

УДК 621.372.812

Экспериментальное определение критического диаметра горения энергетической конденсированной системы на основе нитрата калия и эпоксидного связующего

05, май 2012

Фирсова О.В., Горлатова Н.А.

*Студенты,
кафедра «Ракетные двигатели»*

*Научный руководитель: Сергеев А.В.,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Введение

В последнее время широкое распространение получают импульсные ракетные двигательные установки на твердом ракетном топливе. Наиболее широкое применение они находят в качестве корректирующих двигательных установок высокоточных летательных аппаратов. В частности, такие двигательные установки (ДУ) все шире применяются на противотанковых ракетах, а в последнее время и на зенитных управляемых ракетах. Наиболее характерные примеры – перспективные зенитные управляемые ракеты (ЗУР) 9М96, 9М100 комплекса С-400 и ракета «Эринт» последнего поколения комплекса «Пэтриот».

Необходимость увеличения энергетики двигателей вкуче с уменьшением габаритов и малым временем работы определяет необходимость создания высокого давления в камере сгорания. В современных корректирующих двигательных установках давление в камере сгорания (в ДУ ЗУР Эринт в частности) достигает 80 МПа. Один из основных путей повышения эффективности современных установок – это увеличение давления в камере сгорания, поэтому в перспективе возможно дальнейшее увеличение давления до 100 МПа и более.

Разработка подобных двигательных установок в настоящее время затрудняется вследствие недостаточного количества достоверных экспериментальных данных [1]. Получение достоверных данных по горению широкого класса энергетических конденсированных систем (ЭКС) в широком диапазоне параметров сопряжено со значительными сложностями, особенно при исследовании процесса горения при сверхвысоких давлениях. В связи с этим весьма актуальной задачей является разработка исследовательских комплексов по исследованию процесса горения ЭКС.

На кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана создан экспериментальный стенд для исследования горения ЭКС при сверхвысоких давлениях на стационарных и нестационарных режимах на основе СВЧ-метода измерения скорости горения, и ведутся работы по совершенствованию данного стенда [2].

Экспериментальная установка

Универсальная экспериментальная установка (УЭУ) (рис. 1) предназначена для исследования процесса горения ЭКС при уровне давления в камере сгорания вплоть до 75 МПа на стационарных и нестационарных режимах, скорости изменения давления (до 1000 МПа/с). Система измерения скорости горения создана на базе СВЧ-метода. Геометрическая разрешающая способность метода изменяется при выгорании образца от 0,0340 мм в начале горения до 0,0028 мм в конце горения образца. Временная разрешающая способность до 25 мкс. Погрешность ~ 5%.

Экспериментальная установка состоит из трёх основных узлов:

1) Затворный узел – один из составных элементов экспериментальной установки. Он предназначен для размещения на нем образца топлива, воспламенителя, герметизации объема камеры сгорания, для электродинамического согласования измерителя полных сопротивлений и образца ЭКС.

2) Камера сгорания (КС).

3) Системы управления режимами работы УЭУ: мембранный узел, комбинированный предохранительный клапан и клапан принудительного сброса давления.

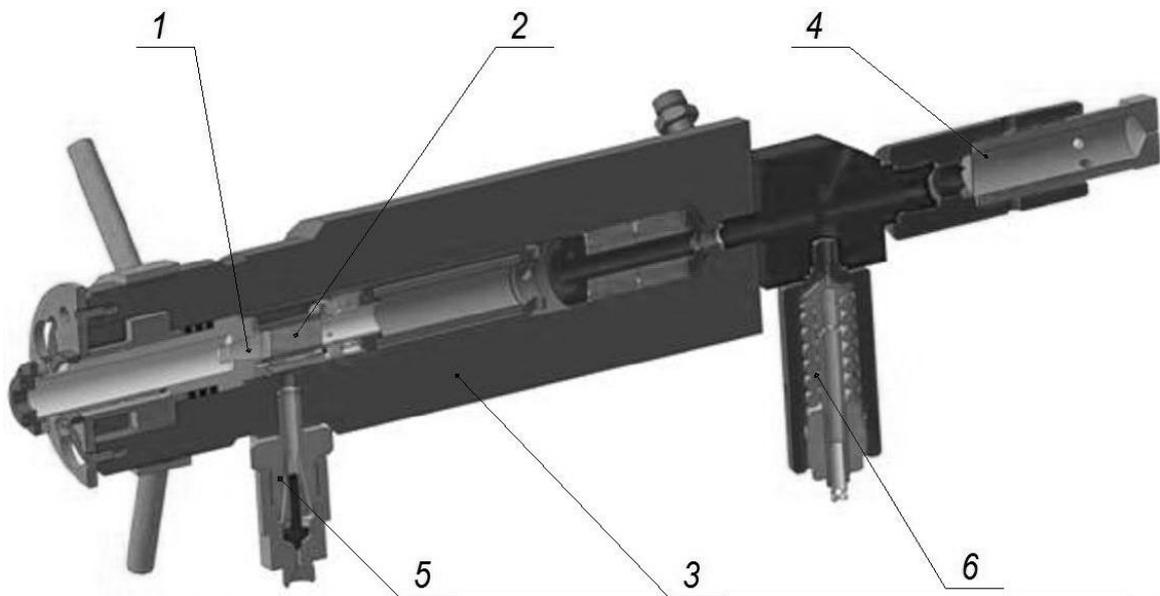


Рис. 1. Модель экспериментальной установки. 1 – затворный узел, 2 – образец исследуемого топлива, 3 – камера сгорания, 4 – мембранный узел, 5 – обратный клапан, 6 – предохранительно-отсечной клапан

В установке предусмотрены устройства для сброса давления из камеры сгорания, в частности мембранный узел и предохранительно-отсечной клапан.

Мембранный узел исполняет роль штатного предохранительного устройства, обеспечивающего защиту экспериментального стенда от разрушения при превышении критического давления, а так же позволяет задавать давление, при котором начинается сброс продуктов сгорания из КС. В данном устройстве установлен жиклёр с возможностью изменения площади проходного сечения, предназначенный для управления скоростью сброса внутрикамерного давления. За жиклёром в корпусе мембранного узла установлен пакет мембран, отградуированный на разрушение при определённом давлении. При использовании различных металлов в качестве материала мембран, а так же устанавливая различное количество мембран, возможно регулировать давление разрушения мембран и следовательно давление, с которого начинается спад давления из камеры сгорания.

Предохранительно-отсечной клапан (рис. 2) имеет сложную конфигурацию, что позволило обеспечить выполнение нескольких задач одним устройством.

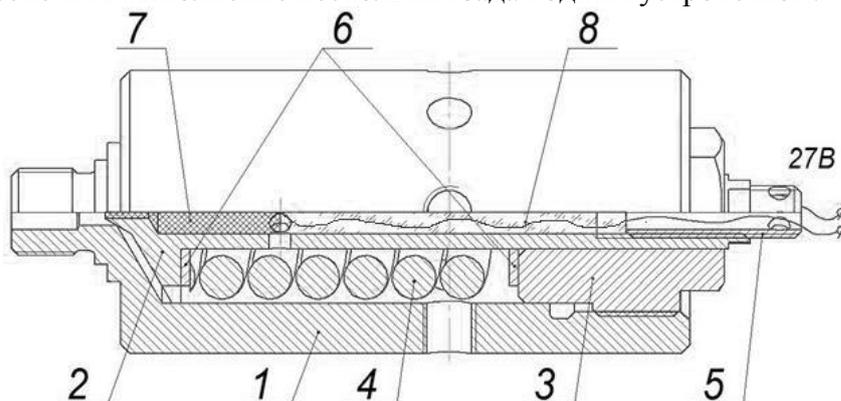


Рис. 2. Двухконтурный предохранительный клапан. 1 – силовой корпус, 2 – седло, 3 – прижимная гайка, 4 – пружина, 5 – прижимная шпилька, 6 – прокладка, 7 – заряд ЭКС, 8 – стеклянная втулка

Первый контур предохранительного клапана предназначен для реализации квазистационарного горения ЭКС на штатном режиме и функции предохранительного многоразового клапана при нештатных ситуациях. Внутрикамерное давление действует на седло клапана, тем самым раскрывая стык между седлом 2 и корпусом 1. Пружина 4, поджатая гайкой 3, препятствует раскрытию рабочего стыка клапана. Давление срабатывания клапана регулируется прижимной гайкой 3 по меткам на седле клапана 2. Отвод продуктов сгорания исследуемого образца осуществляется через радиальные отверстия в корпусе 1. Такое расположение отверстий обеспечивает скомпенсированную реактивную силу ПС. Расположение отверстий и сложный канал клапана так же способствуют остыванию газа перед выходом в атмосферу. Максимальное давление срабатывания предохранительной части клапана 187,5 МПа, минимальное 40-50 МПа. Запас прочности конструкции 2 единицы при 150 МПа внутри камеры.

В процессе проведения экспериментальных пусков могут возникнуть нештатные ситуации, например в случае несрабатывания прорывных мембран давление из камеры сгорания не сбрасывается, и создается опасная ситуация, при которой горячие продукты сгорания нагревают камеру сгорания, нагруженную высоким внутрекамерным давлением. Для предотвращения аварийных ситуаций разработан второй контур предохранительного клапана для принудительного открытия отверстий, по которым осуществляется сброс газа в атмосферу. Для этого предохранительный клапан оснащен зарядом ЭКС на основе нитрата калия и эпоксидного связующего, перекрывающим магистраль сброса газа в штоке предохранительного клапана. При подаче тока по проводам, проходящим через прижимную шпильку 5, стеклянную втулку 8, заряд 7 воспламеняется и полностью выгорает, тем самым раскрывая осевое отверстие в седле клапана 2, по которому и происходит сброс внутрекамерного давления. Отвод продуктов сгорания (ПС) как исследуемого, так и вспомогательного заряда 7 происходит так же по радиальным каналам в седле клапана, а затем по каналам в корпусе. Система отверстий и внутренних каналов всего предохранительного клапана спроектирована таким образом, что бы предотвратить попадание недогоревших частиц вспомогательного ЭКС и горячих ПС в атмосферу.

При проектировании предохранительного клапана особое внимание уделялось надёжности системы. Ввиду того, что устойчивость горения ЭКС зависит от размера канала, в котором происходит горение [3], весьма актуальной задачей является определение критического диаметра горения заряда ЭКС, применяемого в качестве дополнительного заряда. Распространение пламени по каналу возможно лишь при определённом ее диаметре. При уменьшении диаметра увеличивается влияние тепловых потерь из зоны реакции в стенки канала. Существует минимальный (критический)

диаметр, при котором пламя уже не может себя поддерживать, что может привести к неустойчивому горению или погасанию ЭКС. От решения этой задачи зависит надёжность срабатывания предохранительной системы экспериментальной установки.

Методика проведения эксперимента

В качестве ЭКС дополнительного заряда выбран состав на основе нитрата калия (дисперсность 80 мкм) и эпоксидного связующего (массовое соотношение окислителя и горючего 70/30) ввиду сохранения стабильности характеристик ЭКС при хранении (в виде снаряжённого клапана), приемлемых механических свойств (предел прочности на сжатие более 60 МПа), доступности ингредиентов топлива и простоты технологии создания ЭКС.

Для определения критического диаметра проводилось сжигание ЭКС в каналах различного диаметра, просверленных в разных материалах. В качестве материалов выбраны – алюминий АМг-3, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т и отверженная эпоксидная смола ЭДП. Применение трёх материалов необходимо для оценки влияния тепловых потерь на величину критического диаметра горения. В каждом из материалов просверлена серия отверстий диаметром 2,5 мм, 3,0 мм, 4,2 мм, 5,0 мм и 6,0 мм. Воспламенение каждого образца осуществлялось от нихромовой проволоки, через которую пропускался электрический ток. Характеристики тока при каждом испытании контролировались источником постоянного тока ТЕС 20. Последовательно воспламеняя ЭКС в каждом канале, визуально отслеживался процесс горения (рис. 3), и фиксировалось гашение образца. После проведения первой серии экспериментов произведена дополнительная серия экспериментов на диаметрах 2,9 мм, 3,2 мм, 3,5 мм, 3,8 мм и 4,0 мм по той же методике.

Результаты исследования

Результаты первой серии экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты первой серии испытаний

Материал	Теплопроводность материала, Вт/(м·К)	Диаметр канала, мм				
		2,5	3,0	4,2	5,0	6,0
Эпоксидная смола	0,175	-	-	+	+	+
Сталь нержавеющее	20,0	-	-	+	+	+
Алюминий	230,0	-	-	+	+	+

«-» – произошло гашение образца; «+» – устойчивое горения в канале.

В ходе первой серии экспериментов определено, что критический диаметр для всех материалов находится в диапазоне от 3,0 мм до 4,2 мм, в связи с чем проведена дополнительная серия испытаний в заданном диапазоне. Результаты данного исследования приведены в таблице 2.

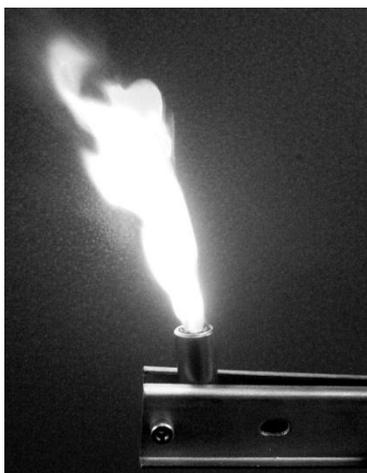


Рис. 3. Горение ЭКС в канале диаметром 6 мм в стальной втулке

Таблица 2. Результаты второй серии экспериментов

Материал	Теплопроводность материала, Вт/(м·К)	Диаметр канала, мм				
		2,9	3,2	3,5	3,8	4,0
Эпоксидная смола	0,175	-	-	-	+	+
Сталь нержавеющее	20,0	-	-	-	+	+
Алюминий	230,0	-	-	-	+	+

«-» – произошло гашение образца; «+» – устойчивое горения в канале.

Выводы

В результате анализа полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Определена граница устойчивого горения ЭКС на основе нитрата калия и эпоксидного связующего в зависимости от диаметра и теплопроводности материала канала.

2. Определён минимальный (критический) диаметр канала, равный Ø3,8 мм, при котором происходит устойчивое горения ЭКС.

3. Выявлено, что материал канала незначительно влияет на значение критического диаметра горения исследуемого ЭКС. Это объясняется тем, что в результате горения ЭКС выделяется большое количество конденсированной фазы, которая при осаждении на стенки канала создаёт пористый каркас, образующий дополнительную теплоизоляцию стенок канала.

4. Разработаны практические рекомендации по организации рабочего процесса и конструкции предохранительного клапана экспериментальной установки.

Литература

1. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Саморокова Н.М. Интегриродифференциальный метод определения законов горения конденсированных систем в условиях постоянного объема // Физика горения и взрыва. 1999. Т.35, №1. С.67-71.
2. Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В. Применение метода измерения S-параметров для исследования процесса горения твердых ракетных топлив // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, №3. – С. 46–51.
3. Романов О.Я. О критическом диаметре горения // Физика горения и взрыва. 2007. Т.43, №1. С. 29-39.

