

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 623.5

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ
МЕТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СВОЙСТВ УДАРНО СЖАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

© 2021 С.И. Герасимов^{*,**,**}, В.И. Ерофеев^{***}, И.В. Занегин^{*}, В.А. Кикеев^{***},
А.П. Калмыков^{*}, Е.Г. Косяк^{**}, П.Г. Кузнецов^{**}, Н.В. Лапичев^{*}

**Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия*

***Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров,
Нижегородская обл., Россия*

****Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия*

Описано оборудование баллистического полигона, используемое для исследования физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок. Для изучения свойств ударно-сжатых веществ применялись взрывные генераторы ударных волн на основе мощных конденсированных взрывчатых веществ. Кратко изложены методы разгона используемых ударников в разных режимах метания с пушками различного типа. Приведена методическая отработка в пушечных опытах на легкогазовой пушке, в которых подтверждены условия сохранного разгона ударников в стволах пушек и параметры заряжания последних, обеспечивающие требуемые скорости соударения ударника и мишени. Представлены численные и экспериментальные результаты отработки выбранных режимов метания.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, взрывной генератор, баллистическая установка, легкогазовая пушка, дульный выхлоп.

Поступила в редакцию 18.03.2021

После доработки 30.03.2021

Принята к печати 09.04.2021

Исследование физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок, представляет собой важную научную проблему. В результате ударно-волнового нагружения в материалах возникают как обратимые, так и необратимые физические, физико-химические и механические процессы, среди них – сильное сжатие твердых тел, экстремально высокие температуры в зонах контакта, фазовые превращения, изменение электронной структуры, упрочнение твердых тел в ударных волнах и т.п. [1]

Для изучения свойств ударно-сжатых веществ, в основном, применялись взрывные генераторы ударных волн на основе мощных конденсированных ВВ. Последние позволяют получать скорости движения ударников от 0,3 до 6 км/с и давления в образцах до ~ 200 ГПа для металлов, близких по плотности к железу [1].

Практика работ с генераторами ударных волн плоской геометрии свидетельствует о том, что разновременность выхода фронта ударной волны из экранов, на которые устанавливаются исследуемые образцы, не лучше 0,05 мкс в круге диаметром 40 мм, что и определяет границы «рабочей» области экранов. Такая симметрия выхода ударной волны в настоящее время неудовлетворительна. Это явилось одной из основных предпосылок широкого применения во многих лабораториях метательных систем пушечного типа вместо генераторов ударных волн, основанных на ВВ, например [2, 3]. Ствольные баллистические установки широко применяются в

исследованиях аэродинамических свойств и полей обтекания гиперскоростных моделей на баллистических полигонах [1].

В наиболее совершенных баллистических установках разгон ударника и его соударение с мишенью осуществляется со значительно меньшим перекосом, чем во взрывных генераторах ударных волн.

Существенное преимущество получения ударных волн при помощи нагружения исследуемой мишени ударником, разгоняемым баллистической установкой, состоит в том, что в процессе «плавного», в отличие от взрывных генераторов ударных волн, разгона ударника в пушке практически не изменяется его термодинамическое состояние. Это дает возможность точно определять параметры начального состояния материала ударника и мишени.

Пороховая пушка ПБП-85 и легкогазовая пушка ЛГП-85/23, используемые в экспериментах, представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пушки (вид спереди – сверху): а) – пороховая пушка ПБП-85; б) – легкогазовая пушка ЛГП-85/23 [Cannons (front view – top): a) – PBP-85 powder gun; b) – light gas gun LGP-85/23]

Основные характеристики используемых пушек представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики пушек [Main characteristics of guns]

Тип пушки	Калибр ствола, мм	Длина ствола, м	Масса ударника с поддоном, кг	Скорость метания, км/с
Пороховая пушка ПБП-85	85	7 - 14	0,8	до 2,2
Легкогазовая пушка ЛГП-85/23	23	5 - 10	0,02	до 7

Следует отметить, что пороховая пушка ПБП-85 по своей сути является первой ступенью двухступенчатой легкогазовой пушки ЛГП-85/23.

Пушки оснащены моноблочной зарядной камерой с затвором винтового типа и двухсекционными стволами. Число секций стволов варьируется в зависимости от требуемой скорости разгона ударника. Испытательный комплекс включает в свой состав технологические системы, предназначенные для заполнения легкогазовой пушки рабочим газом (водородом) до давления ~ 10 Мпа и вакуумирования пороховой и легкогазовых пушек и приемных камер до остаточного давления $\sim 1,0$ КПа.

Конструкции метаемых объектов (МО) разрабатывались с учетом реализации требуемых программой испытаний скоростей соударения ударника и мишени, прочности метаемого объекта на этапе его разгона в стволе установки и надежной обтюрации метающих газов. Используемые для исследований свойств ударно сжатых веществ метаемые объекты представляли (рис. 2) собой ударники в виде дисков из алюминиевых сплавов Д16 и АД1, размещаемых на передних торцах поддонов из полиэтилена.

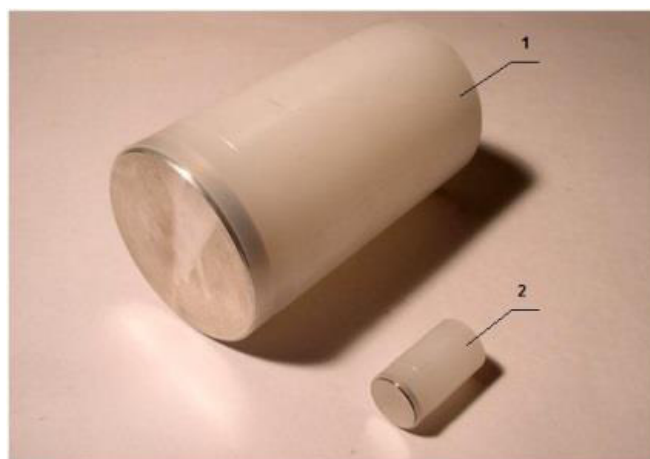


Рисунок 2 – Метаемые объекты для пороховой (1) и легкогазовой (2) пушек [Throwable objects for powder (1) and light gas (2) cannons]

Диаметры ударников были выполнены почти калиберными (83 мм – при калибре ствола 85 мм и 21 мм – при калибре 23 мм), чтобы волны разрежения от их боковых поверхностей не нарушали однородности картины соударения. Поскольку схема проведения эксперимента требует обеспечивать плоскопараллельный подход ударника к исследуемой мишени, лобовая поверхность ударника была обработана методом шлифования для обеспечения ее неплоскостности не хуже 0,01 мм, а сам ударник был размещен в выборке на переднем торце поддона таким образом, чтобы неперпендикулярность его лобовой поверхности боковой поверхности поддона была не хуже 0,02 мм.

Длины поддонов и приемных камер выбиралась из условия, чтобы в момент встречи лобовой поверхности ударника с исследуемой мишенью хвостовая часть поддона еще находилась в стволе. Последнее исключает преднагружение исследуемой мишени метающим газом и обеспечивает плоскопараллельный подход ударника к мишени.

Так как диаметр обтюрирующего пояса поддона превышает диаметр ствола, перед установкой метаемого объекта в ствол пороховой пушки он предварительно выдерживался в холодильной камере при температуре -18°C не менее 15 часов с целью исключения необходимости его запрессовки. За время от момента установки метаемого объекта в ствол до выстрела (≈ 3.5 часа) поддон принимал температуру ствола ($\approx 20^{\circ}\text{C}$).

На рисунке 3 приведена зависимость давления пороховых газов от времени, действующего на метаемый объект в стволе, при реализации скорости метаемого объекта на дульном срезе ~ 2000 м/с.

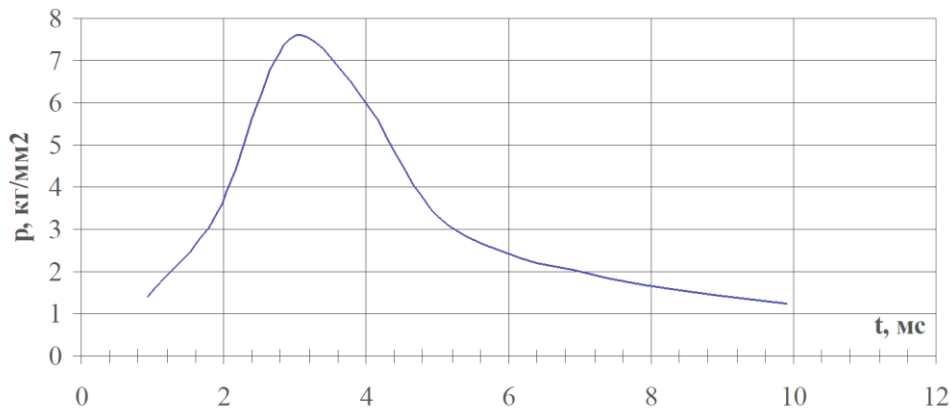


Рисунок 3 – Зависимость давления пороховых газов на метаемый объект от времени при величине дульной скорости ~ 2000 м/с. [Time dependence of the pressure of powder gases on the projectile at a muzzle velocity of ~ 2000 m/s.]

На рисунке 4 представлены графики прогибов f лобовой поверхности ударника по радиусу r в фиксированные моменты времени, соответствующие:

$t_m(p_{max})=2,9$ мс – момент времени максимального нагружения метаемого объекта в стволе пушки;

$t_k=10$ мс – конечный момент времени, предшествующий соударению;

$t_p=8$ мс – промежуточный момент времени ($t(p_{max}) < t < t_k$),

из которых видно, что величины прогибов (упругие деформации) не превышают 0,03 мм при пике нагрузки и 0,01 мм в момент, предшествующий соударению. Причем наибольшие величины прогибов реализуются на краях ударника.

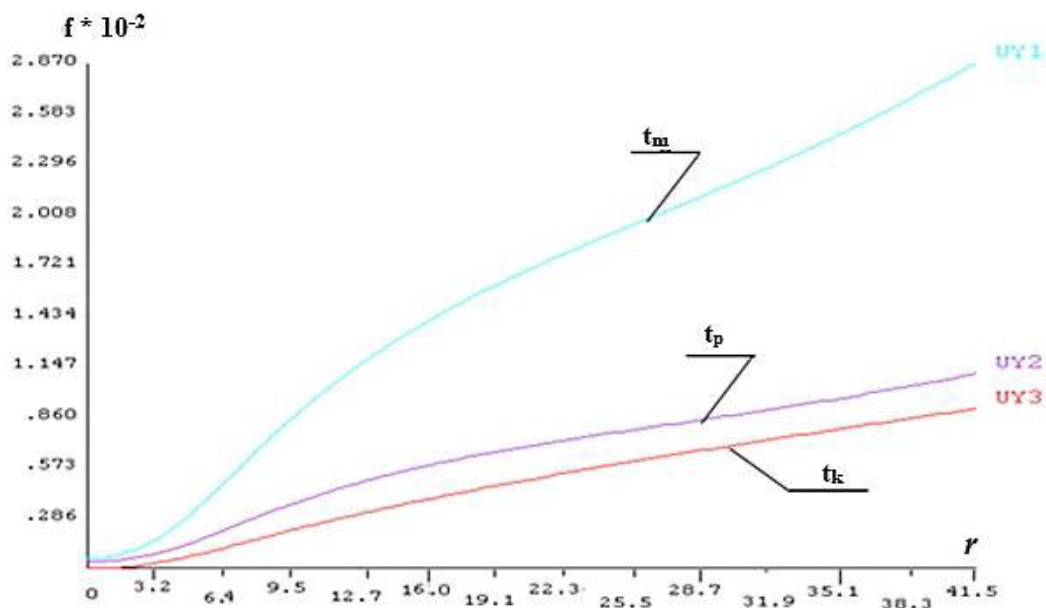


Рисунок 4 – Зависимости прогибов лобовой поверхности ударника от радиуса r для различных моментов времени движения метаемого объекта по каналу ствола пушки [Dependences of the deflections of striker frontal surface on the radius r for different moments of movement time of the projectile along the gun barrel bore]

При проведении ударных и осколочных испытаний с использованием пороховых и легкогазовых пушек объект испытаний, как правило, устанавливается на достаточно большом (5-7 м) расстоянии от дульного среза ствола.

При этом метаемый объект к моменту встречи с объектом испытаний заведомо выходит из дульного выхлопа метающего газа. Это дает возможность использовать для

определения скорости полета метаемого объекта контактных датчиков из металлизированной лавсановой пленки, устанавливаемых на заданном расстоянии (мерной базе) один относительно другого. Величина скорости, определенная на середине мерной базы, экстраполируется в точку удара.

При необходимости проверки точности расчета дульной скорости, измеренная скорость экстраполируется также на дульный срез ствола по той же методике. При этом считается, что движение МО на участке от дульного среза ствола до середины измерительной базы происходит в невозмущенной атмосфере, т.е. влияние дульного выхлопа не учитывается.

Как уже отмечалось выше, для обеспечения плоско-параллельного соударения ударника с исследуемой мишенью мишень устанавливалась в непосредственной близости от дульного среза ствола, и соударение происходило в момент, когда хвостовая часть поддона ещё не вышла из ствола. В этом случае возможность контроля независимым способом скорости соударения, определяемой пересчетом по величине зарегистрированной волновой скорости отсутствует. В связи с этим требовалось обеспечить минимальную погрешность расчета параметров выстрела, для чего перед опытами проводятся методические опыты без мишеней, в которых определялись величины траекторной и дульной скоростей по методике. С использованием полученных результатов уточнялись параметры состояния математической модели процесса выстрела и подбирались параметры заряжания пушки, обеспечивающие требуемые скорости встречи ударников с мишенями.

На рисунке 5 приведены расчеты дульного выхлопа для оценки безопасных расстояний установки регистрирующей аппаратуры в опыте для случая наиболее сильного нагружения.

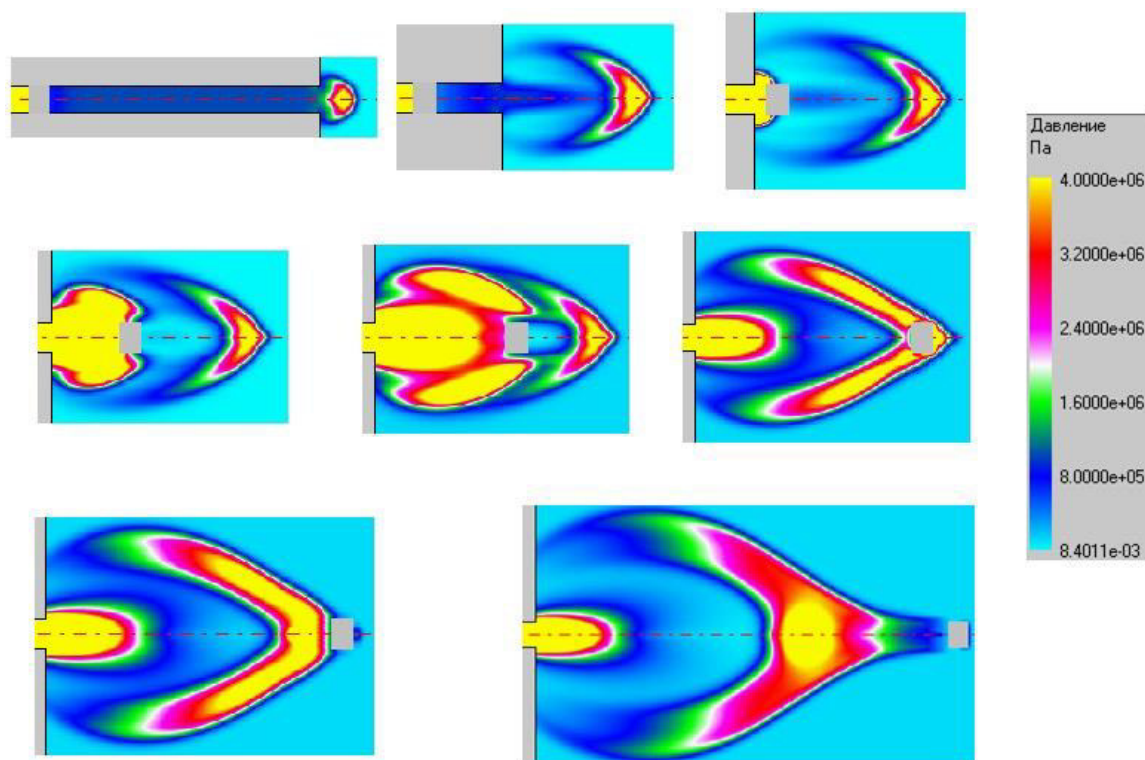


Рисунок 5 – Параметры дульного выхлопа (давление) при выстреле из ЛГП калибра 23 мм со скоростью 7 км/с в атмосферу воздуха ($p_0=1 \cdot 10^5$ Па) на различные моменты времени [Muzzle exhaust parameters (pressure) when fired from a 23 mm LHP at a speed of 7 km / s into the air ($p_0=1 \cdot 10^5$ Pa) at different points in time]

В процессе разгона ударника по стволу пушки непосредственно перед ним формируется газовая «пробка» из находящихся в стволе остатков гелия (остаточное давление в стволе после вакуумирования составляет $\approx 0,001$ МПа) [4]. Датчики давления, расположенные вдоль ствола, регистрируют сначала давление проходящей в их сечениях газовой «пробки», а затем давление пороховых газов, разгоняющих метаемый объект. Давление порохового газа в моменты прохождения МО датчиков изменяется от $\sim 5,8$ до ~ 3 МПа, тогда как давление в газовой пробке в эти моменты не превышает величины $0,018$ МПа. Наличие столь существенного перепада позволяет связать скачок на показаниях датчика давления с моментом прохождения задним торцом метаемого объекта этого датчика.

На рисунке 6 представлены расчетные зависимости давления набегающего потока гелия на метаемый объект в процессе его движения по каналу ствола от координаты и распределения давления в набегающем потоке в различные моменты времени для выстрела с дульной скоростью $V_d=2000$ м/с. При достижении ударником дульного среза давление в газовой пробке достигает $0,018$ МПа, длина ее составляет ~ 3 м.

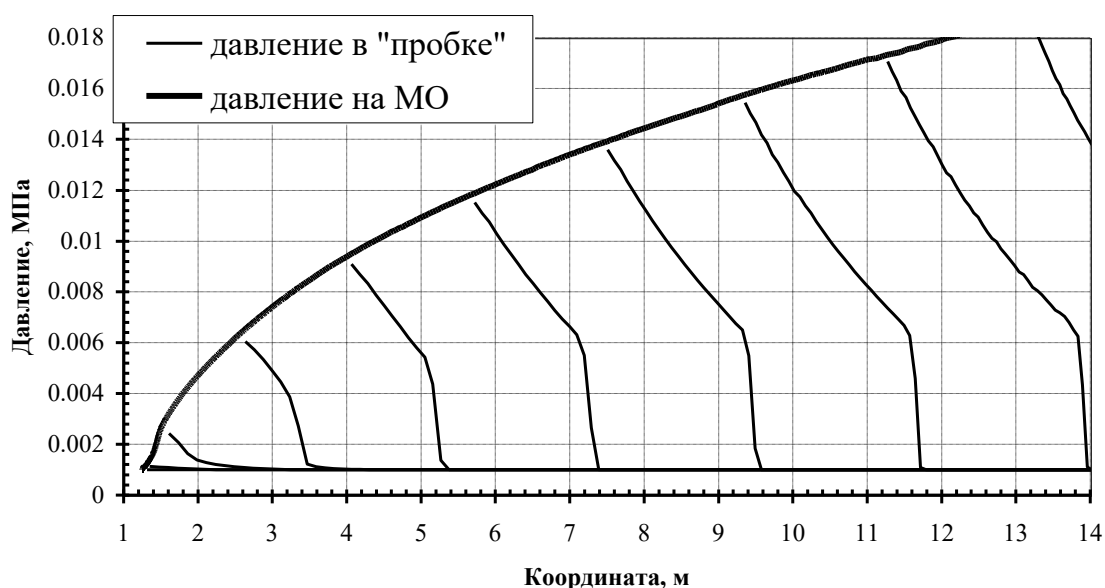


Рисунок 6 – Расчетные зависимости давления набегающего потока гелия на метаемый объект от координаты в процессе его движения по каналу ствола и распределения давления в набегающем потоке в различные моменты времени [Calculated dependences of the pressure of the incoming helium flow on the projectile on the coordinate during its movement along the bore and the pressure distribution in the incoming flow at different times]

В методических опытах отработывался режим выстрела, обеспечивающего скорость соударения ударника с мишенью ~ 2 км/с и сохранность метаемого объекта в канале ствола ПБП-85 при его разгоне.

На дульный срез ствола ПБП-85 устанавливался штатный надульник, позволяющий произвести вакуумирование ствола. Метаемый объект, включающий в себя ударник и поддон, выстреливался в атмосферу.

Определение величины дульной скорости осуществлялось двумя независимыми методами:

- а) с использованием фольговых контактных датчиков, установленных на траектории полета метаемого объекта;
- б) с использованием показаний датчиков давления, установленных в стволе пушки.

Определение скорости полета МО на траектории осуществлялось на расстоянии ~5,8м от дульного среза с помощью контактных датчиков [5, 6], где метаемый объект заведомо выходил из зоны дульного выхлопа. Определение величины дульной скорости V_0 метаемого объекта выполнялось пересчетом траекторной скорости на дульный срез ствола по формуле (1):

$$V_0 = V_1 \cdot e^{k \cdot x_1}, \quad k = \frac{\rho \cdot S_M \cdot c_x}{2 \cdot q_{mo}}, \quad (1)$$

где: V_1 – величина траекторной скорости;

x_1 – координата точки траектории, в которой $V=V_1$;

ρ – плотность воздуха в набегающем потоке;

S_M – площадь миделя метаемого объекта;

c_x – коэффициент лобового сопротивления метаемого объекта;

q_{mo} – масса метаемого объекта.

В таблице 2 представлена информация по параметрам заряжения пушки и величинам дульных скоростей метаемых объектов в двух опытах, определенным расчетно (спрогнозированный режим метания) и экспериментально, с использованием данных внешнетраекторной и внутрибаллистической регистрации.

Таблица 2 – Параметры заряжения пушки и величины дульных скоростей метаемых объектов в двух опытах [Cannon loading parameters and muzzle velocities of projectile objects in two experiments]

№ оп	Пороховой заряд		Глубина установки метаемого объекта, мм	Масса метаемого объекта, г	Дульная скорость, м/с		
	Тип	Масса, г			Расчетная	Определенная по контактным датчикам	Определенная с использованием показаний датчиков давления
1	BT+	1000+	1120	642	2000	2150	2080
2	6/7фл	800	1120	642		2100	2100

Дульные скорости метаемых объектов, определенные по экспериментальным данным внешнетраекторной и внутрибаллистической регистрации в опытах удовлетворительно согласуются между собой.

Состояние метаемого объекта после вылета из ствола контролировалось с применением фотокамеры с электронно-оптическим затвором на расстоянии 7,4 м от дульного среза пушки [7-11]. Повреждения метаемого объекта отсутствовали. На рисунке 7 представлена фотография метаемого объекта на участке свободного полета в опыте 1.

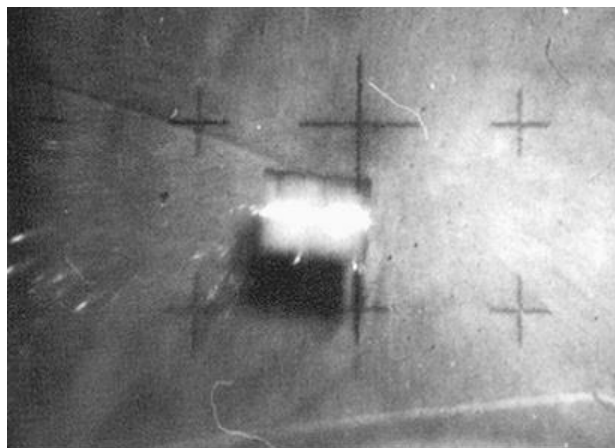


Рисунок 7 – Фотография метаемого объекта за пределами ствола пушки в опыте [Photo of a thrown object outside the barrel of the gun in the experiment]

Состояние метаемого объекта на траектории полета после вылета из ствола контролировалось с помощью рентгеновского аппарата С-150 [12], установленного на расстоянии ~3.8м от дульного среза. Повреждения МО отсутствуют. При этом он имеет значительный угол атаки.

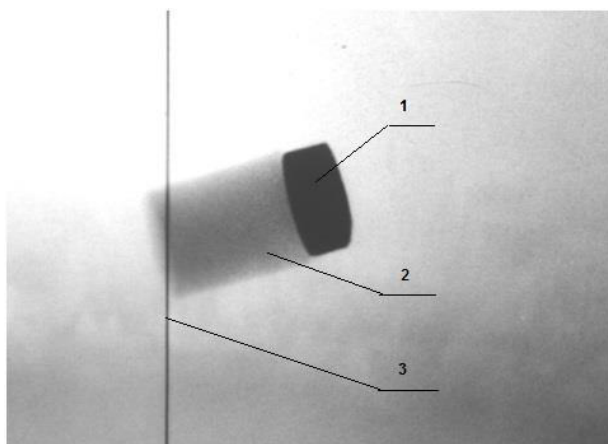


Рисунок 8 – Рентгеновский снимок МО в полете, полученный в методическом опыте: 1 – ударник; 2 – поддон; 3 – отвес [X-ray image of the thrown object in flight, obtained in the methodical experiment: 1 – striker; 2 – pallet; 3 – plumb line]

Проведена методическая отработка в пушечных опытах на легкогазовой пушках, в которых подтверждены условия сохранного разгона ударников в стволах пушек и параметры заряжания последних, обеспечивающие требуемые скорости соударения ударника и мишени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-19-00714).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батьков, Ю.В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках : монография / Ю.В. Батьков, В.А. Борисенок, В.М. Бельский ; под ред. М.В. Жерноклетова. – Саров : ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. – 428 с.
2. Набатов, С.С. Установка для экспериментов с ударными волнами / С.С. Набатов, В.В. Якушев // Проблемы прочности. – 1975. – № 3. – С. 101-102.
3. Митчелл, Неллис Диагностическая система для двухступенчатой легкогазовой пушки Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса / Неллис Митчелл // Приборы для научных исследований. – 1981. – № 3. – С. 14-29.
4. Безопасные условия проведения исследований с баллистическими установками / С.И. Герасимов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 9(714). – С. 105-114.
5. Патент на изобретение RU 2698531 C1 РФ. Способ измерения времени пролета метаемым телом мерной базы и устройство для его осуществления, заявитель и патентообладатель ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. Герасимов С.И., Зубанков А.В., Казаков А.В., Николаев В.А., Шукшин Е.В., опубл. 28.08.2019. Заявка № 2018132908 от 14.09.2018.
6. Патент на изобретение RU 2712371 C1. Регистратор пролета моделью заданного сечения контактного типа, заявитель и патентообладатель ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. Батарев С.В., Герасимов С.И., Лысенков В.Е., опубл. 28.01.2020. Заявка № 2019108715 от 26.03.2019.
7. Теневая схема с селективным диапазоном фоторегистрации в аэродинамических испытаниях / С.И. Герасимов [и др.] // Научная визуализация. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 1-10.
8. Аппаратный комплекс, реализующий схему одновременного получения изображения быстропротекающего процесса в отраженном и проходящем свете / С.И. Герасимов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 5. – С. 88-91.
9. Герасимов, С.И. Теневой фоновый метод – оптический метод исследования ударных волн / С.И. Герасимов, Н.А. Трепалов // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, № 12. – С. 1802-1807.

10. Герасимов, С.И. Условие на скользящем контакте в анализе устойчивости движения ступени на ракетном треке / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.Г. Камчатный, И.А. Одзерихо // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 21-27.
11. Герасимов, С.И. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленные с помощью оптической и рентгенографической регистрации / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Научная визуализация. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 38-44.
12. Рентгенографирование на измерительных комплексах / С.И. Герасимов [и др.] // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 1-20.

REFERENCES

- [1] Batkov Yu.V., Borisenok V.A., Belsky V.M. Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh : monografiya [Methods of Studying the Properties of Materials Under Intense Dynamic Loads: monograph]. Pod red. M.V. Zhernokletova [Edited by M. V. Zhernokletov]. Sarov: FSUE RFNC-VNIIEF, 2005. 428 c. (in Russian).
- [2] Nabatov S.S., Yakushev V.V. Installation for experiments with shock waves [Ustanovka dlya eksperimentov s udarnymi volnami]. Problemy prochnosti [Problems of Strength]. 1975. No.3. P.101-102 (in Russian).
- [3] Mitchell, Nellis. Diagnosticheskaya sistema dlya dvukhstupenchatoy legkogazovoy pushki Livermorskoy natsional'noy laboratorii im. Lourensa [Diagnostic System for a Two-Stage Light-Gas Gun of the Livermore National Laboratory. Lawrence]. Pribory dlya nauchnykh issledovaniy [Devices for scientific research]. 1981. No.3. P.14-29 (in Russian).
- [4] Gerasimov S.I., Odzericho I.A., Gerasimova R.V., Salnikov A.V., Kalmykov A.P., Yanenko B.A. Bezopasnyye usloviya provedeniya issledovaniy s ballisticheskimi ustanovkami [Safe Conditions for Conducting Research with Ballistic Installations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye [University News. Mechanical Engineering]. 2019. No9(714). P.105-114 (in Russian).
- [5] Sposob izmereniya vremeni proleta metayemym telom mernoj bazy i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya, zayavitel' i patentoobladatel' FGUP RFYATS-VNIIEF [Patent for the Invention RU 2698531 C1 of the Russian Federation. A Method of Measuring the Time of Flight by a Throwing Body of Measuring Base and Device for its Implementation, the Applicant and Patent Holder of the FSUE RFNC-VNIIEF]. Gerasimov S. I., Zubankov A.V., Kazakov A.V., Nikolaev V. A., Shukshin E. V., publ. 28.08.2019. Application No. 2018132908 of 14.09.2018 (in Russian).
- [6] Patent na izobreteniya RU 2712371 C1. Registrator proleta model'yu zadannogo secheniya kontaktnogo tipa, zayavitel' i patentoobladatel' FGUP RFYATS-VNIIEF [Patent for the Invention RU 2712371 C1. The Registrar of the Span with a Model of a Given Section of the Contact Type, the Applicant and Patent Holder of the FSUE RFNC-VNIIEF]. Batarev S. V., Gerasimov S. I., Lysenkov V. E., publ. 28.01.2020. Application No. 2019108715 of 26.03.2019 (in Russian).
- [7] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Kuzmin V.A., Totyshev K.V., Fomkin A.P., Gerasimova R.V. Tenevaya skhema s selektivnym diapazonom fotoregistratsii v aerodinamicheskikh ispytaniyakh [Shadow Scheme with Selective Range of Photoregistration in Aerodynamic Tests]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2019. Vol.11. No.2. P.1-10 (in Russian).
- [8] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Krutik M.I., Totyshev K.V., Kosyak E.G., Kuznetsov P.G., Gerasimova R.V. Apparatnyy kompleks, realizuyushchiy skhemu odnovremennogo polucheniya izobrazheniya bystroprotekayushchego protsessa v otrazhennom i prokhodyashchem svete [Hardware Complex that Implements a Scheme for Simultaneously Obtaining Images of a Fast-Flowing Process in Reflected and Transmitted Light]. Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Techniques of Experiment]. 2020. No.5. P.88-91 (in Russian).
- [9] Gerasimov S.I., Trepalov N.A. Tenevoy fonovyy metod – opticheskiy metod issledovaniya udarnykh voln [Shadow Background Method - an Optical Method of Studying Shock Waves]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]. 2017. Vol.87. No.12. P.1802-1807 (in Russian).
- [10] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatny V.G., Odzericho I.A. Usloviye na skol'zyashchem kontakte v analize ustoychivosti dvizheniya stupeni na raketnom treke [Condition on the Sliding Contact in the Analysis of the Stability of the Movement of the Stage on the Rocket Track]. Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability]. 2018. No.3. P.21-27 (in Russian).
- [11] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Razlichnyye mekhanizmy razrusheniya tel v giperzvukovom potoke, vyvaylennyye s pomoshch'yu opticheskoy i rentgenograficheskoy registratsii [Various Mechanisms of Destruction of Bodies in a Hypersonic Flow, Revealed by

Optical and Radiographic Registration]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2015. Vol.7. No.1. P. 38-44 (in Russian).

- [12] Gerasimov S.I., Zakharov D.V., Zubankov A.V., Kikeev V.A., Polienko G.V., Khoroshailo E.S. Rentgenografirovaniye na izmeritel'nykh kompleksakh [Radiography on Measuring Complexes]. Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]. 2018. Vol.10, No.2. P.1-20 (in Russian).

Possibility of Using Ballistic Missile Launchers in the Study of Shock-Compressed Substance Properties

S.I. Gerasimov^{*,**,***1}, V.I. Erofeev^{***2}, I.V. Zanegin^{*3}, V.A. Kikeev^{***4}, A.P. Kalmykov^{*5},
E.G. Kosyak^{**6}, P.G. Kuznetsov^{**7}, N.V. Lapichev^{*8}

*Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics, 607188 Russia, Sarov, Nizhny Novgorod region, Mir Av., 37

**Sarov Physics and Technical Institute of NRNU «МЕРФИ», 607186 Russia, Nizhny Novgorod region

***Institute of Problems of Mechanical Engineering, 603024 Nizhny Novgorod Russia

E-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

¹ORCID iD: 0000-0002-6850-0816

WOS Researcher ID: L-2727-2016

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6637-5564

e-mail: erf04@mts-nn.ru

³ORCID: 0000-0002-8377-7522

igzanegin@yandex.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-2375-0803

e-mail: vkikeev@mail.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-9689-6838

akalm12@yandex.ru

⁶ORCID: 0000-0001-6291-2396

keg@sarfti.ru

⁷ORCID: 0000-0003-2691-206X

kpg@sarfti.ru

⁸ORCID: 0000-0002-3231-7251

lapich1001@yandex.ru

Abstract – The paper describes ballistic test site equipment used for studying the physical and mechanical properties of materials exposed to intense dynamic loads. To study the properties of shock-compressed substances, explosive shock wave generators based on powerful condensed explosives are used. The methods of dispersal of the used strikers in different throwing modes with different types of guns are briefly described. The methodological development in cannon experiments on light-gas guns is given, in which the conditions of safe acceleration of the strikers in the barrels of the guns and the loading parameters of the latter which provide the required collision speeds of the striker and the target are confirmed. Numerical and experimental results of testing the selected throwing modes are presented.

Keywords: shock-wave loading, explosive generator, ballistic installation, light-gas gun, muzzle exhaust.