при увеличении скорости удара кроме интенсификации разрушения ударника происходит перераспределение кинетической энергии между группами фрагментов. Кинетическая энергия центральной группы крупных фрагментов уменьшается, а кинетическая энергия цепочек кратеров увеличивается.

Заключение. Бесконтактный способ запуска рентгеновского аппарата с использованием разработанного измерительного сечения позволяет путем установки его в заданной координате ортогонально линии полета исследуемых гиперзвуковых частиц при постоянной величине индукции магнитного поля $B_0 = 0,48$ Тл регистрировать их скорость и осуществлять рентгенографирование на участках, где не допускается использование контактных датчиков.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что можно определять среднюю скорость гиперзвуковых частиц, имитирующих космический “мусор”, на вакуумированном участке (остаточное давление равно $0,063$ МПа) путем измерения времени их пролета через измерительный участок, заданный бесконтактными измерительными сечениями.

Подтверждено существование предсказанного в работе [1] кумулятивного эффекта, заключающегося в том, что главной особенностью разрушения ударника на дискретном экране является формирование струй фрагментов (для алюминиевых ударников — цепочек фрагментов), движущихся как в направлении движения ударника, так и в поперечных направлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Myagkov N. N., Shumikhin T. A., Bezrukov L. N. Experimental and numerical study of peculiarities at high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers // Intern. J. Impact Engng. 2010. V. 37. P. 980–994.
2. Батьков Ю. В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Ю. В. Батьков, В. А. Борисенко, В. М. Бельский и др. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2003.
3. Чечерников В. И. Магнитные измерения. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1969.
4. Filippov A. V., Rudakova M. A., Skirda V. D. Self-diffusion in a hyaluronic acid-albumin-water system as studied by NMR // Magnetic Resonance Chem. 2012. V. 50, N 2. P. 114–119.

*Поступила в редакцию 23/І 2019 г.,
после доработки — 23/І 2019 г.
Принята к публикации 25/ІІ 2019 г.*