УДК 662.221.11

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СЖИГАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В. А. Архипов¹, А. А. Глазунов¹, Н. Н. Золоторёв^{1,2}, Е. А. Козлов¹, А. Г. Коротких^{1,3}, В. Т. Кузнецов¹, В. И. Трушляков⁴

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, leva@niipmm.tsu.ru

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

³Томский политехнический университет, 634050 Томск

⁴Омский государственный технический университет, 644050 Омск

Представлены результаты экспериментального исследования возможности сжигания отделяющихся и сбрасываемых на поверхность Земли на примере конструкции элементов головного обтекателя ракеты-носителя. Предложена новая схема бессотовой трехслойной конструкции сжигаемых элементов головного обтекателя с использованием заряда высокоэнергетического материала. На основе сформулированных требований к характеристикам заряда и анализа результатов термодинамических расчетов выбраны базовые композиции высокоэнергетических материалов (ВЭМ). Экспериментально определены энергетические и прочностные характеристики выбранных композиций ВЭМ, определены закономерности их горения при субатмосферном давлении. Результаты лабораторных испытаний сгорания элементов рассматриваемых конструкций с зарядом-заполнителем ВЭМ показали возможность частичной утилизации отработанных частей ракеты-носителя.

Ключевые слова: ракета космического назначения, отделяющийся головной обтекатель, сжигание, высокоэнергетические материалы, заряд-заполнитель, органопластик.

DOI 10.15372/FGV2022.9215

ВВЕДЕНИЕ

При запуске ракет космического назначения для выведения полезных нагрузок на активном участке траектории полета от ракетыносителя отделяются выполнившие свои функции элементы конструкции — отработанные ступени двигательной установки, головные обтекатели (ГО), межбаковые и хвостовые отсеки. Головные обтекатели являются важным элементом защиты космического корабля от погодных условий при подготовке на стартовом столе и прохождении плотных слоев атмосферы во время полета. Несмотря на применение современных композитных материалов и технологии изготовления прочных и облегченных конструкций, масса ГО весьма значительна. В частности, для ракеты-носителя «Союз» она составляет 1 400 кг [1]. Падение отделяющихся частей в специально выделенных районах служит источником экономических, экологических и социальных проблем. Разработка технологии утилизации отделившихся элементов ракетнокосмической техники на траектории спуска является актуальной задачей, направленной на снижение объема космического мусора в околоземном пространстве и на земной поверхности. Одним из перспективных направлений в этой области является сжигание ГО на траектории спуска с использованием конденсированных высокоэнергетических веществ [2, 3].

Высокоэнергетические материалы (ВЭМ) нашли широкое применение в качестве источников энергии (порох, взрывчатые вещества, твердые ракетные топлива) и газообразных продуктов сгорания (автомобильные подушки безопасности, системы подъема затонувших объектов и т. д.). Для каждого конкретного случая требуется выбрать и проанализировать возможности применения ВЭМ, а также провести большой объем предварительных испытаний. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования возможности сжигания элементов отделяюще-

Исследование выполнено при поддержке программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и гранта Президента РФ для молодых ученых — кандидатов наук (МК-2463.2022.4).

[©] Архипов В. А., Глазунов А. А., Золоторёв Н. Н., Козлов Е. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Трушляков В. И., 2023.

гося головного обтекателя ракеты-носителя с применением конденсированных ВЭМ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На практике сброс ГО происходит при таких параметрах движения ракеты, что нагрев падающих створок обтекателя в атмосфере до $\approx 570 \div 770$ К не обеспечивает их полного сгорания. Анализ патентной и научно-технической информации по рассматриваемой проблеме показал, что в настоящее время отсутствует отработанная конструкция ГО, сгорающего на траектории спуска в атмосфере за счет использования специальных зарядов ВЭМ. Для применения ВЭМ на высоких траекториях спуска необходимо учитывать, что их горение происходит при пониженном давлении по сравнению с атмосферным. При таких условиях необходимо обеспечить устойчивость и полноту сгорания конденсированных ВЭМ.

Один из вариантов сгорающего ГО рассмотрен в [4]. Головной обтекатель представляет собой трехслойную конструкцию [5] в виде двухстворчатой оболочки переменной кривизны, содержащей внешний и внутренний несущие слои из связующего и углеродной ленты. Между слоями оболочки размещена конструкция из алюминиевой фольги в виде сот, заполненных энергетическим материалом. Экспериментальные результаты предварительной отработки элемента сотовой конструкции с пиротехническими составами на основе термитов [6, 7] показали недостаточную эффективность его сжигания. При нагреве алюминиевая фольга спекается; для полного сгорания элемента сотовой конструкции требуется значительное количество теплоты.

С целью повышения эффективности сжигания отделяющихся от ракеты-носителя элементов конструкции, в частности створок ГО, в [8] предложена новая концепция создания бессотовой трехслойной конструкции элементов. В соответствии с этой концепцией вместо сотового заполнителя из алюминиевой фольги размещается заряд-заполнитель из специально подобранного ВЭМ. Конфигурация и компонентный состав заряда-заполнителя выбираются из условия обеспечения необходимой прочности трехслойной конструкции и устойчивого горения заряда за счет выполнения в нем каналов для истечения продуктов сгорания.

В настоящей работе для анализа возможности сжигания элементов ГО предложена кон-



Рис. 1. Схемы одноканальных демонстрационных образцов прямоугольной (a) и треугольной (b) конфигурации:

1 — пластины обтекателя, 2 – заряд-заполнитель, 3 — торцевая стенка

структивная схема демонстрационного образца, позволяющая оценить возможность и полноту сгорания отделяющегося элемента. Демонстрационный образец выполнен в виде конструкции, по краям которой расположены пластины из органопластика, моделирующие обшивку ГО. Между пластинами расположен заряд-заполнитель из конденсированного ВЭМ, который выполнен в виде призмы с каналами треугольного или прямоугольного сечения для отвода продуктов сгорания ВЭМ. Воздействие высокой температуры и теплоты сгорания при горении ВЭМ способствует термическому воздействию на пластины обтекателя и их сгоранию. В экспериментах использовались одноканальные и двухканальные демонстрационные образцы. Схемы одноканальных демонстрационных образцов приведены на рис. 1.

2. ВЫБОР И АНАЛИЗ БАЗОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ВЭМ

2.1. Требования к композициям ВЭМ

В соответствии с критериями выбора композиций ВЭМ для заряда-заполнителя демонстрационного образца, оптимальный состав ВЭМ должен обладать как высокими энергетическими характеристиками, так и необходимой для нормального функционирования прочностью, обеспечивающей жесткость элементов ГО до их сжигания.

Горение ВЭМ в рамках поставленной задачи осуществляется в условиях низких давлений, соответствующих диапазону высот $H = 5 \div 80$ км. При изменении высоты меняются параметры стандартной атмосферы [9] (температура, плотность, давление, динамическая вязкость воздуха и т. д.). Одно из основных требований, предъявляемых к композициям ВЭМ, — это их термостойкость, т. е. способность химических веществ и материалов сохранять неизменным химическое строение и физические свойства при повышении температуры [10]. Термостойкость вещества характеризуется прежде всего температурой, при которой вещество начинает заметно разлагаться, — T_0 [11]. Данные по T_0 рассмотренных в статье компонентов ВЭМ взяты из справочной литературы [12–15].

Результаты предварительных исследований показали, что температура начала интенсивного термического разложения смесевой композиции, предназначенной для заполнения внутренней полости ГО, а также ее основных компонентов, должна быть не ниже $T_0 \approx 570$ К. Среди известных неорганических окислителей этому условию удовлетворяют нитрат стронция Sr(NO₃)₂, нитрат бария Ba(NO₃)₂ и перхлорат калия KClO₄. Температура их интенсивного разложения составляет $T_0 \approx 650 \div$ 890 К.

Нитрат стронция характеризуется высокой температурой T_0 и большим содержанием свободного кислорода, а также более низкой (на 10 %) плотностью, чем нитрат бария. Перхлорат калия имеет температуру $T_0 \approx 850$ К и содержит большое количество свободного кислорода (46 %).

Базовые композиции ВЭМ должны обладать высокой теплотой сгорания и высокими прочностными характеристиками. Удельная теплота сгорания твердотопливных композиций, содержащих перхлорат калия и органическое горючесвязующее вещество (ГСВ), составляет $\approx 4.2 \text{ МДж/кг}$ [12]. Составы на основе перхлората аммония имеют более высокую теплоту сгорания, однако их недостатком является низкая термостойкость перхлората аммония $T_0 \approx 400 \div 420 \text{ K}.$

Перхлорат калия, наряду с нитратом стронция, был выбран в качестве одного из окислителей базовых составов ВЭМ для изготовления заряда-заполнителя демонстрационного образца.

К ГСВ, входящему в состав ВЭМ для изготовления заряда-заполнителя, предъявляются требования по температуре начала интенсивного термического разложения ($T_0 \gtrsim 570$ K) и технологичности изготовления зарядов ВЭМ. Кроме того, заряды ВЭМ, изготовленные с использованием выбранного ГСВ, должны не уступать по прочностным характеристикам сотовому алюминиевому заполнителю [5].

Наиболее перспективным представляется использование в качестве ГСВ для зарядазаполнителя эпоксидных смол [16], которые в отвержденном виде представляют собой достаточно прочный материал. В частности, для эпоксидной смолы ЭД-5 предел прочности на растяжение ≈ 140 МПа, на сжатие $\approx 100 \div$ 200 МПа [16]. Одним из преимуществ эпоксидных смол является возможность их отверждения без воздействия высоких температур и внешнего давления на образец. Эпоксидные смолы способны отверждаться без выделения побочных газообразных продуктов, что обеспечивает высокую однородность и отсутствие пор в формуемом образце ВЭМ. Кроме того, ГСВ на основе эпоксидных смол и отвердителя не относятся к классу взрывоопасных веществ, горят при нагреве на воздухе (температура вспышки ≈ 540 K). По результатам проведенного анализа в качестве ГСВ ВЭМ для изготовления заряда-заполнителя демонстрационного образца выбрана композиция на основе эпоксидной смолы.

Одним из основных критериев, предъявляемых к заряду-заполнителю, является высокая температура горения, превышающая температуру зажигания термостойких пластин демонстрационного образца. Для повышения теплоты сгорания и, соответственно, температуры горения ВЭМ в их состав вводят энергетические добавки (как правило, порошки металлов).

Высокой теплотой сгорания обладают бор (q = 58.1 MДж/кг) и его соединения с алюминием — борид алюминия AlB_2 (q = 43.0 MДж/kr) и додекаборид алюминия AlB₁₂ (q = 53.5 MДж/кг). Вместе с тем специфические свойства бора затрудняют реализацию потенциальных возможностей смесевых ВЭМ [17]. При нагреве твердой частицы бора на ее поверхности образуется расплавленная пленка оксида $B_2O_3~(T_{melt} \approx 720 \text{ K})$, препятствующая окислению. При этом полнота сгорания борсодержащих топлив не превышает 0.7 ÷ 0.75, а адиабатическая температура горения бора в смеси с перхлоратом аммония ($\approx 3500 \text{ K}$) значительно ниже температуры горения алюминия в смеси с перхлоратом аммония (≈ 4500 K) [17].

Таким образом, в качестве высокоэнергетической добавки для базовых составов ВЭМ выбран порошок алюминия, обладающий достаточно высокой теплотой сгорания (q =

Номер	Содержание компонентов, % (мас.)								
компо- зиции	KClO ₄	$\mathrm{Sr}(\mathrm{NO}_3)_2$	NH ₄ ClO ₄	ЭД-5	Al				
A1	75			10	15				
A2	80			10	10				
A3		75		10	15				
A4		80		10	10				
A5			75	10	15				
A6			80	10	10				

Таблица 1

Составы базовых композиций ВЭМ

31.0 МДж/кг) и хорошо зарекомендовавший себя при горении целого ряда смесевых твердых ракетных топлив [18]. Для оценки эффективности энергетических характеристик горения базовых композиций ВЭМ на основе KClO₄ и Sr(NO₃)₂ было проведено сравнение этих параметров при сгорании композиций с широко известным окислителем — перхлоратом аммония NH₄ClO₄. Базовые составы исследуемых композиций ВЭМ приведены в табл. 1.

2.2. Термодинамический расчет базовых композиций

Для определения основных характеристик процесса горения выбранных составов ВЭМ проведена серия термодинамических расчетов с использованием программного комплекса TERRA [19]. Давление в камере сгорания составляло 0.1 МПа, давление окружающей среды 0.001 МПа соответствовало давлению стандартной атмосферы на высоте ≈ 50 км. Результаты термодинамических расчетов приведены в табл. 2: адиабатическая температура горения T_{ad} , приведенная сила топлива $f = RT_{ad}$ (R -газовая постоянная продуктов сгорания), молярная масса газовой фазы M_q , массовая доля конденсированных продуктов сгорания Z, коэффициент избытка окислителя а. Значения T_{ad}, f, M_{q}, Z приведены для условий в камере сгорания.

Анализ результатов термодинамических расчетов позволяет сделать следующие выводы.

— Все составы ВЭМ имеют высокие значения адиабатической температуры горения $T_{ad} = 2\,986 \div 3\,320$ К и приведенной силы топлива $f = 0.51 \div 1.19$ МДж/кг, что позволя-

Таблица 2

Номер компо- зиции	$\begin{array}{c} T_{ad}, \\ \mathbf{K} \end{array}$	f, МДж/кг	$M_g,$ г/моль	Z, % (mac.)	α
A1	3273	0.57	35.38	0.278	0.945
A2	3 0 4 3	0.53	39.42	0.189	1.112
A3	3 3 2 0	0.56	26.71	0.561	0.860
A4	3 0 2 2	0.51	30.54	0.511	0.943
A5	3118	1.19	21.71	0.283	0.810
A6	2 986	1.05	23.69	0.189	0.910

Результаты термодинамического расчета процесса горения базовых композиций ВЭМ при атмосферном давлении

ет использовать их для изготовления зарядазаполнителя демонстрационного образца.

— Снижение содержания порошка алюминия марки АСД-4 в составах ВЭМ от 15 до 10 % (мас.) приводит к снижению адиабатической температуры горения всех составов на 5 ÷ 9 % и, соответственно, к снижению удельной теплоты сгорания на 6 ÷ 10 %. При этом значительно уменьшается содержание конденсированной фазы (частиц оксида алюминия Al_2O_3) в продуктах сгорания на 10 ÷ 30 %.

- Замена окислителя $KClO_4$ на $Sr(NO_3)_2$ незначительно влияет на расчетные энергетические характеристики ВЭМ (T_{ad}, f) , которые изменяются в пределах ±2 %. Вместе с тем при горении составов А1, А2 (с окислителем $KClO_4$) содержание конденсированных продуктов сгорания $Z \approx 0.19 \div 0.28$ практически вдвое ниже по сравнению с составами АЗ, А4 (с окислителем $Sr(NO_3)_2$), для которых $Z \approx 0.51 \div$ 0.56. Специально проведенные эксперименты с отбором конденсированной фазы при горении указанных составов в воздухе при атмосферном давлении по методике [20] показали такое же соотношение массовых долей конденсированных продуктов сгорания: $Z \approx 0.25 \div 0.27$ для составов с KClO₄ и $Z \approx 0.46 \div 0.50$ для составов с $Sr(NO_3)_2$. Увеличение Z при замене окислителя связано с изменением химического состава конденсированных продуктов сгорания, что показывают результаты термодинамических расчетов по программе TERRA. Для составов на основе перхлората аммония и перхлората калия конденсированная фаза состоит из оксида алюминия Al₂O₃; для составов на основе нитрата стронция в состав конденсированной фазы кроме оксида алюминия входит алюминат стронция $SrAl_2O_4$. С учетом этого использование $KClO_4$ в качестве окислителя является предпочтительным при изготовлении зарядазаполнителя. Следует отметить, что по энергетическим характеристикам составы на основе $KClO_4$ и $Sr(NO_3)_2$ (A1–A4) несколько уступают составам на основе NH_4ClO_4 (A5, A6). Однако по температуре начала разложения они намного превышают температуру разложения и воспламенения составов на основе NH_4ClO_4 .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Исходя из результатов термодинамического расчета (см. табл. 2), для дальнейших исследований были выбраны и изготовлены составы ВЭМ, содержащие 75 % окислителя, 10 % ГСВ и 15 % алюминия (А1, А3, А5). В качестве окислителя использовали порошок перхлората калия (состав А1) с размером частиц 50 ÷ 150 мкм, порошок нитрата стронция (состав А3) с размером частиц 165 ÷ 315 мкм и порошок перхлората аммония (состав А5) с размером частиц 165 ÷ 315 мкм.

В качестве ГСВ применяли продукт модификации эпоксидно-диановой смолы и тиокола (эпоксидная смола марки К-153), отвержденный полиэтиленполиамином (ПЭПА). В качестве энергетической добавки использовали порошок алюминия марки АСД-4 с размером частиц 3 ÷ 10 мкм. Образцы изготавливали по лабораторной методике с применением оборудования для изготовления образцов ВЭМ.

3.1. Измерение теплоты сгорания

Удельную теплоту сгорания *q* исследуемых образцов ВЭМ измеряли на калориметрической установке по методике [21]. Согласно теоретическим основам экспериментальной методики, общее количество теплоты, выделяющейся при сгорании образца эталонного ВЭМ массой *m*, рассчитывается по формуле

$$Q_{calc} = qm_{calc}$$

а измеренное ее количество определяется по формуле

$$Q_{exp} = c_p (M_{\rm H_2O} + W) \Delta T,$$

где c_p — изобарная удельная теплоемкость, $M_{
m H_2O}$ — масса воды в калориметре, W — водя-

ной эквивалент калориметра, ΔT — разность между начальной и конечной (после сгорания образца) температурами воды в калориметре.

Поправка на теплообмен калориметрической установки с окружающей средой определяется как разность

$$\Delta Q = Q_{exp} - Q_{calc}.$$

По результатам серии экспериментов находится среднее значение ΔQ .

Для образцов реальных композиций ВЭМ удельная теплота сгорания с учетом поправки ΔQ определяется по формуле

$$q = \frac{Q_{exp} \pm \Delta Q}{m} = \frac{c_p (M_{\rm H_2O} + W) \Delta T \pm \Delta Q}{m}.$$

Знак плюс или минус в уравнении соответствует нагреванию или охлаждению прибора вследствие теплообмена с окружающей средой.

В качестве эталонного ВЭМ рассматривалось твердое топливо баллиститного типа — порох H, характеристики которого известны [18], в том числе и теплота сгорания q = 3.56 МДж/кг. Масса образцов определялась взвешиванием на весах GX-200 с погрешностью 0.001 г. Калориметр и калориметрическая бомба были протарированы по эталонному ВЭМ, и показана достоверность экспериментальных данных.

Для повышения точности измерения теплоты сгорания исследуемых ВЭМ проводилось не менее 3–5 дублирующих опытов. Результаты теплоты сгорания исследуемых образцов ВЭМ представлены в табл. 3. В экспериментах не удалось получить устойчивого зажигания в калориметрической бомбе образцов, содержащих Sr(NO₃)₂.

Таблица З

Результаты измерения теплоты сгорания исследуемых образцов ВЭМ

Композиция	q, MДж/кг
Порох эталонный	3.6 ± 0.1
A1	5.6 ± 0.1
A3	Не зажигается
A5	9.4 ± 0.4

3.2. Измерение скорости горения в условиях низкого давления

Отличительной особенностью выбранных базовых составов ВЭМ является прекращение горения при субатмосферном давлении, т. е. наличие критического давления, ниже которого самоподдерживающаяся реакция горения невозможна (при прочих равных условиях). Наличие критического давления обнаружено для всех базовых составов ВЭМ.

Проведены исследования характеристик горения базовых композиций A1, A3, A5 при субатмосферном давлении. Исследования выполнялись под вакуумным колпаком, а необходимое разрежение в системе создавалось вакуумным насосом. Образец ВЭМ поджигался нихромовой спиралью, расположенной на верхнем торце образца, который после воспламенения отводили от образца электромагнитом.

Проводилось визуальное наблюдение процесса полного сгорания образца после его воспламенения. Если после воспламенения выгорал лишь прогретый слой образца, а затем процесс затухал, считалось, что в условиях данного эксперимента самоподдерживающееся горение не происходит. Регистрация фронта горения осуществлялась через смотровое окно. Время горения фиксировалось секундомером. Линейная скорость горения определялась путем измерения времени прохождения фронта горения фиксированного расстояния по высоте исследуемого образца.

В экспериментах использовались образцы цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 10 ÷ 30 мм. Боковая поверхность образцов бронировалась раствором линолеума в ацетоне. Проводили не менее 3–5 дублирующих опытов. Отклонение от среднего значения по скорости горения не превышало 10 %.

Зависимости линейной скорости горения модельных композиций от давления приведены на рис. 2. Экспериментальные результаты по скорости горения *и* хорошо описываются степенной зависимостью [22]

$$u = u_a (p/p_a)^v,$$

где u_a — скорость горения при атмосферном давлении, p — давление в камере, p_a — атмосферное давление.

Для составов A1 на основе перхлората калия получены значения $u_a = 0.99$ мм/с, v = 0.67, для состава A5 на основе перхлората ам-



Рис. 2. Зависимость скорости горения составов А1 и А5 от давления

мония $u_a = 1.59$ мм/с, v = 0.23. Коэффициент детерминации для исследуемых составов $R^2 = 0.98 \div 0.99$.

Из приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что режим самоподдерживающегося горения существенно зависит от типа окислителя, содержащегося в модельной композиции. Наиболее устойчиво горит состав с перхлоратом аммония NH₄ClO₄. Составы с нитратом стронция $Sr(NO_3)_2$ при давлении ниже атмосферного практически не горят. Промежуточное положение занимают составы с перхлоратом калия KClO₄. Наличие критического давления обнаружено для всех базовых составов ВЭМ, гашение которых обусловлено снижением скорости тепловыделения в зоне пламени и температуры на поверхности образца. Об этом свидетельствует уменьшение светимости факела пламени [23], а также наличие кристаллов окислителя на дне камеры сжигания при давлениях, близких или равных критическому. На погашенной поверхности образцов в данном случае наблюдаются лунки, которые, очевидно, образовались в результате выброса частиц окислителя с горящей поверхности.

3.3. Измерение прочностных характеристик

Для определения прочностных характеристик образцов ВЭМ проводились механические испытания на трехточечный изгиб на универсальной испытательной машине Instron 3369

Физика горения и	і взрыва,	2023, т.	59, № 5
------------------	-----------	----------	---------

Таблица -
Результаты испытаний образцов ВЭМ на трехточечный изгиб

Номер композиции	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа
A1	17.8 ± 1.6	16.6 ± 1.2
A3	17.5 ± 2.7	16.5 ± 2.9
A5	19.3 ± 1.2	18.5 ± 1.1

(Великобритания) в статическом режиме нагрузки.

Образцы ВЭМ подготавливались в виде пластин шириной 10 мм и толщиной 3 мм. Их геометрические параметры (площадь поперечного сечения, длина, ширина) определялись с погрешностью не более ±0.5 %. Форма и размеры образцов соответствовали требованиям, предъявляемым к объектам исследования по [24]. Подготовленные образцы помещались в специальные захваты, после чего прибор калибровался и запускался режим испытаний. Испытания проводились при комнатной температуре, скорость нагружения составляла 0.2 мм/мин.

По результатам испытаний с помощью

программного обеспечения Instron Bluehill определены предел прочности и предел текучести базовых композиций ВЭМ (табл. 4). Из результатов экспериментального исследования следует, что характер диаграмм для образцов A1, A3, A5 является типичным для хрупкого разрушения материалов. Поверхность разрушенных образцов соответствовала интеркристаллитному разрушению (разрушение по границе зерна), что характерно для прессованных образцов.

3.4. Сжигание демонстрационных образцов

В качестве демонстрационных образцов выбраны конструкции с одним и двумя каналами прямоугольного и треугольного сечения для отвода продуктов сгорания. Материалом общивки служил органопластик на основе стеклоткани и эпоксидного связующего ЭД-20. В качестве заряда-заполнителя использовались базовые композиции ВЭМ на основе перхлората калия (A1) и перхлората аммония (A5) с эпоксидным ГСВ и добавлением порошка алюминия. На рис. 3 представлены геометрические размеры исследованных одноканальных и двухканальных демонстрационных образцов.



Рис. 3. Геометрические размеры исследованных одноканальных (a, 6, e) и двухканальных (c, d, e) демонстрационных образцов:

1 — пластины обтекателя, 2 — заряд-заполнитель



Рис. 4. Фотографии одноканального демонстрационного образца прямоугольной конфигурации до (a) и после (δ) испытаний

Сжигание демонстрационных образцов с целью определения возможности сгорания обшивки ГО под воздействием продуктов сгорания ВЭМ и оценки влияния конструкции и компонентного состава ВЭМ на сгорание обшивки проводилось на экспериментальном стенде [25]. Зажигание заряда-заполнителя осуществлялось нагретой нихромовой спиралью вблизи торцевой пластины ВЭМ со стороны канала. Температура наружной поверхности общивки демонстрационного образца в процессе горения измерялась пирометром Ircon UX70P. Для определения скорости сгорания образца и видеофиксации процесса горения использовались цифровые видеокамеры.

Методика определения степени разрушения обшивки после сгорания включала в себя взвешивание на аналитических весах демонстрационного образца и его составных ча-



Рис. 5. Фотографии двухканального демонстрационного образца прямоугольной конфигурации до (a) и после (b) испытаний

стей до сжигания и конденсированных продуктов после сгорания образца (рис. 4, 5) в среде воздуха при атмосферном давлении [20, 25]. Для сбора всех остатков конденсированной фазы использовался асбокартонный поддон. Следует отметить, что непосредственный отбор конденсированной фазы при сгорании зарядазаполнителя был затруднен интенсивным истечением продуктов горения из каналов. Результаты экспериментального исследования сжигания демонстрационных образцов, содержащих базовые композиции ВЭМ, представлены в табл. 5, 6.

Из полученных результатов видно, что наименьший остаток общивки при сжигании

Ľ	$^{\mathrm{a}}$	б	Л	И	ц	\mathbf{a}	5
---	-----------------	---	---	---	---	--------------	---

Параметры		Результаты измерений						
		a		б		6		
		A1	A5	A1	A5	A1	A5	
Время горения заряда, с		10.0	7.0	10.0	5.0	7.0	5.0	
Максимальная температура обшивки, К		1 480	1 380	1 450	1 420	1 390	1 390	
Масса обшивки, г	начальная	1.38	1.23	1.26	1.17	2.17	1.89	
	конечная	0.56	0.46	0.50	0.44	0.83	0.64	
Масса ВЭМ, г	начальная	26.73	26.16	21.56	20.87	24.91	20.71	
	конечная	6.62	4.21	5.32	3.32	6.13	3.27	
Остаток обшивки, %		40.6	37.4	39.7	37.6	38.2	34.2	
Остаток ВЭМ, %		24.8	16.1	24.7	15.9	24.6	15.8	

Результаты испытаний одноканальных демонстрационных образцов (а, б, в, см. рис. 3)

Таблица 6

Параметры		Результаты измерений						
		8		д		e		
		A1	A5	A1	A5	A1	A5	
Время горен	ия заряда, с	7.7	5.1	9.0	5.0	10.0	4.6	
Максимальная температура обшивки, К		1570	1 430	1 405	1 420	1610	1 460	
Масса обшивки, г	начальная	4.35	4.34	4.71	4.72	5.52	5.74	
	конечная	1.80	1.79	1.37	2.11	1.72	2.42	
Масса ВЭМ, г	начальная	46.77	34.31	38.57	28.20	40.87	31.57	
	конечная	11.64	5.49	9.45	4.48	10.09	5.02	
Остаток обшивки, %		41.4	41.2	29.1	44.7	31.2	42.2	
Остаток ВЭМ, %		24.9	16.0	24.5	15.9	24.7	15.9	

Результаты испытаний двухканальных демонстрационных образцов (г, д, е, см. рис. 3)

одноканальных элементов демонстрационных образцов наблюдается для состава ВЭМ А5 в треугольной конфигурации одноканального образца в. В прямоугольных конфигурациях а и б одноканальные образцы имеют фактически одинаковый по массе остаток общивки, а для состава ВЭМ А5 остатки равны. Для двухканальных элементов ГО наименьший остаток обшивки при сжигании наблюдается для состава ВЭМ А1 в прямоугольной и треугольной конфигурациях образцов ∂ и e. Стоит отметить, что в двухканальном образце прямоугольной конфигурации г компонентный состав ВЭМ (А1 или А5) не влияет на изменение массы остатка общивки. Остаток общивки данного образца оказался больше, чем у одноканального образца а с одинаковыми геометрическими размерами ВЭМ и каналов.

выводы

1. Предложена новая схема бессотовой трехслойной конструкции сжигаемых с помоцью заряда-заполнителя ВЭМ элементов головного обтекателя ракеты-носителя.

2. На основе сформулированных требований к характеристикам заряда-заполнителя и анализа результатов термодинамических расчетов выбраны базовые композиции ВЭМ, содержащие перхлорат калия и перхлорат аммония в качестве окислителя, эпоксидную смолу ЭД-5 в качестве горючего-связующего и порошок алюминия АСД-4 в качестве энергетической добавки.

3. Экспериментально определены значения теплоты сгорания исследуемых базовых композиций ВЭМ: 9.4 МДж/кг для составов на основе перхлората аммония и 5.6 МДж/кг для составов на основе перхлората калия. Отмечено, что составы ВЭМ на основе нитрата стронция не зажигались в калориметрической бомбе при идентичных условиях.

4. Показана возможность самоподдерживающегося горения базовых композиций ВЭМ в диапазоне субатмосферных давлений $0.02 \div 0.1$ МПа. Определены пределы по давлению и константы степенного закона скорости горения исследуемых составов ВЭМ. Для состава А1 на основе перхлората калия получены значения $u_a = 0.99$ мм/с, v = 0.67, для состава А5 на основе перхлората аммония $u_a = 1.59$ мм/с, v = 0.23.

5. Установлено, что использование в качестве горючего-связующего эпоксидной смолы в количестве 10 % (мас.) повышает прочностные характеристики композиции ВЭМ. Результаты экспериментальных испытаний на трехточечный изгиб показали, что предел прочности таких составов составляет 16 ÷ 19 МПа в зависимости от состава окислителя, а полученные диаграммы являются типичными для хрупкого разрушения материалов малой прочности.

6. Проведенные экспериментальные иссле-

дования по сжиганию нескольких конструкций демонстрационных образцов базовых составов ВЭМ А1 и А5 показали, что наименьший остаток обшивки по массе при разрушении элемента головного обтекателя вследствие термомеханического воздействия от продуктов сгорания наблюдается для конструкции в виде треугольной призмы с медленно горящим составом ВЭМ А1 и двумя каналами. При этом максимальная температура наружной поверхности общивки была выше 1 600 К.

Таким образом, в данной работе подтверждена принципиальная возможность применения ВЭМ для сжигания разных конструкций отделяющихся элементов ракеты-носителя и сброса на Землю.

ЛИТЕРАТУРА

- Головные обтекатели (Электронный реcypc). — https://www.laspace.ru/company/products/launch-vehicles.
- 2. Труппяков В. И., Давыдович Д. Ю. Разработка методических подходов к задаче сжигания головных обтекателей ракет при их спуске в плотных слоях атмосферы // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т. 2, № 1. С. 43–48.
- Лемперт Д. Б., Трушляков В. И., Зарко В. Е. Оценка массы пиротехнической смеси для сжигания головного обтекателя космической ракеты // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 121–125. — DOI: 10.15372/FGV20150514.
- Пат. RU 2585395, МПК F42B 15/00, B64G 1/62 от 27.05.2016. Способ минимизации зон отчуждения отделяемых частей ракет-носителей / Трушляков В. И., Шатров В. И. — Бюл. № 15.
- ОСТ 92-5156-90. Конструкции трехслойные с общивками из полимерных композиционных материалов клееные. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
- Monogarov A., Trushlyakov V., Zharikov K., Dron M., Iordan Y., Davydovich D., Melnikov I., Pivkina A. Utilization of thermite energy for re-entry disruption of detachable rocket elements made of composite polymeric material // Acta Astronaut. — 2018. — V. 150. — P. 49– 55. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.11.028.
- 7. Trushlyakov V., Zharikov K., Davydovich D. Combustion possibility assessment for separating launch-vehicle components during atmospheric phase of descent trajectory // Acta Astronaut. — 2019. — V. 159. — P. 540–546. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.02.003.
- 8. Абдуллин И. Н. Проектирование рациональных трехслойных конструкций со стержневым

заполнителем: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Казанский нац. исслед. техн. ун-т им. А. Н. Туполева. — Казань, 2017.

- 9. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
- Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.
- 11. Васин А. Я., Маринина Л. К., Аносова Е. Б. О методике определения температуры начала интенсивного термического разложения твердых веществ и материалов с помощью ДТА // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15, № 6. С. 11–14.
- 12. Энергетические конденсированные системы: краткий энцикл. словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
- 13. Шидловский А. А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973.
- 14. Шелудяк Ю. Е., Кашпоров Л. Я., Малинин А. А., Цалков В. Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: справочник / под ред. Н. А. Силина. — М.: НПО Информ ТЭИ, 1992.
- 15. Шумахер И. Перхлораты: свойства, производство и применение. — М.: ГНТИХЛ, 1963.
- Ли Г., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. — М.: Энергия, 1973.
- 17. **Яновский Л. С.** Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. М.: Физматлит, 2009.
- 18. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: справочник. — М.: Машиностроение, 1988.
- Trusov B. G. Program system TERRA for simulation phase and thermal chemical equilibrium // Proc. XIV Int. Symp. on Chem. Thermodynamics. — St.-Petersburg, 2002. — P. 483–484.
- 20. Иванов Н. Н., Иванов А. Н. Приборы и установки контактной диагностики и их использование в исследовании высокотемпературных двухфазных потоков // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 6. — С. 87–101.
- 21. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. — М.: Химия, 1972.
- 22. Горбенко Т. И. Влияние соотношения компонентов на горение металлизированных топлив при субатмосферных давлениях // Вестн. Томск. гос. ун-та. — 2007. — № 298. — С. 125– 128.
- Исаев Н. А., Качушкин В. И., Ксенофонтов С. И., Максимов Ю. Я., Марченко Г. Н. Исследование горения конденсированных систем при низких давлениях // Физика горения и методы ее исследования. — 1977. — № 7. — С. 6–24.
- ГОСТ Р 56810-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. — М.: Стандартинформ, 2016.

25. Иордан Ю. В. Экспериментальные исследования термодинамических процессов горения сжигаемых демонстраторов // Динамика си-

стем, механизмов и машин. — 2021. — Т. 9,
 $\mathbb{N}^{\scriptscriptstyle 0}$ 2. — С. 97–103. — DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-97-103.

Поступила в редакцию 03.08.2022. После доработки 06.10.2022. Принята к публикации 07.09.2022.