

*Сарычев С.С.,  
электроэрозионист 4-ого разряда  
АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко»  
Россия, г. Химки*

## **МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА**

***Аннотация:** в статье представлен обзор различных методов улучшения баллистических и механических характеристик гибридного ракетного топлива.*

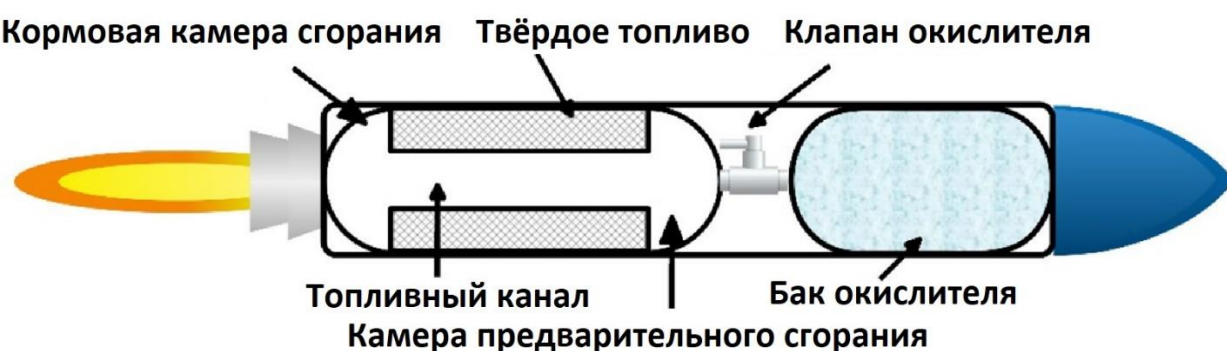
***Ключевые слова:** ракетный двигатель, гибридная ракета, космические аппараты, аэрокосмическая промышленность, ракетостроение.*

***Annotation:** a review of various techniques intended to improve ballistic and mechanical performance of hybrid rocket fuel is presented in this paper.*

***Key words:** rocket engine, hybrid rockets, spacecraft, aerospace industry, rocket science.*

Повышенная безопасность, ограничение тяги, возможность повторного зажигания и меньшая чувствительность к несовершенствам твёрдого топлива – вот несколько преимуществ гибридной ракетной установки, делающих её уникальной среди других двигательных установок. Занять лидирующую позицию не удавалось из-за низкой скорости регрессии и недостаточно приемлемых механических свойств твёрдого топлива, ввиду чего в настоящее время ведутся поиски различных методов улучшения скорости регрессии и механических характеристик твёрдого топлива с целью замены твердотопливных и жидкостных двухкомпонентных ракетных установок гибридными.

Как известно, в силовых установках ракетных двигателей большой тяги используется химическое топливо, которое сжигается в камере сгорания ракеты для создания тяги [1, с. 1]. В гибридной ракете используется как твёрдое, так и жидкое топливо. В зависимости от физического состояния топлива установки можно разделить на два класса: представляющая собой распространённую конфигурацию прямая гибридная система, использующая твёрдое топливо, а также окислитель в виде жидкости (рисунок 1); реверсивная гибридная система, использующая твёрдый окислитель и жидкое горючее [2, с. 14].



**Рисунок 1. Схема гибридной силовой установки [3],**

прим.: перевод с англ. автора

Гибридная ракета имеет ряд преимуществ по сравнению с жидкостными и твердотопливными аналогами и позволяет использовать её для многих целей в космосе. Ракеты с гибридным топливом могут конкурировать в областях применения ракет с жидким и твёрдым топливом благодаря повышенной безопасности, нечувствительности к несовершенствам топливных частиц, модуляции тяги и возможности многократного запуска. Помимо прочего, твёрдое топливо совместимо с любой комбинацией окислителей. Гибридная двигательная установка экономична в производстве и запуске из-за низких затрат на хранение и транспортировку [4, с. 289]. Дополнительным преимуществом является безопасность благодаря низкой взрывоопасности.

Кроме того, гибридные ракеты экологичны благодаря отсутствию хлорида или оксида водорода в сравнении с установками на твёрдом ракетном топливе.

Таким образом, гибридным ракетным двигателям уделяется значительное внимание из-за их потенциальной безопасности, возможности дросселирования и перезапуска по сравнению с твердотопливными ракетными двигателями, и экономичности, простоты и компактности по сравнению с жидкостными ракетными двигателями. Однако для того, чтобы данная технология стала будущим ракет следующего поколения, необходимо устранить некоторые недостатки, такие как низкая скорость регрессии топлива и изменение соотношения окислителя и топлива в процессе сгорания.

Многие исследователи пытались улучшить скорость регрессии классических полимерных видов топлива, используя различные структуры частиц, изменяя схему потока впрыска окислителя, создавая турбулентность или завихрения в камере сгорания и применяя энергетические и металлические добавки к топливу. Однако многие из перечисленных методов повышения производительности улучшили скорость регрессии, но в конечном итоге привели к чрезмерной сложности конструкции двигателя и его производства.

Сгорание с ограниченной диффузией в гибридном ракетном двигателе является причиной низкой скорости регрессии и низкой эффективности сгорания топлива, такого как полибутадиен с концевыми гидроксильными группами, полиметилметакрилат и другие полимерные связующие топлива.

Возможность использования усовершенствованных видов топлива, способных повысить производительность гибридных ракет, частично решает ряд недостатков. К примеру, одним из видов топлива, подходящего для этих целей, является топливо на основе парафина [5]. Твёрдое топливо на основе парафина представляет собой потенциальное решение проблемы низкой регрессии современных твёрдых полимерных топлив.

Твёрдое топливо на основе парафина было определено как альтернатива для дальнейшего улучшения характеристик гибридной ракетной системы, однако оно имеет не лучшие механические свойства, препятствующее его применению для космических целей. Несмотря на низкую механическую прочность, позволяющую выдерживать структурную деформацию во время изготовления частиц, литья, обработки и транспортировки, парафин быстро улетучивается. Кроме того, топливо на основе парафина имеет низкую эффективность сгорания, в результате чего несгоревшие капли парафина выбрасываются через выхлопные форсунки во время горения. Механические характеристики твёрдого топлива на основе парафинов можно улучшить с помощью различных добавок.

Одним из распространённых приёмов повышения эффективности гибридной ракеты является использование диафрагм, выступов или плохообтекаемых тел в камерах сгорания. Механический выступ повышает эффективность сгорания и скорость регрессии, создавая высокий уровень турбулентности в отверстии сгорания. Усиленное перемешивание паров окислителя и топлива улучшает конвекцию от зоны возгорания к поверхности топлива, при этом увеличивается скорость регрессии и полнота сгорания топлива на основе парафинов. Согласно исследованиям, скорость регрессии при использовании диафрагмы увеличилась примерно на 80% по сравнению с результатом, полученным при использовании классической гибридной ракеты [7, с. 5113].

Для успешного решения проблемы низкой скорости регрессии в последние годы были введены и другие модификации, одной из которых является вихревой впрыск окислителя, который используется для создания турбулентности в канале сгорания, улучшая перемешивание окислителя и топлива. Исследования показывают, что вихревой впрыск окислителя улучшает среднюю скорость регрессии твердого топлива до семи раз по сравнению с классической гибридной установкой [6, с. 600-609].

Ещё один способ – использование примесей с высокой энергоёмкостью, высокой плотностью и повышенной реактивностью, который приводит к увеличению скорости регрессии топлива, температуры пламени и, следовательно, удельного импульса и тяги ракеты. Бор, алюминий и бериллий являются высокоэнергетическими добавками, которые могут стать эффективными энергетическими ингредиентами для твёрдого топлива. Бериллий демонстрирует самую высокую энтальпию сгорания, однако при сгорании образуется оксид бериллия, который чрезвычайно токсичен, что препятствует его использованию в гибридной ракете. Из-за высокой теплоты сгорания, высокой плотности и низкого воздействия бора и алюминия на окружающую среду, они считаются многообещающими добавками к топливу гибридных ракет, сохраняя при этом характеристики безопасности и экологичности. Однако добавление бора в качестве примеси требует большого количества кислорода для воспламенения и эффективного сгорания. При сгорании топлива, содержащего металлы, металлические примеси передают тепло за счёт тепловой энергии и повышают реакционную способность окислителя по отношению к твёрдому топливу. Кроме того, металлические добавки используются в процессе горения для подавления колебаний давления [8, с. 4593]. Продукты горения в конденсированной фазе гасят колебания давления горения в камере сгорания.

Основываясь на результатах, обсуждаемых в этой статье, можно сделать вывод о том, что требуется провести дальнейшие более детальные исследования и масштабные тесты, чтобы результаты, полученные в условиях лаборатории, подтвердились при реальных условиях использования гибридных ракет.

#### **Использованные источники:**

1. Гришин А.Н. Устройство и принцип работы жидкостного ракетного двигателя // Аллея науки. – 2021. – № 12 (63). – С. 1.

2. Altman D., Holzman A. Overview and History of Hybrid Rocket Propulsion, Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 2007. – № 218. – С. 14.
3. Pal Y. et al. Review on the Regression Rate-Improvement Techniques and Mechanical Performance of Hybrid Rocket Fuels // FirePhysChem. – 2021.
4. Mazzetti A., Merotto L., Pinarello G. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective // Acta Astronautica. – 2016. – Т. 126. – С. 289.
5. Сарычев С. С. Обзор гибридных ракет с абляционным типом охлаждения // МНПК «Российская наука в современном мире». – Москва, 25 февраля 2022.
6. Knuth W. H. et al. Solid-fuel regression rate behavior of vortex hybrid rocket engines // Journal of Propulsion and power. – 2002. – Т. 18. – № 3. – С. 600-609.
7. Grosse M. Effect of a diaphragm on performance and fuel regression of a laboratory scale hybrid rocket motor using nitrous oxide and paraffin // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2009. – С. 5113.
8. Risha G. et al. Nano-sized aluminum and boron-based solid fuel characterization in a hybrid rocket engine // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference and exhibit. – 2003. – С. 4593.