

Научная статья

УДК 621.3.07

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187449>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FATHJK>

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА
ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
НА СКОРОСТЬ МЕТАЕМОГО УДАРНИКА**

Э.Г. Синельников , М.В. Житный

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

г. Санкт-Петербург, Россия

 vka@mil.ru

Цитирование: Синельников Э.Г., Житный М.В. Экспериментальное исследование влияния рабочего тела пневматической метательной установки на скорость метаемого ударника // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187449>

Аннотация. В статье представлено экспериментальное исследование возможности использования гелия в качестве рабочего тела вместо воздуха в газодинамической импульсной пневматической пусковой установке (разработка Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского). Установка предназначена для лабораторного моделирования воздействия частиц гелия на конструкции и материалы космических аппаратов на скоростях до 1000 м/с. Метод исследования основан на измерении скорости снарядов рамочным хронографом АСС 0022 «Стрелец» (диапазон до 3000 м/с) при различных давлениях рабочего тела. Для минимизации влияния ведущих устройств подбирался снаряд, соответствующий калибру ствола. Функциональные зависимости скорости от давления определены методом наименьших квадратов. Результаты показывают, что использование гелия обеспечивает более высокие начальные скорости снарядов по сравнению с воздухом, что подтверждает его предпочтительность для данного типа установок.

Ключевые слова: малоразмерная твердая частица, высокоскоростное соударение, легкогазовая установка, рабочее тело

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE WORKING FLUID OF A PNEUMATIC LAUNCHER ON THE VELOCITY OF THE PROJECTILE

E.G. Sinelnikov✉, M.V. Zhitny

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

✉ vka@mil.ru

Citation: Sinelnikov E.G., Zhitny M.V. An experimental study of the effect of the working fluid of a pneumatic launcher on the velocity of the projectile // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187449>

Abstract. The paper presents an experimental study on the replacement of air with helium as the working fluid in a gas-dynamic pulsed pneumatic launcher (developed at the A.F. Mozhaisky Military Space Academy) for laboratory simulation of particle impacts on spacecraft materials. The system enables testing at projectile velocities up to 1000 m/s. Velocity measurements were performed using an ACC 0022 “Strelets” frame chronograph, capable of measuring speeds up to 3000 m/s. To reduce measurement uncertainty caused by leading devices during subcaliber projectile tests, projectiles matching the barrel caliber were used. Functional velocity-pressure relationships for both working fluids were derived via polynomial fitting using the least-squares method. Experimental results show that helium significantly increases the initial projectile velocity compared to air under identical operating conditions. This confirms the technical advantage of helium for use in similar gas-dynamic launch systems.

Keywords: small-sized solid particle, high-speed impact, light-gas system, working fluid

Введение

Обеспечение целостности конструкции космического аппарата (КА) и совокупности элементов различных бортовых комплексов в течение всего срока его активного существования является одним из важных условий его успешного функционирования. При этом одним из факторов, воздействующих на КА в

процессе его функционирования, является загрязнение околоземного космического пространства (ОКП), которое приводит к столкновению частиц космического мусора (КМ) с КА. Так как фрагменты КМ обладают высокими собственными скоростями, то величина относительной скорости в точке столкновения КА и частицы КМ может достигать значений в 13000 – 14000 м/с. В результате их столкновения с поверхностью КА возможно возникновение повреждений как внешних элементов КА (радиационных теплообменников, солнечных батарей, кабелей и пр.), так и нарушения целостности герметичных отсеков или в результате сквозного пробития, или в результате образования трещин. При этом сила удара, вызванная расширяющимся расплавом частицы КМ и материала стенки, распространяясь на компоненты КА, расположенные позади пробитой стенки, может превысить допустимую нагрузку для большинства материалов, из которых изготовлены критичные элементы КА [1, 2].

В то же время для КА наиболее опасны столкновения с малоразмерными твердыми частицами (МТЧ), которые имеют максимальный размер менее 10 мм. Это связано с тем, что достоверное определение орбит данных частиц из-за их малого размера не представляется возможным. Следовательно, маневр уклонения космического аппарата от встречи с такой МТЧ не может быть выполнен в силу непродолжительного временного интервала от момента регистрации МТЧ до момента ее встречи с КА.

Таким образом, в данной ситуации на первый план выходит прочность элементов конструкции КА и их способность эффективно выдерживать высокоскоростное воздействие МТЧ.

Среди известных способов защиты КА от воздействия МТЧ наиболее востребованным является применение защитных экранов и многослойных силовых конструкций. Материалы и размеры этих конструкций выбирают так, чтобы при малых скоростях соударения экран мог противостоять пробивному воздействию МТЧ, а при больших – обеспечить дробление последней на мелкие частицы, исключаящие недопустимые повреждения защищаемого отсека (элемента) КА. Разработка эффективных экранов невозможна без проведения экспериментальных исследований высокоскоростного соударения МТЧ с

имитаторами элементов КА. К комплексам, решающим данную задачу, предъявляется ряд требований, одним из которых является обеспечение требуемой скорости столкновения МТЧ с исследуемыми образцами [3].

Как было указано выше диапазон скоростей, при которых происходит соударения ЧКМ с поверхностью космического аппарата достаточно широк. Поэтому для его реализации в лабораторных условиях используют различные метательные установки.

Газодинамическая импульсная пневматическая метательная установка

Для исследования высокоскоростных соударений в лабораторных условиях в Военно-космической академии используется двухступенчатая легкогазовая установка (ЛГУ), входящая в состав экспериментального баллистического комплекса БС-3. Данная установка позволяет обеспечивать скорость МТЧ от 1000 до 5000 м/с путем изменения массы основного заряда или давления предварительной накачки гелия в камере сжатия второй ступени [4].

Однако проведенные исследования показывают, что часть столкновений элементов КА и МТЧ происходит при небольших относительных скоростях соударения, не превышающих значения 1000 м/с. Кроме того, в этом диапазоне находятся значения скоростей МТЧ, образующих запреградное осколочное поле, формирующееся в результате фрагментации МТЧ после их столкновения с защитными экранами КА. Проведение экспериментальных работ по моделированию воздействия МТЧ на элементы КА в таком диапазоне скоростей на экспериментальном баллистическом стенде БС-3 не представляется возможным. Это обусловлено тем, что ЛГУ не позволяет надежно воспроизвести заданное значение скорости МТЧ в серии последовательных экспериментов при необходимости исследования кинетического воздействия со скоростями, не превышающими 1000 м/с.

Поэтому для экспериментального моделирования в лабораторных условиях воздействий МТЧ на конструкции и материалы КА в диапазоне скоростей до 1000 м/с в Военно-космической академии была разработана специальная

газодинамическая импульсная пневматическая метательная установка (далее – установка) [5].

Установка представляет собой конструкцию, главной отличительной особенностью которой является укороченный цикл подготовки к проведению эксперимента и восстановления готовности к повторному его проведению. Упрощенная схема конструкции пневматической установки представлена на рисунке 1.

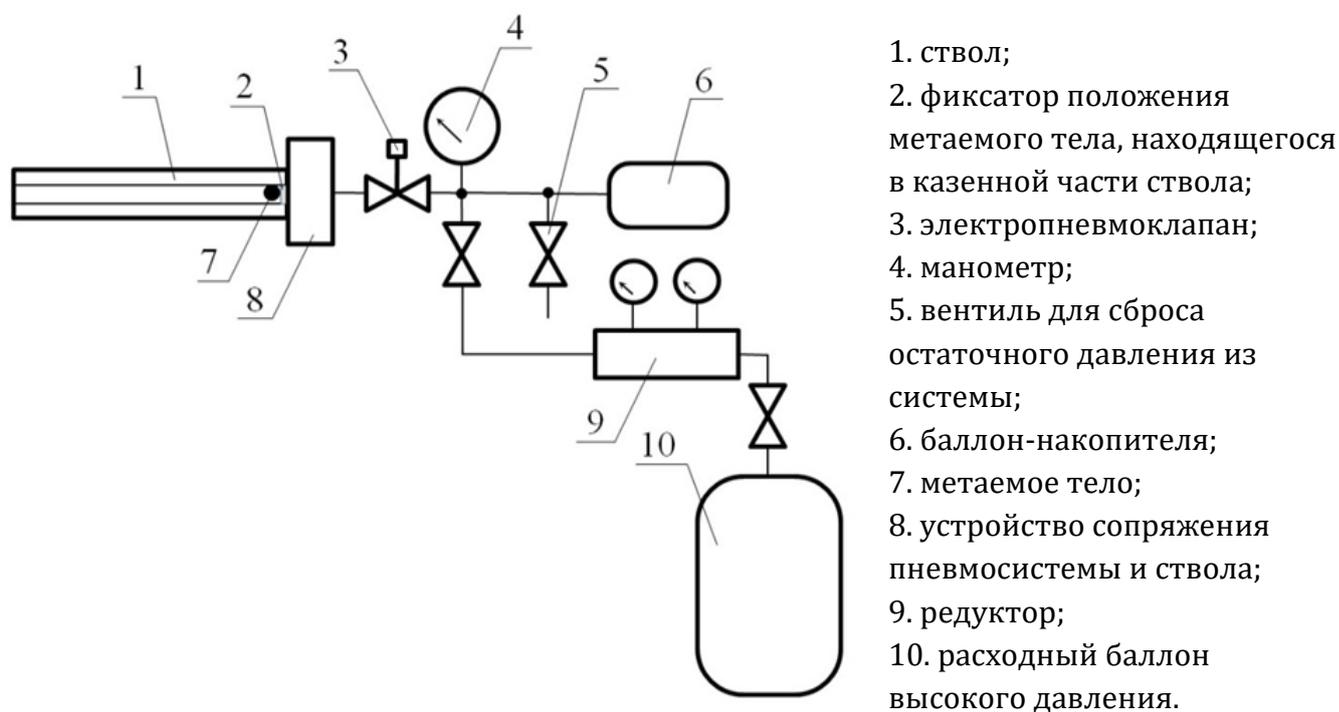


Рисунок 1 – Схема пневматической метательной установки

Поскольку исследование ударного воздействия имитаторов частиц космического мусора требует проведения большого количества экспериментов, то в качестве основного рабочего тела используется воздух. Вместе с тем, использование на данной установке в качестве рабочего тела воздуха приводит к ограничению достижения высоких скоростей метания, что обусловлено различными факторами, в том числе, его большой молекулярной массой.

В настоящей работе изложены результаты исследования возможности использования в качестве рабочего тела вместо воздуха инертного газа гелия.

К основным достоинствам гелия, в части касающейся его использования в качестве рабочего тела, можно отнести следующие:

- относительную дешевизну;
- пожаробезопасность;
- низкую молекулярную массу (примерно в 7 раз меньшую, чем у воздуха, что в свою очередь в теории позволяет осуществить разгон метаемого тела до больших скоростей при тех же начальных условиях).

Экспериментальные исследования проводились при следующих начальных условиях:

- калибр ствола: 7,8 мм;
- форма ударника: шар;
- диаметр ударника: 7,5 мм;
- масса ударника: 1,8 г;
- рабочее тело: сжатый воздух, гелий;
- температура окружающей среды: + 15⁰С;
- атмосферное давление: 750 мм рт. ст.;
- диапазон исследуемых давлений рабочего газа: 10...90 атм.;
- шаг изменения давления рабочего газа: 10 атм.;
- рабочий газ: воздух, гелий;
- баллистическая трасса не вакуумировалась.

Измерение скорости метаемого тела производилось при помощи хронографа рамочного АСС 0022 «Стрелец». Данный хронограф позволяет измерять скорость объекта размером от 3 мм до 3000 м/с.

С целью минимизации влияния ведущих устройств, используемых для обтюрации при применении подкалиберных метаемых тел, выбирался максимально подходящих под калибр используемого ствола размер метаемой МТЧ.

Результаты обработки экспериментальных данных

В результате были получены экспериментальные значения скоростей метаемой МТЧ при различных начальных давлениях рабочего тела в соответствии с параметрами, указанными в начальных условиях.

Полученные данные были обработаны в соответствии с требованиями ГОСТ [6]. В результате обработки, можно сделать вывод о том, что конструкция разработанной установки обеспечивает отклонение значения начальной скорости ударника от требуемого значения, не превышающее 2%.

Для построения функциональных зависимостей изменения скорости метаемого тела от давления рабочего тела на основе метода наименьших квадратов были определены соответствующие полиномы для каждого рабочего тела. Так для гелия полученная зависимость может быть записана следующим образом:

$$V_1 = 154,3 + 3,9753P_1 - 0,0244P_1^2, \quad (1)$$

где V_1 – скорость МТЧ, метаемой гелием; P_1 – давление рабочего тела (гелия)

Значение среднего квадратического отклонения (СКО), которое характеризует ошибку аппроксимации, и которая включает как случайную ошибку измерений, так и ошибку, обусловленную неадекватностью модели (т.е. несоответствием выбранной степени полинома настоящему виду зависимости), для случая использования в качестве рабочего тела гелия составляет 10,3 м/с при уровне надежности 95%.

Для случая, когда в качестве рабочего тела используется воздух, соответствующая полиномиальная зависимость может быть записана в виде следующего выражения:

$$V_2 = 159,2 + 7,6742P_2 - 0,0543P_2^2, \quad (2)$$

где V_2 – скорость МТЧ, метаемой воздухом; P_2 – давление рабочего тела (воздуха)

Значение СКО, характеризующее ошибки, сопровождающие аппроксимацию для этого случая при уровне надежности 95% составляет 8,2 м/с.

Зависимости, представленные в формулах (1) и (2) справедливы только для установки и начальных условий, описываемых в данной статье.

Соответствующее графическое представление полученных результатов представлено на рисунке 2.

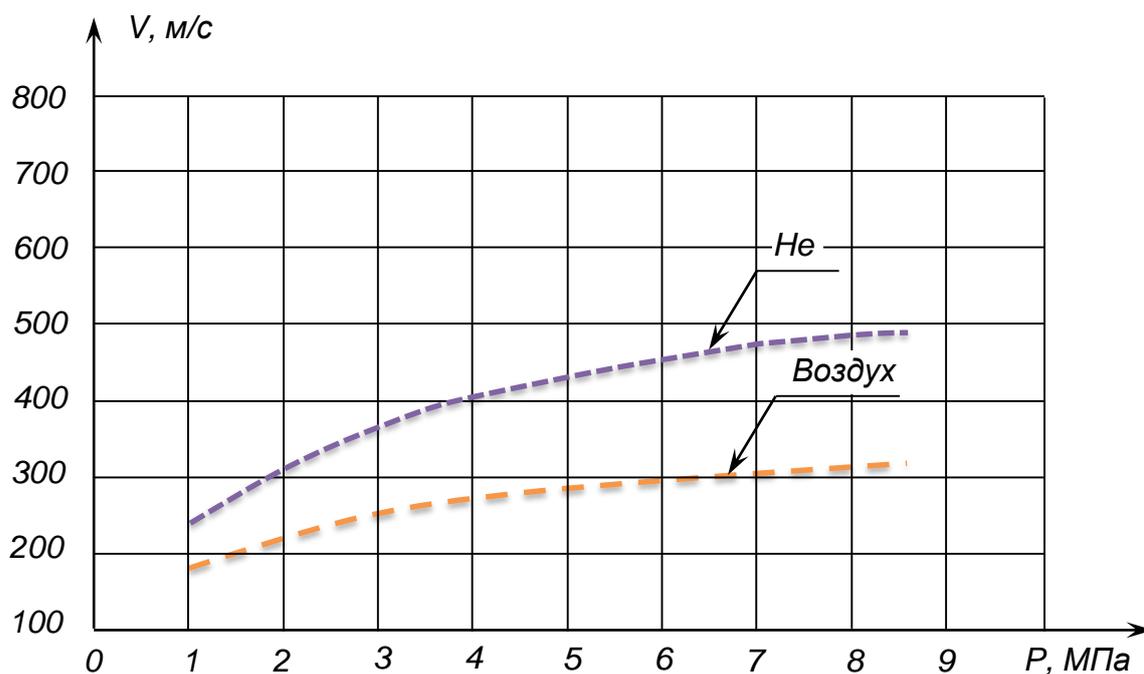


Рисунок 2 - Графическое представление результатов экспериментов

Анализ графиков, представленных на рисунке 2, показывает, что при прочих равных условиях проведения эксперимента, скорость метаемого тела, достигаемая при использовании в качестве рабочего тела гелия, может превышать аналогичную скорость, получаемую при использовании воздуха, в 1,3 ... 1,6 раза. При этом обеспечивается более высокий прирост скорости с ростом давления рабочего тела.

Кроме того, конструкция данной пневматической метательной установки обеспечивает достаточно высокий прирост изменения начальной скорости МТЧ при изменении давления примерно до давления рабочего тела, равного 50 атм. Это обусловлено в первую очередь следующими факторами:

- ограниченный диаметр проходного сечения электропневмоклапана установки, не позволяющий в требуемом объеме реализовать подачу сжатого рабочего тела из сосуда высокого давления в канал ствола установки;
- ограниченное проходное сечение канала ствола установки;
- ограниченная длина ствола, не позволяющая реализовать всю энергию сжатого рабочего тела;

- отсутствие специальных устройств, обеспечивающих создание т.н. давления форсирования;
- повышение сопротивления движению метаемой МТЧ со стороны внешней среды (воздуха) при достижении скоростей, превышающих скорость звука.

Заключение

Результаты, полученные в ходе исследования показывают, что использование гелия при заданной конструкции пневматической метательной установки, входящей в состав экспериментального баллистического комплекса Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, или аналогичных по конструкции устройств, является предпочтительным и обеспечивает достижение более высоких начальных скоростей малоразмерными твердыми частицами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Динамика удара / Д.Зукас [и др.]. М.:Мир. 1985. – 295 с.
2. Гончаров П.С. Результаты экспериментальных исследований высокоскоростного удара по алюминиево-магниевому сплаву / П.С.Гончаров, М.В.Житный // Известия Тульского государственного университета. Вып. 11 Тула: ТулГУ. 2018. – С. 100 – 105.
3. Гончаров П.С. Методика подготовки данных для экспериментальных исследований взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции космического аппарата / П.С.Гончаров, М.В.Житный // Известия Тульского государственного университета. Вып. 11. Ч. 3. Тула: ТулГУ. 2017. – С. 68 –75.

4. Мартынов В.В. Конструкция легкогазовой установки с демпфирующими элементами / В.В.Мартынов, М.В.Житный // Известия Тульского государственного университета. Тула: ТулГУ. 2016. Вып. 12. Ч. 1. С. 124 –131.

5. Синельников Э.Г. Экспериментальная газодинамическая импульсная пневматическая метательная установка / Э.Г.Синельников, М.В.Житный // Сборник материалов XXIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», Санкт-Петербург: С-Пб. 2020. – С. 92 – 95.

6. ГОСТ Р 8.736 – 2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерения. Основные положения. – введ. 13.12.2011. – М.: Стандартиформ, 2013. – 23с.

References

1. Impact Dynamics / D. Zukas et al.]. Moscow: Mir. 1985. – 295 p.

2. Goncharov P.S. Results of Experimental Studies of High-Speed Impact on an Aluminum-Magnesium Alloy / P.S. Goncharov, M.V. Zhitny // Bulletin of Tula State University. Issue 11. Tula: Tula State University. 2018. – pp. 100–105.

3. Goncharov P.S. Methodology for Preparing Data for Experimental Studies of the Interaction of High-Speed Particles with Spacecraft Structural Elements / P.S. Goncharov, M.V. Zhitny // Bulletin of Tula State University. Issue 11. Part 3. Tula: Tula State University. 2017. – P. 68–75.

4. Martynov V.V. Design of a light-gas launcher with damping elements / V.V. Martynov, M.V. Zhitny // Bulletin of Tula State University. Tula: Tula State University. 2016. Issue 12. Part 1. P. 124–131.

5. Sinelnikov E.G. Experimental gas-dynamic pulsed pneumatic launcher / E.G. Sinelnikov, M.V. Zhitny // Collection of materials of the XXIII All-Russian scientific and technical conference "Actual problems of protection and security", St. Petersburg: St. Petersburg. 2020. – P. 92–95.

6. GOST R 8.736–2011. Direct multiple measurements. Methods of processing measurement results. Basic provisions. – introduction. 13.12.2011. – М.: Standartinform, 2013. – 23s.

Информация об авторах

Синельников Эдуард Геннадьевич, старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: yka@mil.ru

Житный Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: yka@mil.ru

Information about the authors

Eduard G. Sinelnikov, Senior Researcher, Military Research Institute, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; e-mail: yka@mil.ru

Mikhail V. Zhitny, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Military Research Institute, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; e-mail: yka@mil.ru

Получено 14 октября 2025 ● Принято к публикации 25 ноября 2025 ● Опубликовано 27 февраля 2026
Received 14 October 2025 ● Accepted 25 November 2025 ● Published 27 February 2026
