

УДК 620.17

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_153

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРОКОНИЧЕСКОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИМИТАТОРОВ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

STUDY OF CYLINDRICAL-CONICAL GAS GENERATOR ACCELERATOR OF SPACE DEBRIS PARTICLES

Канд. техн. наук М.В. Житный, Э.Г. Синельников

Ph.D. M.V. Zhitniy, E.G. Sinelnikov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье рассмотрены результаты моделирования процесса функционирования взрывного газогенераторного ускорителя, проведенного в интересах исследования влияния исходного положения имитатора частицы космического мусора на достигаемую им скорость через заданный промежуток времени. Рассмотрены различные случаи исходного расположения имитатора частицы космического мусора относительно среза газогенератора. Показаны зависимости изменения скорости имитатора от времени. Рассмотрено влияние формы конической части газогенератора на конечную скорость имитатора. Полученные результаты могут использоваться для обоснования характеристик газогенераторного ускорителя в целях реализации натурного моделирования высокоскоростного соударения частицы космического мусора и элементов конструкции космического аппарата.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, кумулятивный газогенераторный ускоритель, космический мусор, высокоскоростное соударение.

The article considers the results of modeling the operation of a cumulative gas generator accelerator, conducted in the interests of studying the influence of the initial position of the space debris particle simulator on the velocity achieved by it after a given period of time. Various cases of the initial location of the space debris particle simulator relative to the gas generator section are considered. The dependences of the simulator velocity change on time are shown. The influence of the shape of the conical part of the gas generator on the final velocity of the simulator is considered. The obtained results can be used to justify the characteristics of the cumulative gas generator accelerator for the purpose of implementing a full-scale modeling of a high-speed collision of a space debris particle and elements of the spacecraft design.

Keywords: computer modeling, cumulative gas generator accelerator, space debris, high-speed collision.

Введение

Важной особенностью функционирования любой технической конструкции является воздействие на нее внешних факторов среды. Такое воздействие, в конечном счете, может оказывать

значительное влияние на надежность функционирования технической конструкции и в итоге привести к сокращению времени ее активного существования. Рассматривая космический аппарат (КА), находящийся на орбите, можно констатировать, что в процессе его жизненно-

го цикла на него действуют различные внешние факторы среды, к основным из которых можно отнести следующие [1]:

- вакуум (приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик различных конструкционных материалов и смазок);

- знакопеременные температурные нагрузки, вызванные периодическим нахождением КА как в зоне солнечного излучения, так и в теневой области (приводит к появлению и развитию микротрещин внешних поверхностей элементов конструкции КА);

- поверхностный заряд (приводит к ложному срабатыванию электронных систем, ухудшению характеристик терморегулирующих поверхностей КА, особенно для КА, находящихся на геостационарной орбите);

- невесомость (усложнение работы систем с жидкими рабочими телами, исключение свободного конвективного теплообмена);

- повышенное радиационное воздействие (приводит к возникновению поверхностной эрозии конструкционных материалов, ионизации веществ, изменению характеристик конструкционных материалов).

- кинетическое воздействие твердых частиц техногенного и естественного происхождения.

С учетом активного освоения околоземного пространства в настоящее время оценивание кинетического воздействия частиц техногенного происхождения на элементы КА является важной актуальной практической задачей.

Основные положения

Реализация натурных экспериментов по оцениванию результатов высокоскоростного ударного взаимодействия имитаторов частиц космического мусора (КМ) с элементами конструкции КА, в общем случае основывается на применении следующих видов ускорительных установок:

- пороховые;
- легкогазовые;
- электромагнитные;
- ударные трубы;
- взрывные газогенераторы.

Как показывают исследования, относительная скорость встречи КА с частицей космического мусора может достигать значений, равных 15000 м/с. Достижение таких скоростей с помо-

щью лабораторных ускорительных установок является довольно сложной практической задачей. Так, например, скорость метаемого тела при использовании легкогазовых установок в общем случае ограничивается следующими параметрами установки: длина ствола, объем легкого газа, величина пороховой навески и др. С учетом этого очевидно, что чем выше требуемая скорость метаемого тела, тем более жесткие требования предъявляются к ускорительной установке, приводя, с одной стороны, к увеличению ее размеров, а с другой — к росту стоимости. Аналогичные рассуждения можно провести и для других видов ускорительных установок. Однако отдельно можно выделить ускорительные установки, основанные на применении взрывных газогенераторов. Основной отличительной особенностью таких конструкций является их компактность и относительная простота. Используя различные виды взрывчатых веществ, составляющих основу взрывных газогенераторных ускорителей (ВГУ) и имеющих разные скорости детонации, можно обеспечивать достижение скоростей метаемого тела в достаточно широком диапазоне.

Однако, как показали ранее проведенные исследования [3, 4], на конечную скорость метаемого тела влияет не только конструкция ВГУ (форма и тип взрывчатого вещества (ВВ)), но и первоначальное положение метаемого имитатора КМ относительно среза ВГУ.

Следует отметить, что существует достаточно большое количество видов и схем ВГУ, которые объединяет единый принцип их работы, заключающийся в разгоне метаемого тела продуктами взрывчатого превращения ВВ, которые имеют скорость движения, превышающую 10 000 м/с.

Простейшая схема ВГУ представляет собой формованное в виде цилиндра ВВ, имеющее цилиндрическую выборку по оси симметрии, внутри которой размещено метаемое тело. При этом эффективность действия данной конструкции невысока. Это объясняется следующим обстоятельством. Как показало компьютерное моделирование процесса функционирования данного ВГУ, после инициирования ВВ, входящего в его состав, волна детонации, имеющая скорость распространения выше, чем скорость движения продуктов взрывчатого превращения ВВ, обгоняет метаемое тело, начинающее движение по

цилиндрической выборке. В результате образования продуктов взрывчатого превращения ВВ впереди метаемого тела происходит «перекрытие» канала его движения газообразными массами, что снижает конечную скорость тела.

Для устранения данного недостатка применяются другие схемы ВГУ. Одной из таких схем является схема, имеющая в своей конструкции кроме цилиндрической выборки и коническую.

Основной идеей, положенной в основу данной конструкции ВГУ, является создание искусственной задержки между моментом инициирования заряда ВВ средством инициирования, находящимся в тыльной части ВГУ, и моментом начала взрывчатого превращения ВВ, образующего цилиндрический канал, по которому метаемое тело осуществляет свое движение. Кроме того, такая схема позволяет повысить коэффициент полезного действия генератора за счет того, что большая часть образующихся продуктов взрывчатого превращения ВВ будет воздействовать на метаемое тело, совершающее поступательное движение. В настоящей работе рассмотрены результаты моделирования процесса функционирования такого ВГУ при различном начальном положении метаемого тела. Кроме того, рассмотрено влияние угла конической выборки на рассматриваемый процесс. Общий вид моделируемой схемы цилиндроконического ВГУ представлен на рис. 1.

Моделирование процесса функционирования реализуется в эйлеровой постановке (Eulerian approach). Данный подход рекомендован для применения в случаях наличия больших деформаций (течение газов, жидкостей и т.д.), то есть в тех случаях, где необходимо учитывать движение газа (жидкости), но не требуется отслеживать движение отдельных частиц.

Для уменьшения времени моделирования применялась «четвертная» симметрия, то есть расчетная схема состояла из четверти полной модели. В данном случае применение преграды не

является необходимым условием, влияющим на результаты, однако позволяет корректно задать параметры эйлерова домена. Такой домен в данной расчетной задаче представляет собой фиксированную расчетную область, через которую движется моделируемая среда.

Моделирование проводилось в среде специального программного обеспечения ANSYS Mechanical, а в качестве решателя применялся пакет AUTODYN, который рекомендован для моделирования нестационарных динамических процессов, в том числе детонации и распространения ударных волн [5].

Использовались следующие начальные значения:

- диаметр метаемого тела (имитатора частицы КМ): 2,5 мм;
- материал метаемого тела: structural steel;
- начальная скорость метаемого тела: 0 м/с;
- тип ВВ, используемый в ВГУ: тринитротолуол (ТНТ);
- точка детонации: в донной части заряда;
- полная масса ВВ: 68 г;
- время моделирования: 20 мкс;
- минимальный временной шаг: 10 пикосекунд;
- масштабные факторы домена (scale factors) (X ; Y ; Z): 1,3; 1,0; 1,0.

Моделирование проводилось для множества расстояний (L), характеризующих положение метаемого тела от фронтальной плоскости ВВ, расположенного в тыльной части ВГУ (рис. 1): $L \in \{0; 18; 30; 46\}$. Значение расстояния $L = 46$ мм, соответствует положению метаемого тела на срезе ВГУ.

В табл. 1 представлены значения максимальной скорости метаемого тела (имитатора частицы КМ), зафиксированные в ходе моделирования.

На рис. 2 представлены зависимости изменения скорости метаемого тела от времени для различных его начальных положений.

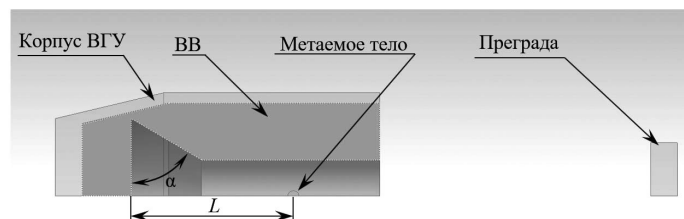


Рис. 1. Схема цилиндроконического ВГУ

Таблица 1

Результаты моделирования

L , мм	t , мкс	V , м/с
0	6,7	720
18	9,1	2472
30	11,0	3104
46	19,0	3250

Анализ графиков, представленных на рис. 2, позволяет заключить, что наиболее выгодным, с точки зрения достижения наибольшей скорости метаемого тела, является его положение на срезе ВГУ. Исследование процесса моделирования позволяет предположить о том, что данный результат обусловлен нижеследующими особенностями процесса. При расположении метаемого тела внутри ВГУ, волна детонации, распространяющаяся от точки инициирования, расположенной в донной части ВГУ, имеет скорость, значительно превышающую скорость метаемого тела. В этом случае образующиеся продукты взрывчатого превращения, расширяясь, перекрывают канал, по которому перемещается метаемое тело, и за счет своей высокой плотности создают для его движения некоторое сопротивление. На рис. 2 для расположения метаемого тела на расстоянии 18 и 30 мм начало этого процесса характеризуется снижением скорости метаемого тела после первого максимума. В дальнейшем, когда продукты взрывчатого превращения расширяются в окружающую среду, снижая тем самым плотность газов, в которых движется метаемое

тело, можно наблюдать некоторое повышение его скорости. Чем ближе метаемое тело находится к срезу ВГУ, тем ниже влияние этого эффекта и тем менее значительно уменьшение скорости метаемого тела. При его расположении на срезе ВГУ данный эффект исчезает.

Другой особенностью, оказывающей влияние на скорость метаемого тела, является форма конической выборки в метательном заряде, задаваемая углом α (рис. 1). Как показали исследования, неверно подобранный угол конической выборки приводит к значительному снижению скорости метаемого тела. Так, например, было проведено моделирование для двух значений угла α , равных 35 и 55 градусов, при одинаковом начальном положении метаемого тела. Динамика изменения скорости метаемого тела для этих начальных условий приведена на рис. 3.

Объяснение такого влияния формы конической выборки на скорость метаемого тела лежит в области развития процесса взрывчатого превращения ВВ. В начальный момент времени после начала инициирования ВВ формируется направленное течение продуктов взрывчатого превращения вдоль оси ВГУ, которые обеспечивают придание начального движения метаемому телу. Однако скорость детонации значительно превышает скорость метаемого тела, приводя к инициированию части ВВ через поверхность конической выборки. Это в свою очередь приводит к образованию продуктов взрывчатого превращения, движущихся, в том числе и по направлению, задаваемому конической выборкой, то есть под

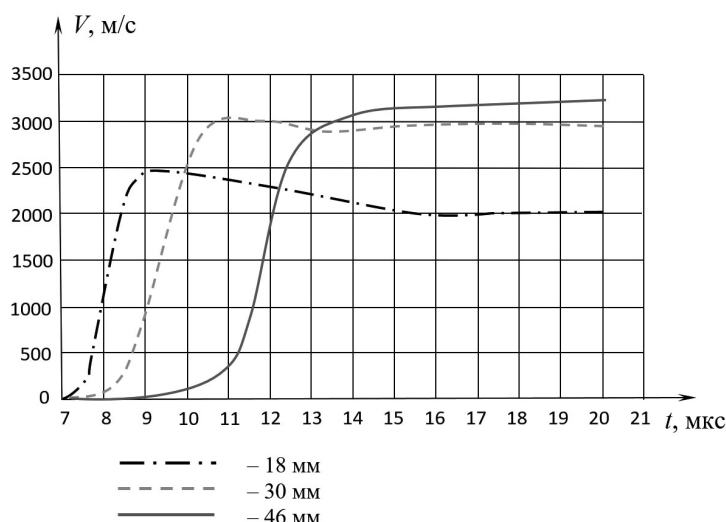


Рис. 2. Изменение скорости метаемого тела при его различном начальном размещении в ВГУ

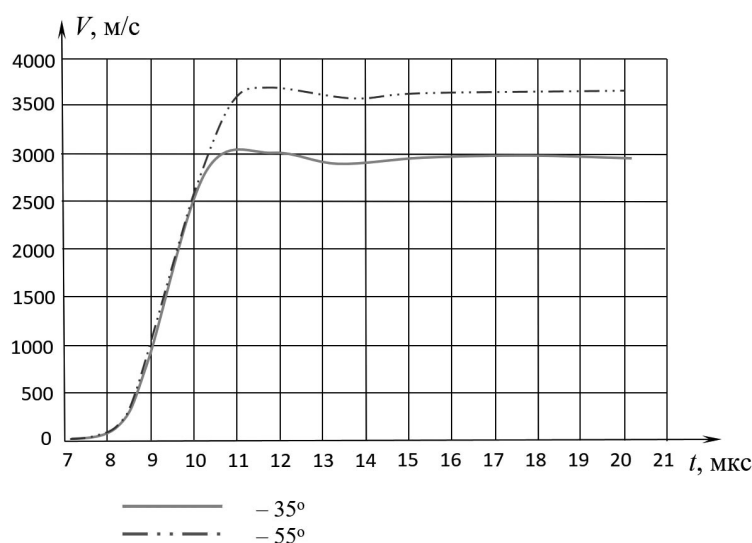


Рис. 3 Влияние формы метательного заряда ВГУ на скорость метаемого тела

углом к направлению движения метаемого тела. В результате происходит процесс блокирования («отсекания») продуктов взрывчатого превращения, первоначально действующих на метаемое тело и, как следствие, снижение эффективности процесса разгона метаемого тела.

Выводы

Таким образом, в результате исследований можно сделать следующие выводы. Оптимальным расположением метаемого тела является положение около среза ВГУ. Форму конической выборки необходимо задавать таким образом, чтобы струя газов, формирующаяся в результате взрывчатого превращения конической части ВВ, не препятствовала первоначальному разгону метаемого тела газами из донной части ВВ, а действовала с некоторой задержкой, обеспечивая дополнительный импульс. Полученные результаты можно использовать при проектировании компактных взрывных газогенераторных устройств.

Список источников

1. Абдурахимов А.А. Основы устройства космических аппаратов. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. 184 с.
2. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. Серия «Механика, управление и автоматика». М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.

3. Вениаминов С.С. Космический мусор — угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2010. 207 с.

4. Гончаров П.С., Житный М.В. Методика подготовки данных для экспериментальных исследований взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции космического аппарата // Известия Тульского государственного университета, 2017. Вып. 11. Ч. 3. С. 68–75.

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

6. Тимофеев Н.М., Гончаров П.С., Денисов А.М., Светлорусов М.М. и др. Экспериментальный баллистический комплекс // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 3–4. С. 120–122.

7. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Златин Н.А. [и др.]. М.: Наука, 1974. 334 с.

8. Экспериментальный баллистический комплекс / А.М. Бабин [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 3–4. С. 120–122.

9. Житный М.В., Синельников Э.Г. Численное моделирование процесса разгона малогабаритной твердой частицы газогенератором с конической выборкой // Известия Тульского государственного университета, 2024. Вып. 8. С. 347–350.

10. Синельников Э.Г., Житный М.В. Исследование газогенератора с цилиндрической облицовкой методом численного моделирования // Известия Тульского государственного университета, 2025. Вып. 1. С. 93–98.

11. Ansys Autodyn [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn> (дата обращения: 05.08.2024).

12. Huei-Huang Lee Finite element simulations with ANSYS Workbench // SDC publications, 580 с.

References

1. Abdurakhimov A.A. Fundamentals of the structure of spacecraft. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2014. 184 p.

2. Nazarenko A.I. Modeling of space debris. Series «Mechanics, control and automation». Moscow: IKI RAS, 2013. 216 p.

3. Veniaminov S.S. Space debris — a threat to humanity. Moscow: IKI RAS, 2010. 207 p.

4. Goncharov P.S., Zhitny M.V. Methodology for preparing data for experimental studies of the interaction of high-speed particles with structural elements of a spacecraft // Bulletin of Tula State University, 2017. Issue 11. Part 3. Pp. 68–75.

5. Martynov V.V., Zhitny M.V. Design of a light-gas installation with damping elements // Bulletin of

Tula State University. Tula: Tula State University. 2016. Issue 12. Part 1. Pp. 124–131.

6. Timofeev N.M., Goncharov P.S., Denisov A.M., Svetlorusov M.M. et al. Experimental ballistic complex // Issues of defense equipment. Series 16. Technical means of counteracting terrorism. 2013. No 3–4. Pp. 120–122.

7. Ballistic installations and their application in experimental research / Zlatin N.A. [et al.]. M: Nauka, 1974. 334 p.

8. Experimental ballistic complex / A.M. Babin [et al.] // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2013. No 3–4. Pp. 120–122.

9. Zhitny M.V., Sinelnikov E.G. Numerical modeling of the process of acceleration of small-sized solid particles by a gas generator with a conical sample // Bulletin of Tula State University, 2024. Issue. 8. Pp. 347–350.

10. Sinelnikov E.G., Zhitny M.V. Study of a gas generator with a cylindrical lining using numerical simulation // Bulletin of Tula State University, 2025. Issue 1. Pp. 93–98.

11. Ansys Autodyn [Electronic resource]. URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn> (date of access: 05.08.2024).

12. Huei-Huang Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench // SDC publications, 580 p.