

*Д. А. Гоза, А. Н. Нестеренко, А. В. Румянцев*

**ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ  
НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОМ МОНОТОПЛИВЕ**

*Экспериментально определены конструктивные элементы лабораторной модели термокаталитического двигателя на экологически чистом монотопливе. Предложенные элементы и детали внедрены в конструкцию лабораторной модели.*



*Structural elements of a laboratory model of thermo engine on clean monopropellant are determined experimentally. The proposed elements and details incorporated into the design of a laboratory model.*

**Ключевые слова:** жидкостные ракетные двигатели малой тяги; термokatалитический двигатель; экологически чистое монотопливо; зеленое топливо; камера сгорания.

**Key words:** low-thrust liquid rocket engine; thermocatalytic thruster; environmentally clean monopropellant; green propellant; combustion chamber.

Жидкостные реактивные двигатели малой тяги (ЖРД МТ) на космических аппаратах служат для их ориентации в пространстве, стабилизации положения и коррекции орбит. Эти двигатели миниатюрны, имеют низкое энергопотребление и работают на монотопливе. Процесс воспламенения топлива происходит при взаимодействии его с предварительно разогретым катализатором, поэтому такие двигатели еще называют термokatалитическими (ТКД). В настоящее время в ТКД в качестве монотоплива применяется гидразин, который является высокотоксичным веществом и относится к первому классу опасности. Разработчик и изготовитель такого класса двигателей — ОКБ «Факел».

Цель работы — определение оптимальных конструктивных элементов для перспективного ТКД на экологически чистом монотопливе.

Перспективное направление в разработке такого двигателя — это применение нового класса монотоплив, которые получили название «зеленое топливо» (ЗТ). Работы по созданию такого монотоплива и двигателя, функционирующего на нем, активно ведутся в Швеции и США [1; 2].

Разработка лабораторной модели перспективного двигателя на «зеленом топливе» не может быть основана на конструктивных решениях, применяемых в штатных ТКД на гидразине по причине физико-химических характеристик топлива: высоких рабочих температур и сильной окислительной среды.

### Обоснование выбора материала камеры сгорания

Как было отмечено, высокие температуры камеры сгорания (КС) при работе двигателя и окислительная среда не позволяют использовать тугоплавкие материалы для создания основы КС. Получающиеся в процессе сгорания пары воды — это сильный окислитель. Так, КС из тугоплавкого тантал-вольфрамового сплава (тантал-вольфрамовая камера) на отжиге при температуре 750 °С полностью окисляется, что показано на рисунке 1.

Хотя тантал-вольфрамовый сплав имеет более высокую температуру плавления, повышенную коррозионную стойкость и механическую прочность, этого оказалось недостаточно для реальных условий эксплуатации. Поэтому от такого конструкционного материала пришлось отказаться. В принципе, на стенки камеры сгорания можно наносить специальное защитное покрытие, которое позволяет предотвратить интенсивное окисление ее поверхности.



Рис. 1. Состояние тантал-вольфрамовой КС до и после отжига на воздухе

В качестве основного материала новой КС был выбран молибден ввиду его высокой температуры плавления (свыше  $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). После изготовления КС ее покрывали защитным покрытием: дисилицидом молибдена  $\text{MoSi}_2$ . На рисунке 2 представлен внешний вид исходной и покрытой камер сгорания.



Рис. 2. Молибденовая КС в исходном состоянии и с защитным дисилицидным покрытием

В процессе огневого функционирования двигателя при повышенных температурах в окислительной среде дисилицидное покрытие преобразуется, на поверхностном слое образуется защитная пленка оксида кремния  $\text{SiO}_2$ , которая не взаимодействует с продуктами сгорания топлива и при этом термически стойкая.

Применение данного технического решения позволяет провести огневые испытания ТКД на ЗТ, но накладывает множество ограничений на конструкцию лабораторной модели двигателя. К этим ограничениям относят:

– контроль над состоянием защитного покрытия КС на всех стадиях сборки лабораторной модели;



- отсутствие острых кромок для предотвращения разрушения сплошности защитного покрытия за счет возникающих термических напряжений;
- невозможность крепления термопар без промежуточных элементов;
- технологические сложности герметичного соединения КС с узлом впрыска.

Последнее обстоятельство обязывает разрабатывать конструкцию разборной модели двигателя. С одной стороны, разборная модель на стадии отработки позволяет заменять пришедшие в негодность элементы лабораторной модели и продолжать испытания, а с другой – ставит вопросы о герметичности разборного соединения. При работе при повышенных температурах в окислительной среде это проблема, требующая большого внимания.

Оптимальным материалом КС могут служить материалы группы платины (платиноиды), которые обладают коррозионной стойкостью к топливу, не реагируют с ним и имеют высокую температуру плавления [3]. Но вопрос об изготовлении камеры из платиноида остается открытым по причине ее дороговизны и выбора оптимальной технологии производства.

#### **Обеспечение герметичности разборного соединения камеры сгорания и узла впрыска**

При выборе камеры сгорания из молибдена с защитным покрытием необходимо организовать герметичное ее соединение с узлом впрыска. При этом актуальной проблемой стоит выбор прокладок, которые могут иметь коррозионную стойкость к топливу и сохранять герметичное соединение при высоких температурах и при высоких давлениях в камере сгорания (до 20,0 кгс/см<sup>2</sup>), а также работоспособность изделия в импульсном режиме работы, т. е. в режиме термоциклирования для уплотняющих прокладок.

Применение известных металлических прокладок не представляется возможным из-за высокой температуры и низкой их стойкости к топливу и продуктам его сгорания. Поэтому для герметизации КС с узлом впрыска был применен материал «графлекс». Такой материал обладает высокой термической, химической стойкостью, минимальной газопроницаемостью, релаксацией напряжений. На рисунке 3 представлен внешний вид прокладок «графлекс».



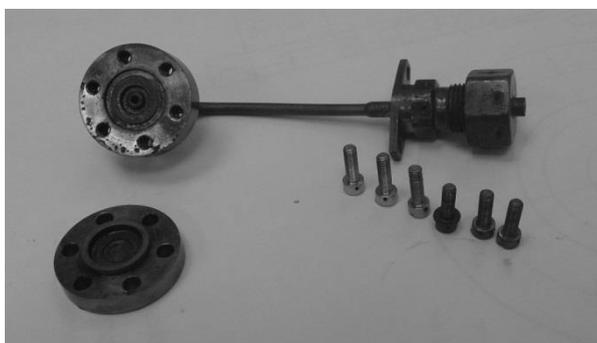
Рис. 3. Внешний вид прокладок «графлекс» для ТКД после испытаний на 3Т



Для подтверждения применения таких прокладок в двигателе было изготовлено разборное соединение для автономных испытаний данного материала, устройство которого показано на рисунке 4.



а



б

Рис. 4. Внешний вид реактора для автономных испытаний прокладок «графлекс»: а – реактор в сборе; б – элементы конструкции реактора

В «замок» закладывались три прокладки, которые обжимали в 3 раза. При давлении в 15 кгс/см<sup>2</sup> подтверждали герметичность этого уплотнения. Уплотнение выдержало пять циклов термоциклирования: нагрев до 800–850 °С в печи в атмосфере воздуха, охлаждение – до комнатной температуры. Данные автономные испытания позволили обосновать возможность применения прокладок «графлекс» для уплотнения ТКД.

#### **Определение эффективного каталитического пакета для разложения и горения экологически чистого монотоплива**

Каталитический пакет двигателя на экологически чистом монотопливе должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к КС и уплотнительным прокладкам, а также обеспечивать высокую эффективность разложения и сгорания рабочего тела при стартовых температурах в диапазоне 300–400 °С. Помимо этого катализатор должен иметь повышенную прочность и быть стойким к термоциклированию.



Применение известных катализаторов не представляется возможным по причине их нестойкости к монотопливу. Зарубежный катализатор Shell-405 во время огневых испытаний спекается, использование брикетированных катализаторов из молибден-рениевой проволоки также невозможно из-за их окисления и выгорания в процессе функционирования двигателя.

Для компоновки каталитического пакета двигателя необходимо применять новые виды брикетированных и гранулированных катализаторов. Гранулированный катализатор должен иметь в своей основе высокотемпературный прочный носитель. Такие носители термически и химически стойки к продуктам сгорания ЗТ, а также имеют развитую пористую структуру для внедрения активной металлической компоненты при изготовлении катализатора. В таблице представлены краткие характеристики одного из образцов носителя.

64

Характеристики носителя

Наименование показателя	Значение показателя
Механическая прочность при раздавливании, МПа	20–75
Водопоглощение, %	20–45
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	4–125
Насыпная плотность, кг/дм <sup>3</sup>	0,9–1,3
Размеры гранул в диаметре, мм	0,80–1,25

Как можно заметить, представленные физико-химические характеристики находятся в широких диапазонах для выбора оптимальных параметров носителя для будущего катализатора.

При изготовлении катализатора в качестве активного компонента можно использовать иридий или сплав платины с родием. Предпочтительным считается иридий, который активно применяется в большинстве известных отечественных и зарубежных катализаторов. Например, зарубежный гранулированный катализатор Shell-405 содержит около 30 % иридия по массе.

Для гранулированного катализатора под ЗТ необходимо выбрать оптимальное соотношение по массе активной компоненты. Невысокое количество активной компоненты, с одной стороны, позволяет изготовлять катализатор с меньшим количеством технологических операций, а с другой – обеспечить разложение монотоплива в начальный момент запуска двигателя при высоких механических характеристиках (низкое пылеобразование, стойкость к термическим напряжениям и т. д.).

Целесообразно применять в конструкции каталитического пакета комбинацию различных катализаторов: гранулированный активный



катализатор будет служить инициатором быстрого разложения рабочего тела, металлический катализатор будет выступать в роли эффективного испарителя продуктов разложения и горения в начале работы двигателя. Предложенные конструктивные элементы (камера сгорания с дисилицидным покрытием, применение уплотнительные прокладок из материала «графлекс», рекомендации по выбору комбинированного каталитического пакета двигателя) позволяют на ранних этапах обработки изделия проводить испытания лабораторной модели термokatалитического двигателя на экологически чистом монотопливе в условиях воздуха.

### Список литературы

65

1. Dyer J., Dinardi A., Anflo K. First Implementation of High Performance green propulsion in a constellation of small satellites // 27<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conference of Small Satellites. SSC13-VII-2.
2. Spores R. A., Masse R., Kimbrel S., McLean C. GRIM AF-M315E Propulsion System // 49<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA. P. 2013 – 3849.
3. Pokrupa N., Anflo K. Spacecraft system level design with regard to incorporation of a new green propulsion system // 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA. P. 2011 – 6129.

### Об авторах

Дмитрий Александрович Гоца — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер-конструктор 2-й категории ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.

E-mail: goza@fakel-russia.com, dgoza@bk.ru

Александр Никитович Нестеренко — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.

E-mail: nesterenko@fakel-russia.com

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru

### About the authors

Dmitrii Goza, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Design-engineer, experimental design bureau "Fakel", Kaliningrad.

E-mail: goza@fakel-russia.com, dgoza@bk.ru

Alexander Nesterenko, PhD, Leading researcher, design bureau "Fakel", Kaliningrad.

E-mail: nesterenko@fakel-russia.com

Dr Albert Rumyantsev, Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: albert37@list.ru