

УДК 621.454.3.018

**В.В. ОГЛИХ, В.М. ДОЦЕНКО, В.Г. МАМОНТОВ, М.Г. КОСЕНКО,
А.Б. РОЗЛИВАН, В.Г. БЕЙДИК**

ГП Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ РДТТ УПРАВЛЕНИЯ

Статья посвящена двигателю на твердом топливе, предназначенному для управления полетом летательных аппаратов. Во многих случаях он имеет преимущества по сравнению с аналогичными системами на сжатых газах или ЖРД. Описываются особенности работы данного двигателя, принципиальная схема и выбор топлива. Приведены конструкторские решения по отдельным наиболее сложным узлам: клапану-регулятору давления, клапану-газораспределителю. Изложены основные проблемные вопросы, возникающие при проектировании и экспериментальной отработке, показаны возможные пути их решения.

газогенератор, клапан-газораспределитель, регулятор давления

Введение

Среди многообразия малогабаритных РДТТ, широко используемых в современной ракетно-космической технике, особое место занимают двигатели управления. Основное назначение этих двигателей – создавать в полете ракеты или космического аппарата тяговые усилия по всем каналам управления (тангажу, рысканию и крену) или только по части этих каналов, например, по крену. В литературе [1 – 2] особенности проектирования и экспериментальной отработки двигателя управления освещены недостаточно. Характерной особенностью двигателей управления является импульсный режим действия тяги по отдельным каналам управления. При этом время переключения тяги с одного канала на другой является важнейшим параметром двигателя, значение которого может составлять 0,02 – 0,05 с. В процессе работы двигателя могут быть временные участки, когда тяга должна быть равна нулю. В тех случаях, когда тяга необходима по нескольким каналам, это требование выполняется последовательно индивидуально по каждому каналу путем перераспределения расхода с помощью клапанных устройств. Обеспечить такой

динамичный режим работы двигателя управления возможно только в том случае, если источник рабочего тела – газогенератор работает непрерывно, и имеется набор клапанов-газораспределителей, обеспечивающих тягу по каждому каналу.

Рассмотрим основные проблемные вопросы, которые приходится решать в процессе его проектирования и экспериментальной отработки.

1. Принципиальная схема ДУ

Минимальный потребный суммарный импульс тяги I_{Ry}^{\min} для управления по всем каналам определяется по следующей зависимости:

$$I_{Ry}^{\min} = nR\tau,$$

где n – количество одновременно работающих сопел (обычно $n=2$); R – минимальная тяга в пустоте одного сопла; τ – минимальное время работы.

Исходя из минимизации запасов топлива конструкция двигателя управления может быть реализована в двух вариантах: без регулирования давления и с регулированием давления. Первый вариант двигателя управления – наиболее простой по конструкции.

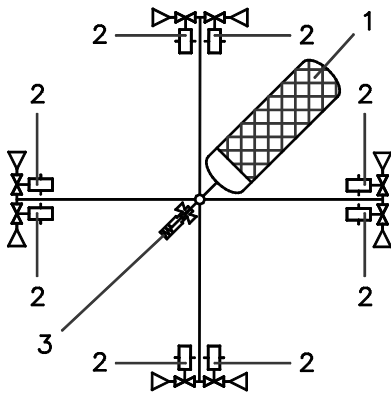


Рис. 1. Принципиальная схема двигателя управления: 1 – газогенератор; 2 – клапан-газораспределитель с соплом; 3 – клапан – регулятор давления

Двигатель (рис. 1) состоит из газогенератора 1 с торцевым зарядом твердого топлива и восьми сопел с клапанами-газораспределителями 2, которые открываются по командам системы управления и создают тяговые усилия по трем каналам управления – тангажу, рысканию и крену.

Если управляющее усилие не требуется, то включение любой пары сопел, находящихся на одной оси, обеспечивает обнуление суммарной тяги. В течение всего времени работы двигателя должны быть непрерывно открыты два из восьми сопел, благодаря чему обеспечивается относительная стабильность давления в камере газогенератора и тяги двигателя. Серьезным недостатком двигателя управления без регулирования давления является то, что разбросы основных характеристик (давления, расхода, времени работы, тяги) из-за технологического и температурного разбросов скорости горения топлива могут достигать значительных величин (до 45 %). Это приводит к тому, что запас топлива приходится брать с большим избытком исходя из необходимости обеспечения минимального времени работы на максимальном режиме (при максимальных скорости горения U_{max} и температуре t_{max}) и минимальной тяги на минимальном режиме (при минимальных скорости горения U_{min} и температуре t_{max}).

Для того чтобы одновременно гарантировать выполнение требований по минимальной тяге и мини-

мальному времени работы, габариты заряда (диаметр и длину) приходится определять из следующих соображений: диаметр заряда – из условия реализации минимальной скорости горения при минимальной температуре; длину заряда – из условия реализации максимальной скорости горения при максимальной температуре.

Запас топлива, рассчитанный из этих условий, значительно (до трех раз) превышает количество, определенное по требуемому импульсу $I_{R_{\Sigma}}^{\min}$. Поэтому более предпочтительным является второй вариант конструкции двигателя – с регулированием давления в камере газогенератора.

В этом варианте в конструкцию вводится клапан-регулятор давления, который позволяет существенно, до величины $\pm 5-7\%$, снизить разбросы давления в камере газогенератора, расхода через рабочие сопла и тяги. Это позволяет, несмотря на сброс неиспользованных излишков расхода продуктов сгорания в окружающую среду, значительно уменьшить запас топлива в двигателе управления.

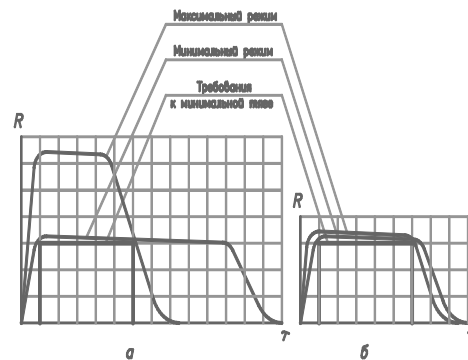


Рис. 2. Предельные диаграммы тяги двигателя управления: а – без регулирования; б – с регулированием по давлению

На рис. 2 представлены предельные диаграммы тяг, получаемые при реализации одних и тех же требований по минимальной тяге и минимальному времени работы в варианте двигателя без регулирования а и с регулированием по давлению б. Из сравнения диаграмм наглядно видно вышеописанное преимущество двигателя с регулированием давления.

2. Выбор топлива

Наличие в конструкции двигателя управления клапанов-газораспределителей и клапана-регулятора давления, исполнительные элементы которых (штоки, поршни, седла, шариковые запирающие элементы) в процессе работы в течение длительного времени находятся под воздействием высокотемпературных продуктов сгорания, накладывает ряд принципиальных ограничений на характеристики твердого топлива.

Опыт разработки двигателей управления показывает, что высокую надежность и работоспособность клапанов-газораспределителей, клапана-регулятора давления и газододов можно обеспечить, применяя твердое топливо с температурой продуктов сгорания не более 1600 К и содержанием в них конденсированной фазы не более 3 %.

Переход на твердое топливо с более высокой температурой продуктов сгорания неизбежно приводит к необходимости использования в конструкции жаропрочных сплавов на основе вольфрама, молибдена, ниобия и теплозащитных покрытий. В результате масса двигателя не уменьшается от применения более высокоэнергетического топлива, а возрастает, поскольку уменьшение массы заряда перекрывается ростом массы конструкции. Кроме того, в продуктах сгорания более высокотемпературных топлив содержится больше конденсированных веществ (окислов сгоревших металлов, продуктов разрушения теплозащиты), что вызывает зашлаковку клапанных устройств и снижение общей работоспособности и надежности двигателя.

Расчетным путем и экспериментально доказано, что использование топлив с указанными выше предельными значениями температуры и содержания к-фазы дает возможность ограничиться применением в конструкции двигателей управления в основном жаропрочных и обычных сталей и только в некоторых случаях использовать молибден, а теплозащита является необходимой только для корпуса камеры газогенератора.

3. Регулятор давления

Для поддержания постоянного давления в камере сгорания газогенератора применяется клапан-регулятор, что позволяет существенно снизить разбросы внутрибаллистических характеристик и уменьшить массу конструкции. Общий принцип регулирования давления следующий. При достижении давления выше требуемого клапан открывается отжатием штока с запирающим элементом от седла (вкладыша). В образовавшийся зазор происходит истечение продуктов сгорания, которые затем сбрасываются через безмоментные сопла. После понижения давления в камере до требуемых значений шток возвращается в исходное положение. Для настройки регулятора на заданный уровень давления в его конструкции предусмотрен узел настройки.

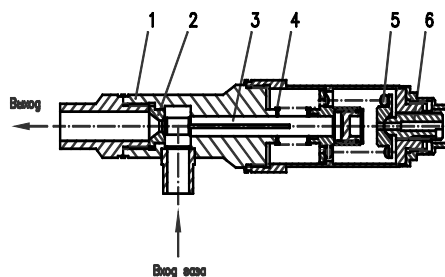


Рис. 3. Клапан-регулятор давления с воздействием давления газа на запирающий элемент через сильфон: 1 – корпус; 2 – седло; 3 – шток; 4 – сильфон; 5 – пружина; 6 – узел настройки

На рис. 3 представлен регулятор давления, в конструкцию которого входят следующие узлы и детали: корпус, седло, шток, сильфон, узел настройки. Узел настройки 6 путем поджатия пружины 5 на определенное усилие регулировочным винтом обеспечивает настройку клапана на требуемый уровень давления. Подвижной шток 3 связан с неподвижным корпусом 1 сильфоном 4. Шток оканчивается тарелью, на которую опирается пружина 5. В закрытом состоянии регулятора шток 3 под действием силы пружины 5 поджат к седлу 2. При превышении давления настройки продукты сгорания через полость сильфона создают усилие, отжимающее шток от седла. В образующийся кольцевой зазор стравливается газ.

4. Клапан-газораспределитель

Клапан-газораспределитель является наиболее сложным по конструкции и трудоемким в экспериментальной отработке узлом двигателя управления. Опыт ГП «КБ «Южное» и других организаций показывает, что из всех возможных вариантов конструкции клапана – электромеханического с поворотной заслонкой, электромагнитного золотникового типа, двухкаскадного газового с электромагнитным управляющим каскадом последний является наиболее оптимальным для двигателя управления. Принципиальная схема такого клапана приведена на рис. 4 и 5. Поскольку обычно время работы одного клапана не превышает 40 % суммарного времени работы двигательной установки, более предпочтительной с точки зрения экономии электроэнергии бортового источника мощности является нормально закрытая схема клапана. Для открытия клапана и создания тяги сопла подается напряжение на обмотку электромагнита 1 управляющего каскада. При этом его якорь 2 посредством штока 3 переводит запирающий шарик 4 управляющего каскада из левого положения в правое, перекрывая доступ газа в поршневую полость *a* силового каскада и одновременно стравливая из нее давление газа через отверстие *б*. Это приводит к снятию усилия с поршня 5, действующего на запирающий элемент 6, который под воздействием давления продуктов сгорания газогенератора перемещается, открывая путь газа к соплу.

Для закрытия клапана снимается напряжение с обмотки электромагнита 1 управляющего каскада и происходит обратный процесс: при этом исчезает воздействие электромагнита 1 на запирающий шарик 4 управляющего каскада и под воздействием давления управляющего газа шарик перемещается в обратном направлении, перекрывая отверстие стравливания газа *б* и открывая путь поступления управляющего газа в поршневую полость *a*.

Под воздействием давления газа поршень 5 перемещает запирающий элемент 6 силового каскада и перекрывает поступление продуктов сгорания в сопло.

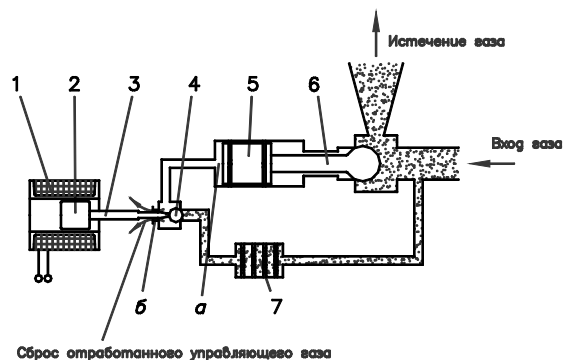


Рис. 4. Принципиальная схема клапана-газораспределителя в открытом состоянии:
1 – магнит; 2 – якорь электромагнита; 3 – шток управляющего каскада; 4 – запирающий элемент-шарик управляющего каскада; 5 – поршень; 6 – запирающий элемент-булава силового каскада; 7 – фильтр; а – поршневая полость; б – отверстие стравливания управляющего газа

Упрощенная конструкция газового клапана с электромагнитным управляющим каскадом приведена на рис. 6. Силовой каскад клапана содержит запирающий элемент 1 в виде булав и поршень 2 с обтюраторными кольцами. Выбор цельной булав в качестве запирающего элемента силового каскада вместо шарика и толкающего его штока, как показали огневые испытания клапана, более предпочтителен, так как поверхности булав и седла в процессе работы взаимно прирабатываются, благодаря чему достигается хорошая герметичность клапана в закрытом положении. Этого не получается в случае применения шарика с толкателем, поскольку он может проворачиваться в процессе работы.

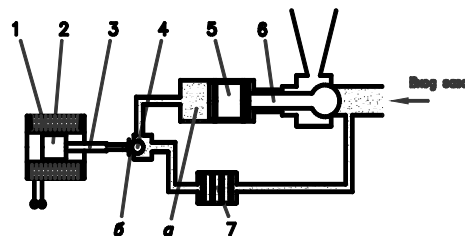


Рис. 5. Принципиальная схема клапана-газораспределителя в закрытом состоянии:
1 – магнит; 2 – якорь электромагнита; 3 – шток управляющего каскада; 4 – запирающий элемент-шарик управляющего каскада; 5 – поршень; 6 – запирающий элемент-булава силового каскада; 7 – фильтр; а – поршневая полость; б – отверстие стравливания управляющего газа

Управляющий каскад клапана включает в себя запирающий элемент 4 в виде шарика, шток 5 и электромагнит 6. При конструировании клапана-газораспределителя важно обеспечить нормальное функционирование управляющего каскада, на что существенное влияние оказывает нагрев электромагнита и зашлаковка зазоров в подвижных элементах. Избежать недопустимого перегрева электромагнита помогают мероприятия, затрудняющие переток тепла по конструкции клапана из зоны сильного нагрева к электромагниту. К таким мероприятиям следует отнести прежде всего дистанционное удаление электромагнита от сильно нагреваемых элементов клапана, установку теплозащитных прокладок и тепловых мостов. Зашлаковку помогает избежать предварительная фильтрация управляющего газа.

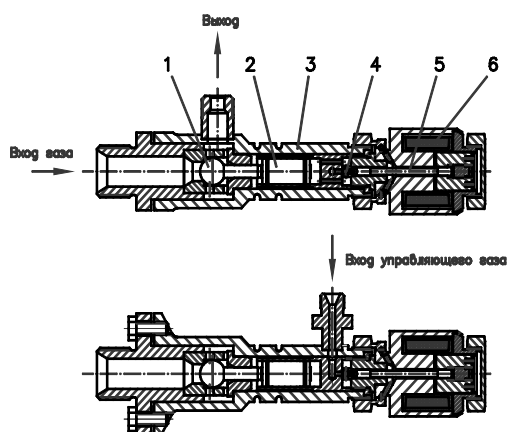


Рис. 6. Упрощенная конструкция газового клапана с электромагнитным управляющим каскадом:

1 – запирающий элемент-булава силового каскада; 2 – поршень с обтюрирующими кольцами; 3 – корпус; 4 – запирающий элемент-шарик управляющего каскада; 5 – шток; 6 – электромагнит

Экспериментальная отработка показала, что приведенная конструкции клапана-газораспределителя вполне работоспособна при расходе горячего газа с температурой 1600 К не менее 100 г/с в течение времени более 60 с. Клапан работал с частотой 8 Гц, при этом в ходе его работы допускались паузы в течение 10 с, после чего клапан продолжал нормально функционировать.

Особенность экспериментальной отработки двигателей управления состоит в том, что для достиже-

ния надежной работоспособности клапана-газораспределителя требуется проведение гораздо большего количества огневых испытаний, чем для других двигателей. В связи с этим целесообразно отработку клапана-газораспределителя проводить автономно с использованием стендового корпуса газогенератора многократного использования, который специально проектируется с большими запасами по работоспособности в части прочности и теплозащитности. Вкладная конструкция заряда газогенератора позволяет оперативно его перезарядить и испытывать, что дает возможность в конечном итоге значительно сократить стоимость и сроки экспериментальной отработки двигателя в целом.

Необходимо также отметить сложность измерения тяги двигателя управления для всех задействованных в процессе огневого пуска сопел, особенно учитывая чрезвычайно динамичный характер их включения и выключения. В связи с этим при планировании экспериментальной отработки следует предусматривать проведение специальных энергетических пусков, на которых задействуются только два сопла одного направления действия тяги на весь период работы двигателя без переключений на другие сопла. Такой вид испытаний позволяет определить тягу двигателя в стационарном режиме с максимальной достоверностью.

Литература

1. Беляев Н. М., Уваров Е.И., Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. – М. Машиностроение, 1974. – 221 с.
2. Абугов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. – М. Машиностроение, 1987. – 272 с.

Поступила в редакцию 14.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Климов, ГП Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск.