

Проанализированные математические модели на базе уравнений состояния, учитывающих свойства реального газа (Дюпре-Абея, Ван-дер-Ваальса, Ридлиха-Квонга, Дитеричи), являются наиболее перспективными для построения математических моделей рабочих процессов компонентов ПС. Полученные в работе рекомендации по критериям выбора уравнения состояния для математического моделирования рабочих процессов в компонентах ПС в приближении распределенных параметров позволяют получить высокую точность при расчетах. Рассмотренная группа математических моделей может быть легко расширена с использованием произвольного количеством других уравнений состояния для повышения точности моделирования.

#### Библиографический список

1. Ю.Л. Арзуманов и др. Математические модели систем пневмоавтоматики: Учеб.пособие М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
2. Подчуфаров Б.М., Подчуфаров Ю.Б. Тепломеханика. Тула: Тул-ПИ, 1985. 104 с.
3. American Society of Engineering Education, 2007 AC 2007-2695: Modeling compressible air flow in a charge or discharge vessel and assessment of polytropic exponent, 2007.
4. Дзк. Гиршфельдер, Ч. Кертисс и Р. Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей Перевод с английского под редакцией Е.В. Ступоченко. Издательство иностранной литература. Москва, 1961.
5. Елагин М.Ю. Математическое моделирование нестационарных процессов в открытых термодинамических системах: Учеб. Пособие. Тул. Гос. ун-т, Тула, 1999.
6. Рязанов А.А. Краны шаровые для пневмогидравлических систем. Основы проектирования. М.: Машиностроение, 2011. — 152 с.
7. Мамонтов М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. М.: Оборонгиз, 1961.
8. М.П. Вукалович, И.И. Новиков, Уравнения состояния реальных газов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948.
9. Поливцев В.П. Моделирование процесса истечения сжатого воздуха как идеального и реального газа из емкости постоянного объема для систем пневмоавтоматики Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Автоматизація процесів та управління. Севастополь, 2014
10. Кюрджиев Ю. В. Моделирование рабочих процессов, разработка и модернизация пневматических систем и агрегатов с учетом образования конденсата рабочего тела: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.06. Москва, 2004. 163 с.
11. Ушаков В.В., Щербаков А.М. Агрегаты пневмогидравлических систем/под ред. В.М.Филина. М.:Изд-во МАИ, 2017.—204 с.

УДК 662:623.4.086

#### УСКОРЕНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПАСТООБРАЗНОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

*М. В. Ахтырский, В. А. Бабук, С. Ю. Нарыжный, В. В. Фоменко*

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Развитие военной и космической техники ставит задачу совершенствования ракетных двигательных установок. Для решения этой задачи требуется создания двигателей, отличающихся более высоким уровнем массового совершенства и высоким удельным импульсом тяги. Решение этой задачи возможно при использовании новых видов топлив, к которым относится пастообразное ракетное топливо (ПРТ). Подобное топливо допускает более широкий диапазон изменения соотношения компонентов состава, что позволяет эффективно решать задачи создания топлив, обеспечивающих высокий удельный импульс тяги, с очень высокой или очень малой скоростью горения. Благодаря чему можно снизить габариты двигателя в рамках поставленной задачи или увеличить полный импульс тяги в тех же габаритах, в сравнении с твердым ракетным топливом (ТРТ), у которого присутствуют ограничения компонентной базы, связанные с системой отверждения топлива.

ПРТ могут заполнять и принимать любую форму камеры сгорания (КС), в процессе изготовления условных «зарядов» из них не требуются процедуры отверждения и прессования под давлением, что снижает затраты производства и повышает его безопасность [3].

В ТРТ газоприход может регулироваться с помощью изменения формы заряда и, как следствие, площади горения. Для ПРТ, диапазон скоростей горения значительно (в разы) превышает скорости горения ТРТ, возможно использование условного «заряда» торцевого горения. При этом изменение газоприхода возможно за счет изменения скорости горения. Регулирование скорости горения ПРТ осуществляется с помощью изменения рецептуры состава, применения специальных катализаторов, или использования теплопроводных элементов (ТПЭ).

Пастообразные топлива разработаны достаточно давно (в 60-е годы прошлого века [1]) в Государственном институте прикладной химии, но широкого распространения они не получили, в связи с малой изученностью их свойств.

В настоящее время на базе ФГУП «СКТБ «Технолог» разработаны новые составы ПРТ на основе хлорно-кислого связующего, проведены их обширные исследования по влиянию компонентной базы и ТПЭ из различных металлов на процесс горения. Получены законы скорости горения топлив с помощью установки высокого давления и произведено их уточнение на модельном ракетном двигателе. Получены скорости горения ПРТ от 17 до 130 мм/с при давлении 10 МПа. Пастообразные топлива обеспечивают стабильную работу двигателей при давлениях до 100 МПа [2].

В СКТБ «Технолог» создана лабораторная и полигонная база для наработки, исследования реологических, термохимических и эксплуатационных характеристик ПРТ. Используются стенды для огневых испытаний модельных и натурных двигателей калибра от 20 до 250 мм с массой заряда ПРТ от 100 г до 30 кг и тяговыми усилиями от 10-100 кГ (лабораторные стенды) до 4-6 тонн (полигонные стенды испытаний РДПТ).

На рисунке 1 приведен пример работы опытного варианта РДПТ в лабораторных условиях, а на рисунке 2 – в полигонных условиях СКТБ «Технолог».



Рис. 1. лабораторный модельный ракетный двигатель, диаметр 30 мм.



Рис. 2. Полигонный модельный ракетный двигатель, диаметр 100 мм.

В процессе исследований на модельном составе ПРТ с использованием различных ТПЭ получены коэффициенты ускорения горения условного «заряда» ПРТ (по сравнению с торцевым горением условного «заряда» ПРТ без ТПЭ) в зависимости от типа материала, формы ТПЭ и степени их перфорации. В качестве ТПЭ использовалась металлическая фольга [4-6] различной толщины, были получены следующие коэффициенты ускорения: медь - 3,9...4,1, бронза - 2,9...3,4, латунь - 2,4...2,8, нержавеющая сталь - 1,4...1,8. Опытные образцы ТПЭ из различного материала и с разной степенью перфорации представлены на рисунке 3. ТПЭ из металлической сетки представлены на рисунке 4.

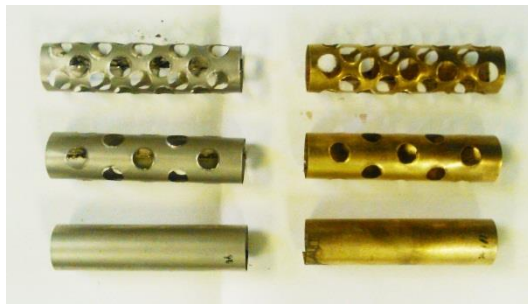


Рис. 3. ТПЭ для модельного ракетного двигателя.



Рис. 4. ТПЭ из латунной и металлической сетки.

Проведен ряд испытаний с использованием ТПЭ разной степени перфорации. Результаты испытаний приведены в виде осциллограммы на рисунке 5.

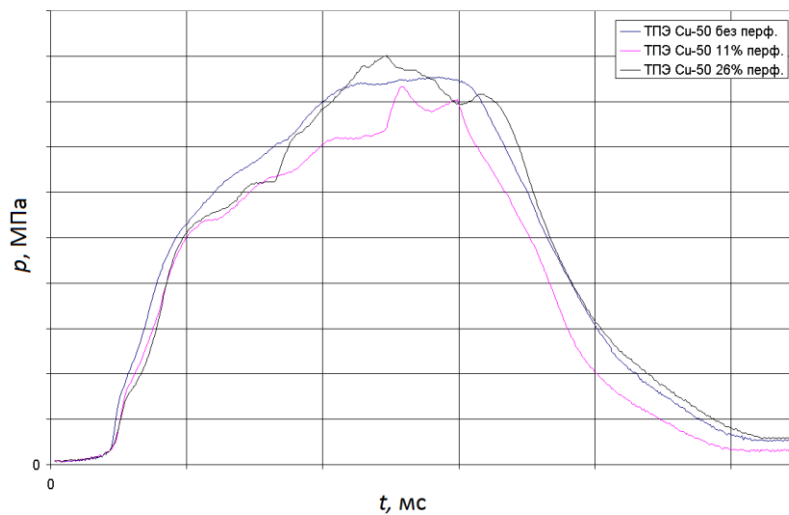


Рис. 5. Осциллограммы опытов с ТПЭ различной степени перфорации

Испытания показали, что степень перфорации ТПЭ на процесс ускорения горения условного «заряда» ПРТ в исследованном интервале величин перфорации (0-36%) не влияет. Назначение перфорации – это возможность движения пасты через стенки ускорителя в процессе заполнения двигателя и при температурной деформации пасты и ТПЭ при изменении температуры заряда.

Были проведены исследования по применению медных струн в условном «заряде» ПРТ. Капсулы со струнами для модельного ракетного двигателя приведены на рисунке 6. В зависимости от толщины струны коэффициент ускорения горения условного «заряда» ПРТ составил 4...6 [2].



Рис. 6. Капсулы с медной струной по оси заряда.

В результате исследований хорошо зарекомендовали себя конструкции ТПЭ в виде перфорированных цилиндров с коаксиальной конструкцией. Они обеспечивают высокую повторяемость и стабильность работы условного «заряда» ПРТ. Кроме того, при использовании нескольких материалов ТПЭ возможно создание двухрежимного двигателя на базе одного топлива в едином корпусе.

Зависимость давления и тяги от времени при двухрежимной работе РДПТ на базе одного топлива в едином двигателе с использованием ТПЭ из разных материалов приведена на рисунке 8. Сам составной ТПЭ приведен на рисунке 7.



Рис. 7. Двухсоставной ускоритель.

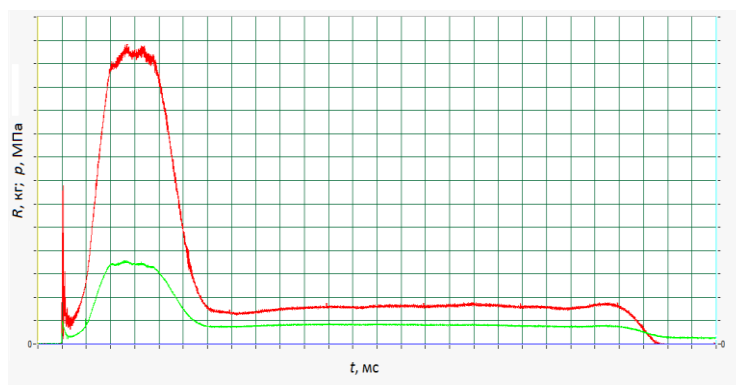


Рис. 8. Изменение давления (зеленая кривая) и тяги (красная кривая) от времени при двухрежимной работе РДПТ.

Пастообразные топлива хорошо проявили себя, показав свою работоспособность в широком диапазоне температур ( $-50...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с возможностью регулирования газоприхода за счет компонентной базы составов, катализаторов и применения разных типов ТПЭ.

В целом, к настоящему времени стало понятно, что основными направлениями использования пастообразных топлив являются [2]:

- Короткоимпульсные РДПТ высокого давления с условными «зарядами» ПРТ торцевого режима горения для ПРТ с высокими скоростями горения.
- Двух – трех режимные РДПТ, допускающие в одном корпусе и с использованием одного ПРТ возможность работать в режимах «стартовый ускоритель – маршевый режим – режим доускорения» с высокой степенью изменения тяги.
- Газогенераторы маршевых ступеней ракетно-прямоточных двигателей авиационных ракет, устойчиво работающие в интервале давлений 0,05-10 МПа
- При возобновлении производства такого компонента, как гидрид алюминия возможна обработка специальных высокоимпульсных ПРТ с  $J_{уд.} > 3000\text{ м/с}$  при  $R_k \geq 20\text{ МПа}$ .

Полученные результаты отличаются новизной, высокой практической значимостью и допускают возможность широкого использования ПРТ в качестве топлив ракет различного назначения. Работы по изучению и внедрению подобных топлив ведутся на базе СКТБ «Технолог» по настоящий день.

#### **Библиографический список**

1. Животов Н.П. Сорокин В.А., Францкевич В.П., Козлов В.А., Суриков.Е.В, Фельдман В.Д., Абашев В.М., Черваков В.В., Шаров М.С., Яновский Л.С. Ракетно-прямоточные двигатели на твёрдых и пастообразных топливах (монография)/ Москва, "ФИЗМАТЛИТ", 2010г., 350с.
2. НТО по НИР "Экспериментально-теоретическое исследование составов пастообразных наполнителей для ракетных двигателей с улучшенными энергетическими характеристиками" - СПб: ФГУП "СКТБ "Технолог", уч.№ 192-02/6106-14, 2014г.
3. Авдиенко А.А., Григорьян С.С., Финагин А.Е. Рабочие процессы и проектирование ракетных двигателей на пастообразном топливе. СВВКИУ ракетных войск им. А.И. Лизюкова, Саратов, 1996. – 124с.
4. А.А. Миланченко. «Анализ влияния теплопроводящих элементов на горение твёрдых топлив», Центр исследований и образования в области ракетно-артиллерийских наук Томского Государственного университета, издательство Томского Университета, Сборник статей, Томск, 1997-133с.
5. «Теоретические основы анализа и синтеза комбинированных ракетных двигателей на твёрдых и пастообразных топливах», Москва, издательско-торговая корпорация «Дашков и К», т.4.,223 стр., 2012 год.
6. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. «Влияние теплопроводящих элементов на скорость горения», Физика горения и взрыва.1975, т.11, №3, с.501-506.

УДК

#### **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТНОГО БЛОКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПРИ РАКЕТОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЕ СПАСЕНИЯ СТУПЕНИ**

*И. Ф. Бикеев, А. Э. Султанов*

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского*

##### **Введение**

Колебания корпуса ракеты-носителя с малыми частотами и большими амплитудами является негативным фактором, влияющим на работоспособность большинства систем ракеты. В ряде случаев низкочастотная вибрация может стать причиной потери герметичности расходных магистралей. Причиной высокоамплитудной вибрации корпуса может быть потеря продольной устойчивости в связке с двигателем.

Колебательной системой является корпус ракеты, источником энергии служит жидкостный ракетный двигатель, обратную связь осуществляет топливная магистраль. Кроме внешней обратной связи между корпусом и двигателем, которая замыкает систему, существует внутренняя обратная связь между двигателем и топливной магистралью. Эта связь осуществляется посредством воздействия давления в камере сгорания на скорость подачи топлива из топливной магистрали через форсунки. Таким образом при рассмотрении условий возбуждения продольных колебаний ракетного блока ракеты-носителя анализировалась динамическая система «упругий корпус – топливная магистраль – двигатель».

Колебания подачи топлива в камеру сгорания происходят с такой же частотой, с которой совершаются продольные колебания корпуса и топлива в трубопроводе; с этой же частотой изменяется и тяга двигателя. В автоколебательном процессе во всех звеньях замкнутой системы происходят колебания с частотой, которая называется частотой автоколебаний. При таком мощном источнике энергии, как ЖРД, автоколебания могут привести к возникновению больших динамических нагрузок в конструкции ракеты-носителя, способных вызвать повреждения оборудования и приборов.

Для современных ракет-носителей разработаны и успешно применяются специальные системы демпфирования колебаний, представляющие собой специальные устройства, устанавливаемые на одну из топливных магистралей питания двигателя. Эти устройства проектируются в соответствие с ожидаемыми динамическими характеристиками упругого корпуса ракеты, ее топливных магистралей и жидкостного ракетного двигателя (ЖРД).