ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО Поля порового пространства гранулированного теплового аккумулятора

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" Владимир Андреевич Зрелов, д.т.н., профессор Александр Юрьевич Лыкин, старший преподаватель

Впервые экспериментально получено распределение температуры порового пространства гранулированного теплового аккумулятора запуска. For the first time, the temperature distribution of the pore space of a granular launch heat accumulator was obtained experimentally. Ключевые слова: смесевые унитарные топлива на основе нитроэфиров, метод термопарного зондирования, распределение температуры, физическая картина. Кеуwords: mixed unitary fuels based on nitroesters, thermocouple probe measurement method, temperature distribution, physical picture.

Ракетные системы на жидких унитарных топливах нашли широкое применение во многих типах космических летательных аппаратов, в системах управления разгонными блоками и спускаемыми аппаратами, в газогенераторах турбонасосных агрегатов и вспомогательных ЖРД различного назначения [1, 2]. Наиболее полно преимущества унитарных топлив могут проявляться в ЖРД малой тяги (МТ), к которым относятся ЖРД, имеющие тягу в пределах Р ≈0 H до P = 1600 H [3], как исполнительных органах систем, обеспечивающих необходимое пространственное положение летательных аппаратов. В тоже время используемые в настоящее время унитарные топлива, такие как перекись водорода, гидразин и др., имеют ряд недостатков: низкий уровень удельных параметров, узкий диапазон условий эксплуатации по температуре и недостаточную химическую стабильность при хранении.

Разработанные в настоящие время смесевые унитарные топлива на основе нитроэфиров имеют высокую химическую стабильность при длительном хранении, низкую токсичность, сохраняют эксплуатационные свойства в широком диапазоне температур, имеют высокую плотность и дают удельный импульс на уровне широко используемых двухкомпонентных топлив [4]. Перечисленные достоинства смесевых унитарных топлив на основе нитроэфиров позволяют считать их перспективными для использования в двигательных установках (ДУ) определённого класса, имеющих небольшое время активного существования (т≈ 600 с), типа ДУ разгонных блоков, спускаемых аппаратов и т.д.

Вместе с тем существуют значительные трудности в организации рабочего процесса ЖРД МТ с многократным запуском на этих несамовоспламеняющихся топливах. Удовлетворительные результаты по организации рабочего процесса на смесевых унитарных топливах на основе нитроэфиров в настоящее время получены в ЖРД МТ, использующих термическое инициирование горения топлива в камере сгорания. При этом количество подводимой к топливу энергии для обеспечения надёжного запуска оказывается весьма значительным, что делает весьма затруднительным и ненадёжным запуск от дежурного факела, от электроискровых воспламенительных устройств или высокотемпературных поверхностей тел, нагреваемых с помощью электрической энергии. В тоже время в процессе горения смесевых монотоплив на основе нитроэфиров вылеляется большое количество теплоты, которую возможно аккумулировать. Поэтому актуальным является исследование возможности использовать для этих целей тепловой аккумулятор, который размещается непосредственно в камере сгорания

В работе представлено исследование рабочего процесса в монотопливном ЖРД МТ с гранулированным тепловым аккумулятором запуска. В качестве аккумулятора использовалась засыпка сферических гранул из хромоалюминиевого термита, имеющего повышенную стойкость к тепловым ударам и прочность в нагретом состоянии [5].

Физическая картина развития внутрикамерных процессов преобразования жидкого монотоплива в высокотемпературные продукты сгорания в ЖРД МТ с гранулированным тепловым аккумулятором (ТА) запуска может быть получена в ходе исследования характера взаимодействия диспергированного монотоплива со структурой ТА и комплексного изучения формирующихся в нём температурных и концентрационных полей или хотя бы одного из них, имеющего наибольшую информативность.

Рабочие процессы преобразования смесевых монотоплив на основе нитроэфиров в камере сгорания (КС) могут протекать при низких давлениях в КС на стадиях, когда превалируют процессы нагрева жидкого монотоплива, испарения, нагрева паров до температуры воспламенения и горения в условиях интенсивного теплообмена с ТА, и в связи с этим как наиболее информативными были приняты температурные поля гранулированной структуры ТА и его межгранульного пространства.

В связи с тем, что как сами гранулы, так и весь гранулированный ТА имеют значительно большую тепловую инерционность, по сравнению с двухфазным потоком продуктов сгорания, движущимся в его межгранульном пространстве, для исследования быстропеременных процессов наибольший интерес представляет температурное поле именно межгранульного или порового пространства.

Применение метода термопарного зондирования, заключающегося в дискретных измерениях температуры с использованием нескольких неподвижно расположенных в определённом порядке термопар в исследуемом объёме, широко используется в экспериментальных исследованиях [6, 7]. Данный метод позволяет зафиксировать одновременно значения температуры во всех точках расположения горячих спаев в исследуемой зоне, построить поля температуры в виде семейства изотерм по длине или/и поперечному сечению гранулированного ТА, а дискретность проведения замеров при этом ограничивается только инерционными свойствами применяемых термоприемников.

Все экспериментальные исследования, приведённые в этой статье, проводились на испытательном стенде, специально соз-





данном для изучения рабочих процессов монотопливных ЖРД МТ. Стенд представляет собой комплекс сооружений, оснащённых специальным оборудованием и системами, и обеспечивает проведение испытаний монотопливных ЖРД МТ тягой до P = 1000 H в наземных и высотных условиях. Блок схема испытательного стенда представлена на рис. 1.

К основным система стенда относятся: топливная система, обеспечивающая подачу монотоплива к объекту исследования, система управления стендовым оборудованием, система регистрации измеряемых параметров, рабочее место стенда, на котором размещается экспериментальная установка с объектом исследования и система вентиляции и нейтрализации продуктов сгорания.

Топливная система стенда (рисунок 2) обеспечивает подачу вытеснительным способом жидкого монотоплива к исследуемым ЖРД МТ с необходимым уровнем давления (P_{вх}) и расхода ($\dot{m}_{\rm MT}$) и позволяет проводить испытания при изменении этих параметров в диапазонах P_{вх} =0.1...10 МПа, $\dot{m}_{\rm MT}$ =(2...500)·10⁻³ кг/с.

Система измерения и регистрации стенда позволяет регистрировать параметры исследуемых ЖРД МТ и параметры работы стендовых систем. Система позволяет измерять и регистрировать



замера давлений, медленно меняющихся во времени, используются манометры класса 0,4. Для контроля электрических параметров исследуемых ЖРД МТ и систем стенда используются приборы класса 0,5...0,05 в зависимости от характера измеряемой величины. Измерения температуры во всех случаях, кроме специ-

ально оговорённых, осуществляются термопарами: хромель-копель, хромель-алювольфмель, рам-рений стандартных градуировок. Расход монотоплива измеряется объёмным методом с помощью ультразвукого уровнемера.



Стенд оснащён автоматизированной системой проведения испытаний и обработки информации на базе ЭВМ. Система обеспечивает работу исследуемого ЖРД МТ в соответствии с задаваемой циклограммой, согласованное включение и выключение комплекса регистрирующей аппаратуры, опрос с заданной частотой датчиков, измеряющих параметры работы двигателя, запись информации и её обработку.

Фотография объекта исследования на рабочем месте представлена на рисунке 3.

Объектом исследований в проводимых экспериментах служил приведённый на рисунке 4 экспериментальный монотопливный ЖРД МТ, который включает в себя: корпус, состоящий из цилиндрической камеры сгорания 1, крышку 2, узел подачи монотоплива 4 и электроклапан 4.

Камера сгорания, узел подачи и крышки изготовлены из стали 12X18H10T. Корпус двигателя изнутри облицован теплоизолирующими экранами 5 из прессматериала П5-7ЛДП. Сопловая крышка снабжена тугоплавким сопловым вкладышем 6 из сплава ВНДС-1. Крышки двигателя соединены с цилиндрической камерой с помощью герметичных фланцевых соединений с 12 болтами M10x1,5 каждая 7. Конструкция верхней крышки предусматривает охлаждение узла подачи проточной водой. Цилиндрический теплозащитный экран камеры сгорания со стороны сопловой крышки имеет внутренний выступ с упором, на которой в камере устанавливается плоская диафрагма 8 из молибденового сплава толщиной $\delta = 6\,10^{-3}$ м с 37 отверстиями диаметром $d_{\rm prв}$ = $4\,10^{-3}$ м. Диафрагма является элементом, ограничивающим TA со стороны сопловой крышки, и предотвращает попадание вещества TA в случае его разрушения в сопло. Суммарная площадь проходного сечения отверстий диафрагмы составляет ~ 12% от

площади проходного сечения камеры за диафрагмой.

Облиновочное покрытие верхней крышки камеры сгорания и диафрагма образует цилиндрическую полость КС диаметром d_{кс}= 68[.]10⁻³ мивысотой h=55 ·10-3 м, в которой располагается гранулированный ТА, представ-



ляющий собой засыпку из сферических гранул 9 тепловыделяющего состава и воспламенитель с усиленным зарядом. Во фланцевом разъёме камеры сгорания со стороны сопловой крышки имеется четыре штуцера 10 для установки датчиков давления и температуры и электрический герморазъем 11 для подвода проводов командного напряжения к воспламенителю.

Для проведения экспериментов по термопарному зондированию камера сгорания была доработана и снабжена дополнительными штуцерами для установки термопар. Количество дополнительных штуцеров и их расположение обеспечили возможность замерять температуру в пяти основных сечениях, два из которых находятся на входе и выходе из гранулированного ТА, а три остальных делят ТА по длине на четыре зоны. При этом в каждом сечении располагались по три термопары, равномерно отстоящие друг от друга по окружности. Схема доработки камеры сгорания для термопарного зондирования приведена на рисунке 5.

В каждом сечении камеры (I, II, III, IV), кроме сечения на выходе (V), горячие спаи термопар располагались на радиусах от оси КС: R = 0, R₁ = 12 $\cdot 10^{-3}$ м и R₂ = 23 $\cdot 10^{-3}$ м. Расположение горячих спаев термопар смещалось на 90° вокруг оси КС относительно верхнего сечения. В сечении V располагались два горячих спая термопар на радиусах от оси КС: R = 0 и R₂ = 23 10^{-3} м.

Это позволило одновременно замерять температуру в четырнадцати точках порового пространства. Предполагая осевую симметрию внутрикамерных процессов, такая схема зондирования позволила при совмещении в одной фронтальной плоскости показаний всех термопар получить плоскую картину температурного поля порового пространства ТА для любого выбранного момента времени.

Принципиальная схема экспериментальной установки, использующейся в экспериментах по термопарному зондированию, представлена на рисунке 6. Она представляет собой снаряжённый и препарированный монотопливный ЖРД МТ, установленный на рабочем месте стенда, комплекс измерительной и регистрирующей аппаратуры, топливную систему стенда и систему управления. ЖРД МТ комплектовался шнекоцентробежной форсункой, обеспечивающей при перепаде давления $\Delta P_{\rm d}$ = 1,0 МПа массо-



вый расход монотоплива $\dot{m}_{\rm MT}$ =23,4 \cdot 10⁻³ кг/с, имеющей угол распыла 2 α = 60° и формирующий в плоскости верхнего торца ТА кольцевую зону орошения диаметром d = 15 \cdot 10⁻³ м. ЖРД МТ был снабжён укороченным соплом с диаметром минимального сечения dkp = 3,0 \cdot 10⁻³ м. Двигатель снаряжался гранулированным тепловым аккумулятором в виде навески неупорядоченной структуры сферических гранул из хромоалюминиевого термита drp = 10 \cdot 10⁻³ м. Масса гранулированного TA составляла M = 235 \cdot 10⁻³ кг.

Гранулированный тепловой аккумулятор препарировался для

проведения экспериментов вольфрам-рениевыми термопарами с открытыми спаями из термопарной проволоки BP-5/BP-20. Диаметр спая термопар составлял $d_{\rm cn}=0,5\cdot10^{-3}\,{\rm M}.$

Для корректного представления результатов экспериментов и формирования на их основе достоверных физических моделей развития внутрикамерных процессов необходимо учитывать особенности условий работы термопар во время экспериментов и их инерционные свойства.

Анализ условий работы термопар показывает, что среда в поровом пространстве гранулированного ТА может быть существенно неоднородной в результате двухфазности, химической и термической неравновесности, иметь переменные значения плотности, скорости и температуры. Кроме этого термопары работают в условиях интенсивного нестационарного конвективного и радиационного теплообмена. Все эти факторы тесно связаны с инерционными свойствами термопар, что, в конечном счёте, влияет на результаты измерений. Для оценки инерционных свойств применяемых термопар была рассмотрена упрощённая физическая модель взаимодействия движущегося потока с рабочим спаем, учитывающая наиболее существенный фактор воздействия, а именно, конвективный теплообмен.

Расчёты по общепринятому подходу по оценке инерционных свойств термопар (8, 9) позволили определить постоянную времени т и время $\tau_{0,9}$ - время выхода на уровень 0,97_г, которые соответственно составили $\tau \sim 6 \cdot 10^{-3}$ с и $\tau_{0,9} \sim 1,1 \cdot 10^{-1}$ с. Полученные в данном случае значения носят оценочный характер, однако, дают представление об инерционных свойствах используемых термопар. Учитывая, что в экспериментах по термопарному зондированию основными задачами являлись выявление характерных областей преобразования жидкого монотоплива в продукты сгорания, определение их размеров и пространственного положения внутри гранулированного теплового аккумулятора, использование термопар с такими инерционными свойствами, можно считать приемлемым.

Методика проведения экспериментов строилась следующим образом. Перед выполнением экспериментов проводились градуировки всех использующихся в экспериментах датчиков давления и температуры в составе соответствующих каналов измерений. После включения регистрирующей аппаратуры с запаздыванием в $\tau = 0,2$ с подавалось напряжение на воспламенитель ТА. После выхода показаний температуры внутри КС на установившееся значение производились включения ЖРД МТ путём подачи управляющих сигналов на его электроклапан.

В ходе проведения экспериментов были получены измерения температуры среды в исследуемых точках порового пространства в зависимости от времени.

По полученным данным были определены значения температуры для всех исследуемых точках порового пространства ТА для стадии саморазогрева ТА в результате протекания экзотермических реакций периода предпусковой готовности и при выходе на режим, работы на установившемся режиме и останове ЖРД МТ.

На основании полученных данных были построены эпюры температур в пяти сечениях ТА и по цилиндрическим образующим на трёх радиусах, указанных выше. Эпюры построены в определённые моменты времени работы ЖРД МТ с шагом 0,06 с, равному постоянной времени термопары т. Примеры полученных эпюр температуры для времён - $\tau = 0$ с, $\tau = 0,06$ с, $\tau = 1,2$ с, $\tau = 2,4$ с представлены на рисунке 7.

Последовательность полученных изображений для различных моментов времени позволяет проследить динамику развития тепловых процессов, протекающих в поровом пространстве ТА. Кроме этого, они дают представление о форме и размерах зон, характерных для тех или иных процессов преобразования жидкого монотоплива и об уровнях температуры в поровом пространстве ТА.

Анализ полученных результатов показывает следующее. После завершения процессов тепловыделения во время саморазогрева ТА в его поровом пространстве формируется равномерное температурное поле с максимальной температурой в центре, которая плавно снижается к периферии, что может объясняться тепловыми потерями через ТЗП и стенки КС. Очевидно, можно

№ 4 - 6 (130 - 132) 2020 Двигатель www.dvigately.ru



отождествлять полученные значения температуры в поровом пространстве с температурой на поверхности гранул, находящихся в непосредственной близости от рабочих спаев термопар.

После открытия электроклапана ЖРД МТ и подачи монотоплива в камеру сгорания происходит деформация изотермических поверхностей в верхней части ТА. При этом в верхней части ТА формируется зона с пониженным уровнем температуры - зона захолаживания. Это возможно связано с захолаживанием ТА потоком диспергированного монотоплива. Можно предположить, что в этой зоне превалируют процессы нагрева, испарения монотоплива и нагрева его паров до температуры разложения, а среда, движущаяся в поровом пространстве, является двухфазной. Вокруг этой зоны формируется зона повышенной температуры, что указывает на протекание в ней реакции разложения и горения. В нижней части ТА поле температуры сохраняет свою первоначальную форму, тем не менее, уровень температуры в ней в процессе работы ЖРД МТ постепенно растёт.

Рассматривая динамику изменения температурного поля в поровом пространстве, можно отметить, что зона пониженной температуры - зона захолаживания, претерпевает следующий ряд изменений.

В начальный момент работы ЖРД МТ она имеет максимальные размеры. Затем в период переходного процесса выхода ЖРД МТ на режим, она начинает постепенно уменьшаться до некоторого минимального размера на установившемся режиме работы. Зона повышенной температуры, характеризующая процессы горения монотоплива, охватывает зону захолаживания с внешней стороны проникающего в ТА капельного факела, что с учётом продольной и радиальной составляющих векторов скоростей движущихся капель, является закономерным явлением. Зона повышенной температуры начинает формироваться в начальный момент в периферийной части зоны захолаживания в глубине гранульной засыпки. Со временем она непрерывно растёт, замыкаясь с горячим ядром центральной части и охватывая зону захолаживания, выходит на верхний торец ТА. Ширина зоны повышенной температуры при этом уменьшается, и она приобретает характер достаточно явно выраженного фронта горения, охватывающего зону двухфазных течений.

Впервые полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

 Горение монотоплива в основном происходит внутри гранулированного ТА, что характеризуется наличием зоны максимальных температур, приближающихся к уровню максимальной расчётной термодинамической температуры горения.

2. Средняя температура ТА в процессе работы ЖРД МТ непрерывно увеличивается, что предопределяет возможность теплоаккумуляции, а, следовательно, возможность устойчивого функционирования ЖРД МТ рассматриваемой схемы в непрерывных и импульсных режимах.

3. Область ТА, расположенная ниже зоны максимальных температур, работает как пористо-гранульный теплообменник, аккумулирующий тепловую энергию во время работы ЖРД МТ. 4. Уровень температур в поровом пространстве вблизи верхнего торца не опускается ниже T = 900 К, что свидетельствует о высокой интенсивности теплообменных процессов внутри объёма ТА в зоне непосредственного контакта жидкого монотоплива с поверхностями гранул.

5. Форма изотермических поверхностей в нижней части ТА не претерпевает существенных деформаций, что говорит о завершённости процессов тепловыделения и о достаточно равномерном газофазном потоке продуктов сгорания в этой зоне.

Полученные результаты исследований подтверждают возможность использования гранулированного ТА в ЖРД МТ на смесевом унитарном топливе на основе нитроэфиров как устройства запуска. Сформулированные выводы дают новое представление о физической картине протекающих в исследуемом объекте процессов на разных стадиях его работы и позволяют наметить дальнейшее направление исследований для определения геометрических параметров, характеристик и режимов работы двигателей такого типа.

Литература:

1. Main Results 20 Year Operating Activities In Space Of Monopropellant Liquid-Propellant Rocket Engines Of EDB Fakel // 6th International Symposium Propulsion for Space Transportation on the XXIst century 14-17 May 2002, Palais des Congres Versailes - France.

2. Ермолаев В. И., Чилин Ю. Н., Наркевич Н. Н. Двигательные и энергетические установки космических летательных аппаратов / под ред. А. П. Ковалёва. СПб.: Изд-во ЦКБ "Рубин", 2003. 558 с.

3. Егорычев В.С. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги и их характеристики: учеб. пособие / В.С. Егорычев, А.В. Сулинов. - Самара: Изд-во СГАУ, 2014. - 128 с.: ил.

4. Нестеренко, А.Н. Перспективные монотопливные термокаталитические двигатели [Текст]/ А.Н. Нестеренко, С.В. Солодова. - Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2008. -93 с.

5. Мержанов А.Г. Теория безгазового горения. - Препринт. Черноголовка.: ИХФ АН СССР, 1973. - 23 с.

6. Гордов А.Н. и др. Основы температурных измерений/ А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 304 с.: ил.

7. Болтенко Дмитрий Эдуардович. Зондовые методы определения характеристик одно-двухфазных потоков в стационарных и динамических режимах : диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.14, 05.11.13.- Электрогорск, 2006.- 194 с.: ил.

8. Заботин В.Г., Первышин А.Н. Теплотехнические измерения в двигателях летательных аппаратов.: Учебное пособие/ В.Г. Заботин., А.Н. Первышин. - Самара: Изд-во СГАУ, 1990. - 67 с.

9. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. - М.: МЭИ, 2005. - 458 с.