

УДК 621.455 (071.1)

## Регулирование тяги газогенераторного ПВРД ТТ

***Кытманов И. В.**, студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Ракетные и импульсные системы»*

*Научный руководитель: Никитина И.Е., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

В настоящее время большой интерес вызывает рассмотрение возможности увеличения баллистических характеристик тактических образцов ракет за счет применения в качестве двигательных установок (ДУ) прямоточных воздушно-реактивных двигателей твердого топлива ПВРД ТТ.

Основным преимуществом прямоточных воздушно - реактивных двигателей твердого топлива (ПВРД ТТ) или ракетно-прямоточных двигателей твердого топлива (РПД ТТ) перед классическими ракетными двигателями на твердом топливе (РДТТ) и жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) является тот факт, что в ПВРД или РПД окислитель, необходимый для реакции горения топлива, является атмосферным воздухом. Через тракт воздухозаборного устройства (ВЗУ) окислитель подается в камеру сгорания, обеспечивая достаточно высокую полноту сгорания горючего. В конечном итоге такие двигательные установки сообщают летательному аппарату импульс, на порядок больший, чем классические РДТТ или ЖРД.

Актуальность данного исследования состоит в том, что в ПВРД ТТ используется газогенераторная схема подачи горючих компонентов топлива. Эти двигатели являются одними из перспективных для использования в ракетах различных типов.

В ПВРД суммарный эффект достигается совместным горением горючего и окислителя, и достаточно в небольших пределах изменить подачу горючего для существенного изменения импульса и тяги. Топливо для ПВРД обладает высокой энергетической способностью, что позволяет уменьшить массу необходимого топлива в сравнении с классическими двигателями.

В настоящее время актуальна задача обеспечения регулирования скорости полета и тяги двигателя для реализации на одном изделии различных вариантов траекторий полета.

Учитывая опыт решения вопроса регулирования тяги  $P$  в РДТТ, были проведены исследования нескольких вариантов принципиальных схем решения, предусматривающих регулирование критического сечения выходного сопла, отсечку тяги и т.д.

Предметом исследования является реализация регулирования газогенератора ПВРД на тактическом образце вооружения. На рисунке 1 приведена принципиальная схема тактического образца вооружения. Внешне образец представляет собой корпус планера аэродинамической формы с крыльями и воздухозаборными устройствами.

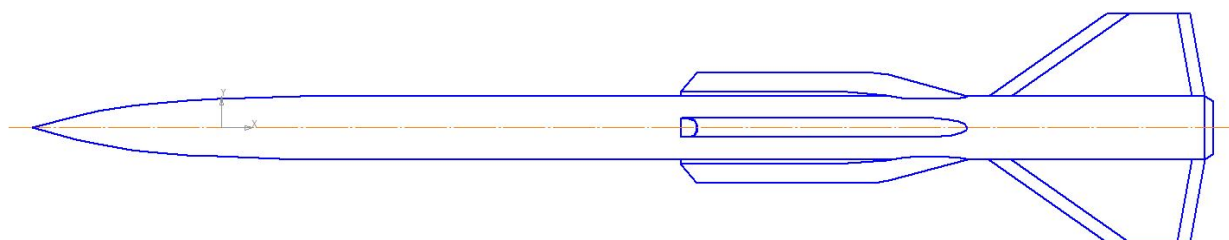


Рис. 1. Схема тактического образца вооружения

Для регулирования рассматриваем ПВРД генераторной схемы подачи горючего в камеру дожигания, который представлен на рисунке 2 и представляет собой конструкцию, состоящую из следующих основных компонентов: заряд твердого топлива 1, размещенный в газогенераторе 2, система подачи воздуха с ВЗУ 3 и камера сгорания с сопловым блоком 4.

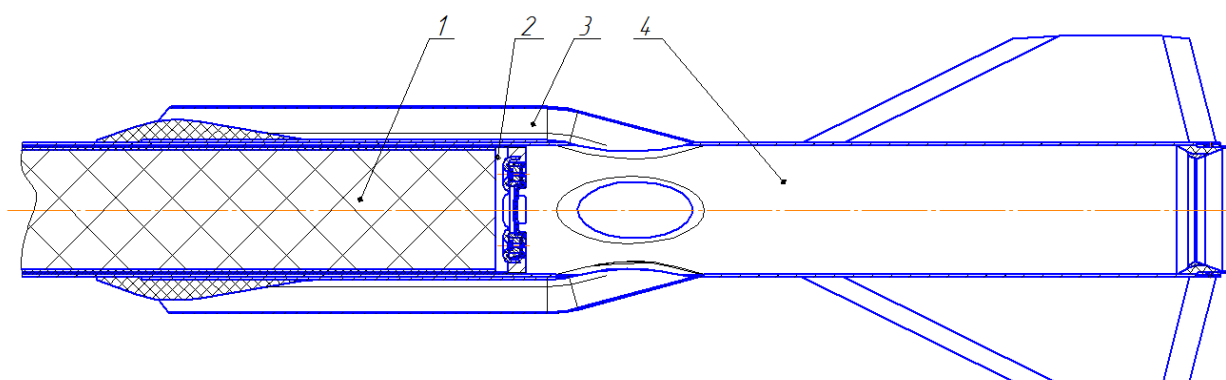


Рис. 2. Схема ПВРД генераторной схемы подачи

На рисунках 3, 4 показаны графики отражающие 3 основных этапа полета ракеты: стартовый участок, маршевый и участок наведения. На стартовом участке ракета набирает скорость с помощью стартового РДТТ до скорости 600 м/с, после чего включается в

работу РПД ТТ на разгонном режиме. После достижения высоты в 10000 м ракета переходит на горизонтальный участок полета и РПД переходит в маршевый режим. На участке наведения ракета должна снизить скорость до 180 м/с и опуститься на высоту в 500 м для обеспечения маскировки перед РЛС возможного противника.

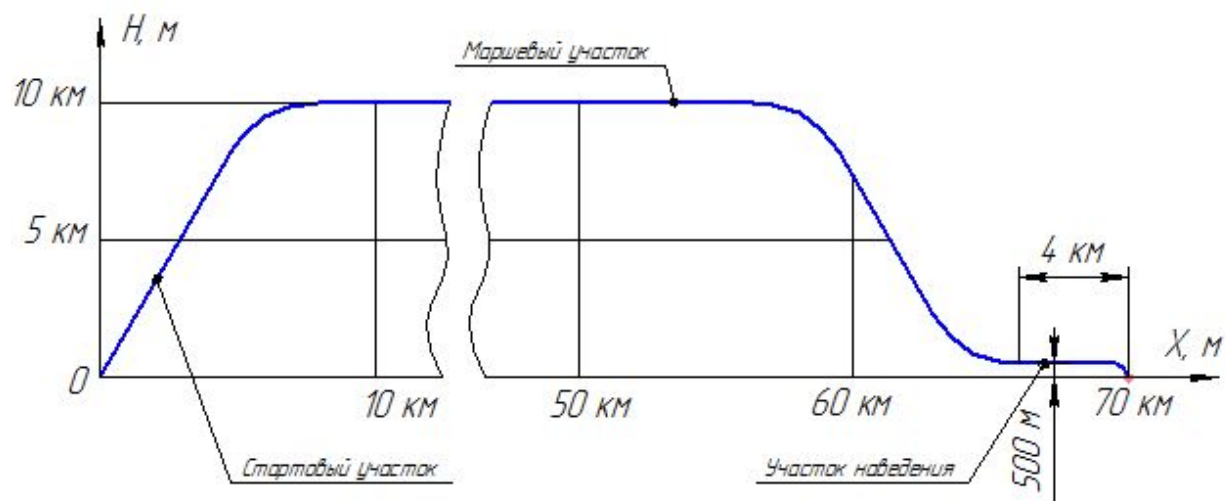


Рис. 3. График траектории ракеты

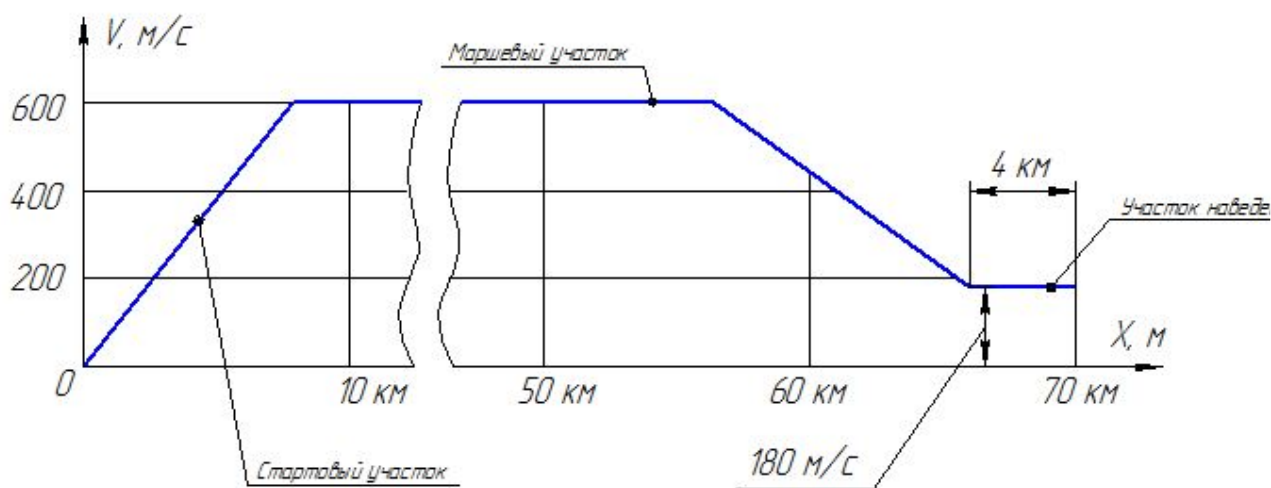


Рис. 4. График скорости ракеты

Учитывая, что расход определяется по следующей формуле:

$$G = \rho \cdot V \cdot F - \text{расход},$$

где  $\rho$  — плотность газов,  $V$  — скорость потока и  $F$  — площадь поперечного сечения канала; и в рассматриваемом случае P-var, G-var, Fвых-var; следует, что для изменения

расхода продуктов сгорания необходимо увеличивать или уменьшать площадь «критического» сечения сопла  $F_{кр}$ , или площадь проходного сечения газов  $F$ .

Исходя из этого принимаем следующую схему для поиска необходимого решения, состоящую из следующих основных частей: 1 - газогенератор с зарядом ТТ, 2 - элемент регулирования тяги, 3 - полость ресивера, 4 - крышка ресивера с равномерно распределенными отверстиями для выхода газов.

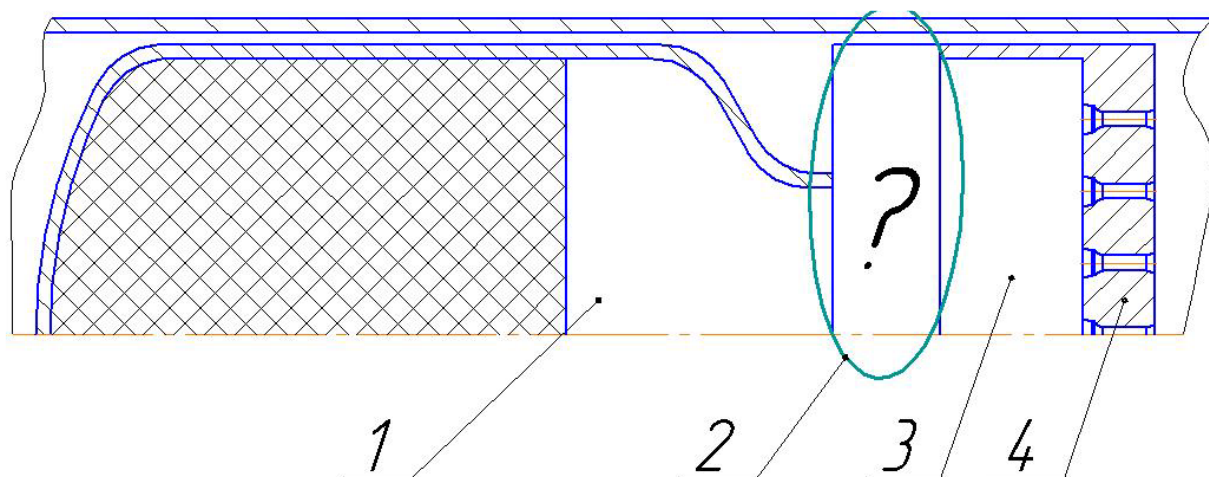


Рис. 5. Схема поиска решения

Ниже представлены несколько возможных вариантов регулирования расхода газогенератора:

#### **1. Регулирование с помощью 6-ти лепестковой диафрагмы:**

Одним из возможных вариантов изменения силовой характеристики двигателя является регулирование с помощью диафрагмы, который состоит из следующих основных частей: 1 – лепестки; 2 – штифт подвижной втулки 5, который поворачивает лепестки 1 по пазам-копирам; 3 – неподвижное кольцо, к которому крепятся лепестки 1 через штифты 4; 4 – штифт, вокруг которого вращается лепесток (ось лепестка); 5 – подвижная втулка; 6 – червячное колесо; 7 – червяк; 8 – электропривод; 9 – корпус ресивера и 10 – крышка ресивера. Схема обладает следующим принципом действия:

Лепестки 1 крепятся к штифтам 4, вокруг которых они поворачиваются. Штифты 4 жестко вставлены в неподвижное кольцо 3.

Лепестки выполнены таким образом, что на них имеются пазы-копиры, по которым движется штифт 2. Штифты 2 жестко соединены с подвижной втулкой 5. На подвижной втулке находится червячное колесо 6.

Привод 8 через червячную передачу 6-7 передает вращательное движение подвижной втулке 5. Подвижная втулка через штифты 2 заставляет лепестки сходиться или расходиться в зависимости от направления движения червячного колеса. Таким образом, происходит открытие и закрытие диафрагмы.

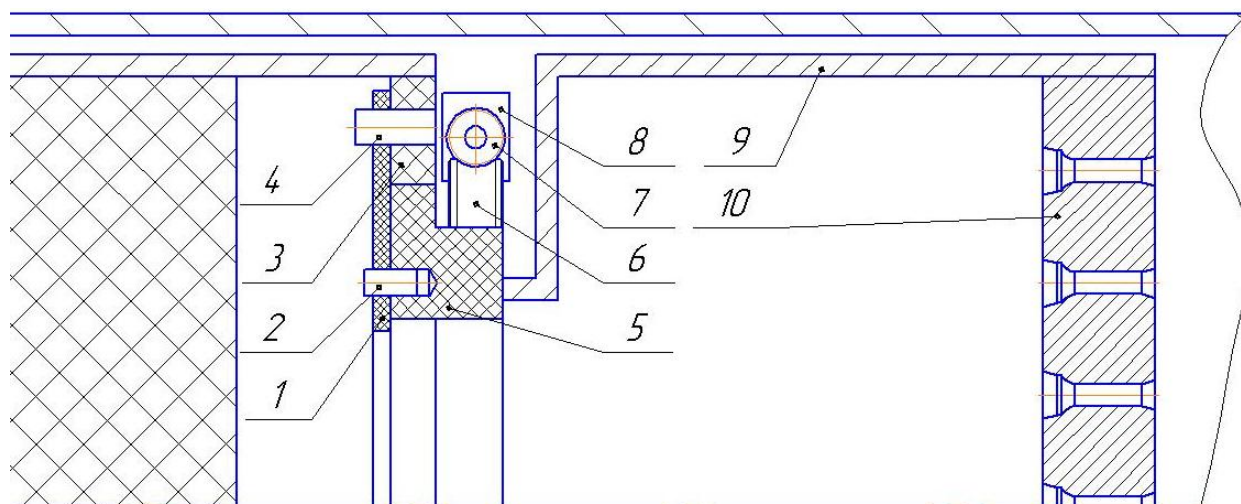


Рис. 6. Схема регулирования с помощью 6-ти лепестковой диафрагмы

Можно выделить 3 основных положения регулятора: полностью открытое положение (а), среднее положение (б) и закрытое положение (в).

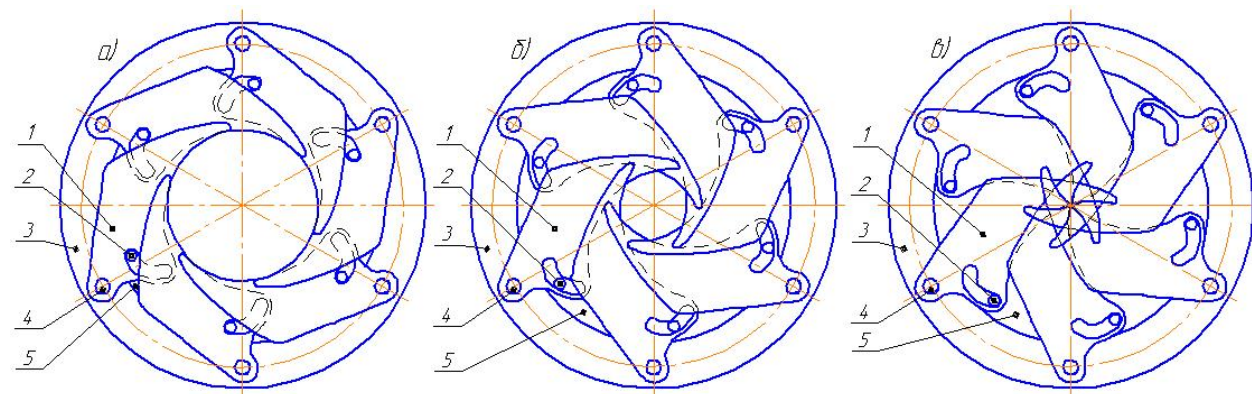


Рис. 7. Положения диафрагмы во время работы

Лепесток диафрагмы представлен на рисунке 8 и состоит из следующих основных элементов: лепесток, пружина возврата, паз-копир и ось вращения.



Рис. 8. Элементы лепестка диафрагмы

Принципиальная внешняя габаритная модель регулятора показана на рисунке 9.

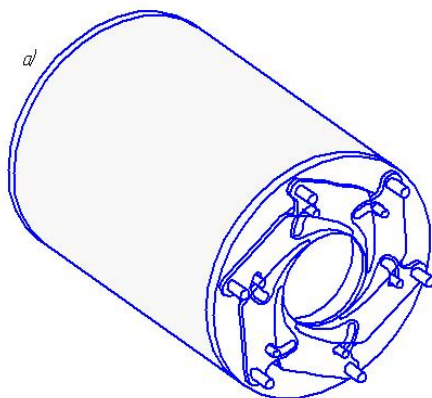


Рис. 9. Габаритная модель регулятора

Данная схема регулирования обладает следующими достоинствами: возможностью большого диапазона изменения диаметра выходного сечения, возможностью многократной регулировки во времени. Также схема позволяет изменять количество лепестков при неизменности схемы работы.

К недостаткам данной схемы можно отнести сложность размещения электропривода для внутреннего кольца, которое перемещает лепестки. Во время работы лепестки подвержены большим нагрузкам, из-за чего существует опасность заклинивания механизма. Для реализации такой схемы необходимо использовать материал стойкий к высоким температурам, который существенно дороже обычных материалов.

## **2. Регулирование газогенератора с применением вращающейся сопловой заслонки:**

Следующий вариант регулирования представлен на рисунке 10 и принцип действия состоит в следующем: силовой привод 2 передает вращательное движение заслонке 1, которая увеличивает или уменьшает площадь прохода газов по соплу.

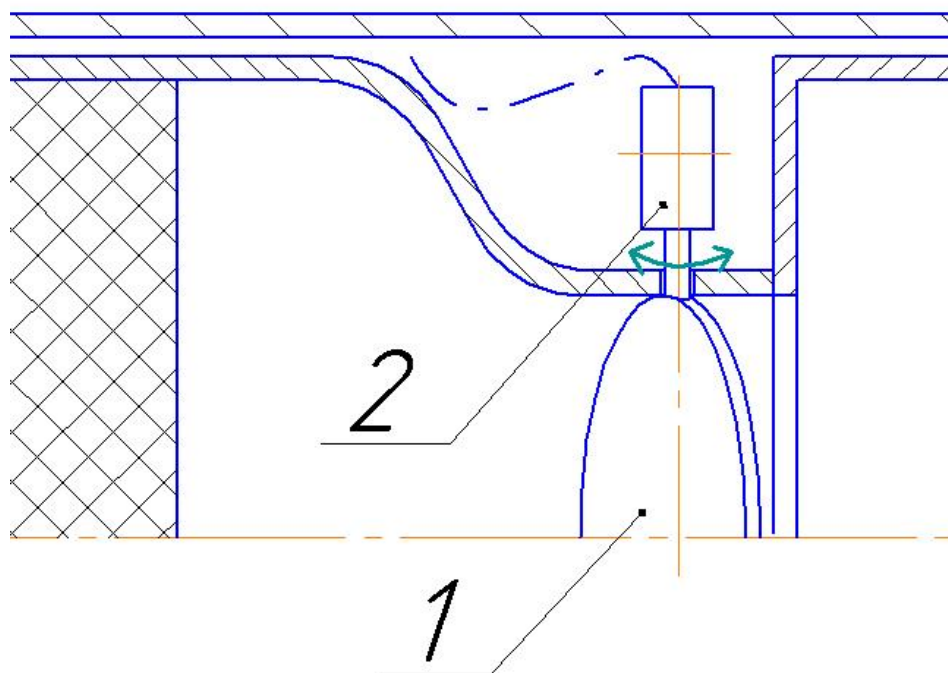


Рис. 10. Схема регулирования газогенератора с применением сопловой заслонки

Конструктивно можно силовой привод подключить через червячную передачу. Принцип действия состоит в следующем: силовой привод, через муфту передает вращательное движение червяку 4, который приводит в движение червячное колесо 3, соединенное осью 2 с заслонкой 1, которая непосредственно уменьшает площадь прохода газов через сопло. Вариант регулирования заслонкой с червячной передачей показан на рисунке 11.

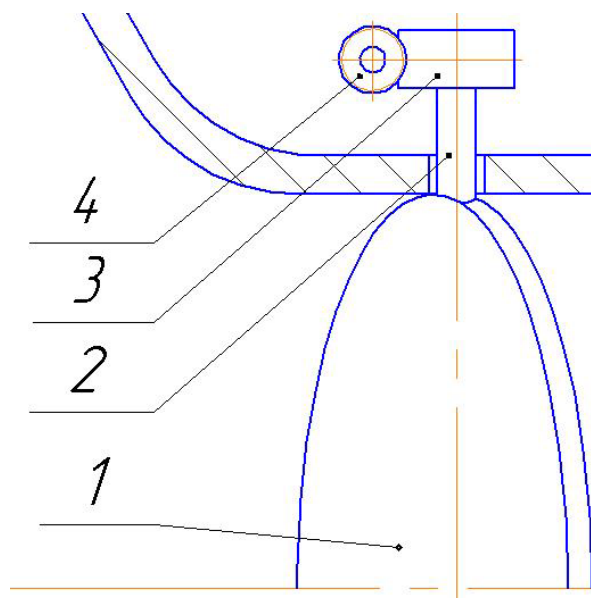


Рис. 11. Сопловая заслонка с червячной передачей

Известны следующие варианты применения такой схемы в технике: заслонки для регулирования количества воздуха или т.п. (см. рисунок 12).



Рис. 12. Воздушные заслонки.

Из достоинств такой схемы можно выделить относительную простоту конструкции (по сравнению с вариантом №1). Существенным недостатком является необходимость применения термоустойчивого материала для рабочей заслонки, что существенно повышает стоимость конструкции. Также минусом является необходимость мощного силового привода, необходимого для поворота заслонки, так как возможно возникновение высокого уровня усилий противодействующих повороту заслонки при работе.

В перспективе возможно рассмотрение варианта с применением пружины, уменьшающей усилия, необходимые для поворота заслонки.

### **3. Регулирование газогенератора с помощью колец с пазами:**

Одним из интересных вариантов технического решения является регулирование с помощью колец с пазами, представленный на рисунке 13. Схема состоит из следующих составных элементов: 1 - неподвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 1а и 1б; 2 - подвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 2а и 2б; 3 - подшипник качения; 4 - кинематическая пара, передающая вращательное движение от привода подвижному кольцу 2; 5 - вал, на который устанавливается подшипник 3.

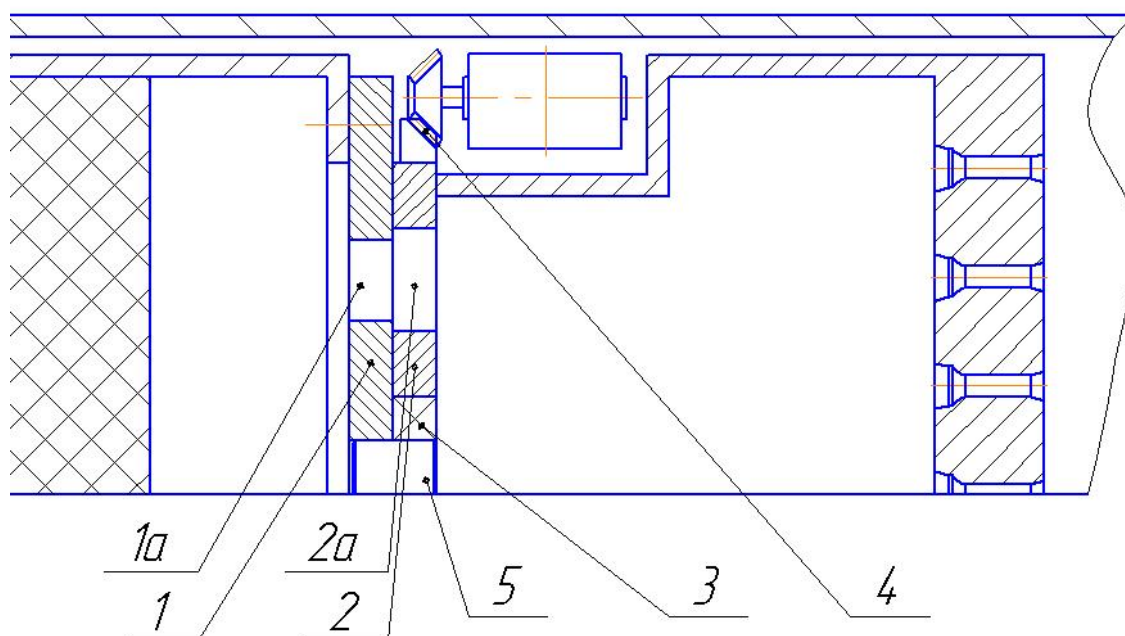


Рис. 13. Схема регулирования с помощью колец с пазами

Эта же схема с червячной передачей, вместо конической, представлена на рисунке 13. Червячная передача позволяет реализовать больший момент при сравнительно малых нагрузках на электродвигатель. Схема включает следующие элементы: 1 - неподвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 1а и 1б; 2 - подвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 2а и 2б; 3 - подшипник качения; 4 - червячное колесо; 5 - вал, на который устанавливается подшипник 3; 6 – червяк и 7 – силовой привод;

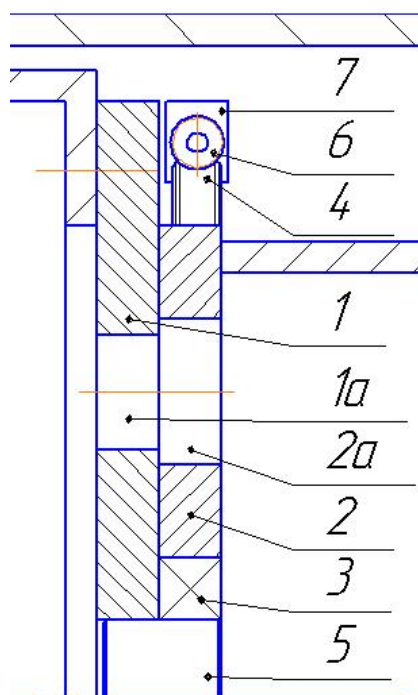


Рис. 14. Схема регулирования с помощью колец с пазами с червячной передачей

Принцип действия данной схемы состоит в следующем: привод 7 через червячную передачу 4 и 6 передает вращательное движение кольцу 2. Кольцо 2, поворачиваясь, с помощью пазов, имеет возможность уменьшать или увеличивать площадь свободного прохода газов. Пазы на кольце 1 немного больше, чем пазы на кольце 2, что позволяет гарантированно прекратить проход газов при закрытии.

Варианты перекрытия площади свободного прохода газов во время работы представлены на рисунке 15. Все остальные конструктивные элементы на рисунке не показаны. Регулятор может находиться в 3 положениях: а – полностью открытое положение регулятора, б – частично открытое положение регулятора, в – полностью закрытое положение регулятора. На схеме: 1 - неподвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 1а и 1б; 2 - подвижное кольцо с 2 симметрично расположенными относительно оси пазами 2а и 2б;

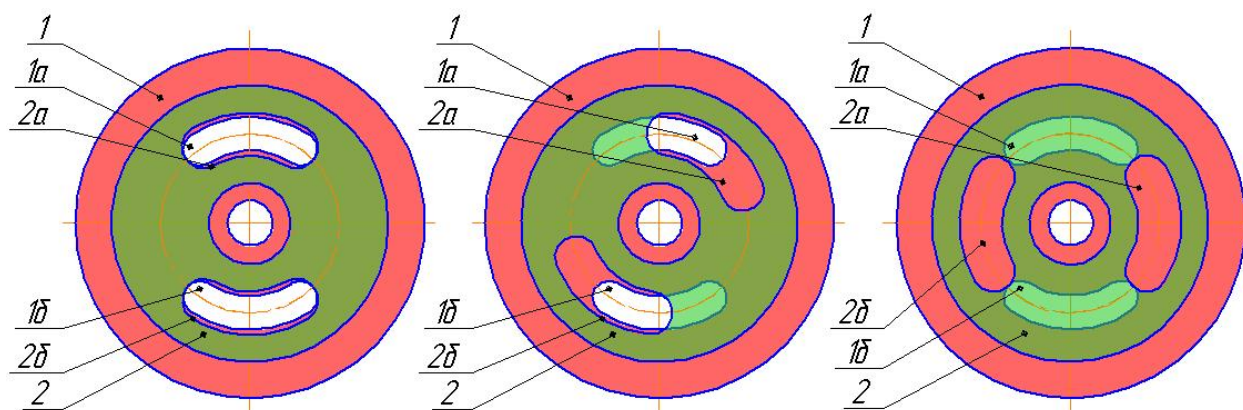


Рис. 15. Различные положения регулятора во время работы

Данный вариант регулирования позволяет реализовать большой диапазон изменения площади свободного прохода газов и многократно регулировать площадь свободного прохода газов во времени. Недостатком является сложность передачи крутящего момента подвижному кольцу от привода.

#### **4. Регулирование расхода газа с помощью передачи винт-гайка:**

Иногда существует возможность регулирования проходного сечения поступательным движением к соплу какого-либо тела. В данном варианте проходное сечение сопла перекрывается с помощью поступательного движения центрального тела от передачи винт-гайка. Центральное тело выполняется грушевидной формы, повторяющей форму диффузора сопла. На рисунке 16 показана схема регулирования, включающая следующие основные элементы: 1 - центральное тело; 2 - гайка с отверстиями для прохода газов, установленная в корпусе ресивера, 3 – муфта, выполненная с внутренним шестигранным отверстием; 4 - шестигранник, соединенный с валом привода; 5 - привод; 6 - корпус, предохраняющий элементы системы от повреждений горячими газами и 7 - корпус ресивера.

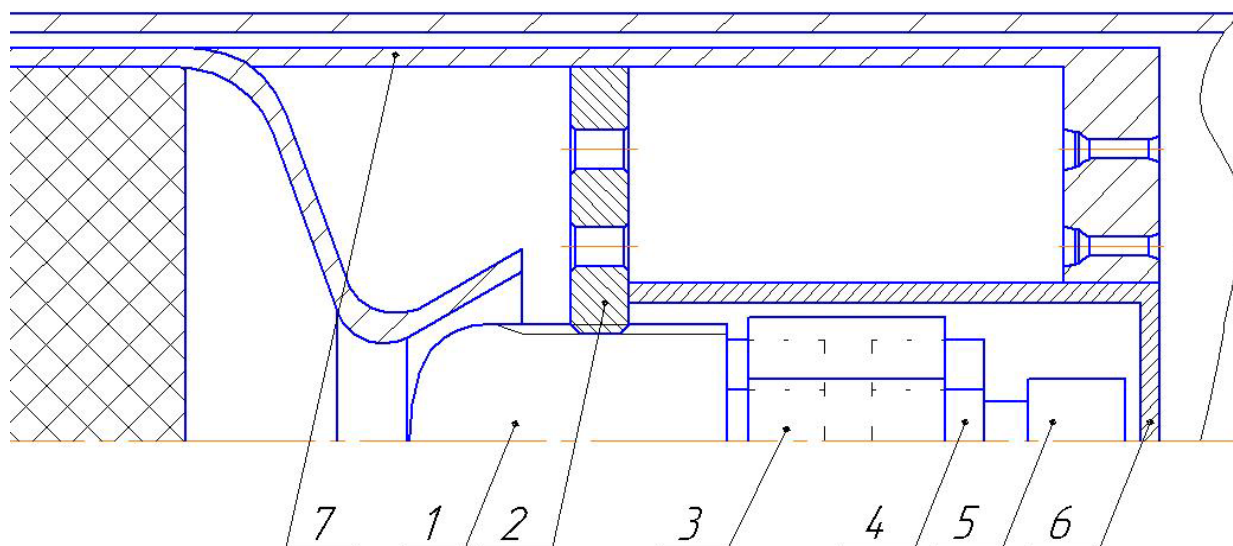


Рис. 16. Схема регулирования с помощью передачи винт-гайка

Принцип действия данной схемы состоит в следующем: привод 5 передает вращательное движение с помощью шестигранника 4, соединенного с валом привода и муфтой 3, на центральное тело, которое, вращаясь в гайке 2, совершает поступательное движение к соплу. Таким образом, перемещая центральное тело вперед-назад увеличивается или уменьшается площадь свободного прохода газов через сопло.

Питание и управляющие сигналы приводу планируется передавать через защищенный провод, который устойчив к влиянию горячих газов.

Соединение между силовым приводом и центральным телом планируется с помощью муфты следующей конструкции: муфта 3 соединяет между собой винт 1 и вал привода 4. Муфта удлинена, что позволяет винту перемещаться поступательно при стационарном положении привода. Внутреннее отверстие муфты 3 может быть различным.

В данном случае представлена муфта с внутренним отверстием в виде шестигранника и показана на рисунке 17.

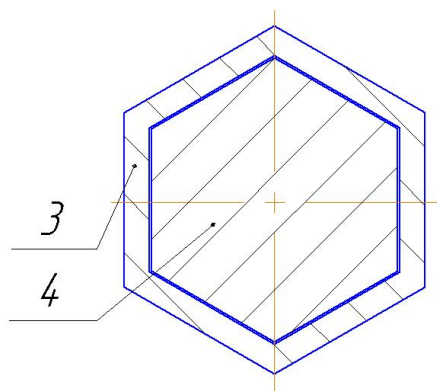


Рис. 17. Вариант применяемой муфты

К достоинствам данной схемы следует отнести возможность полного закрытия сопла и возможность многократной регулировки площади свободного прохода газов во времени. У схемы также есть ряд существенных недостатков, которые требуют применения термоустойчивого материала для винта 1 и гайки 2, способного работать в условиях воздействия горячих газов и также сложность реализации подачи управляющих сигналов и защиты механизма от воздействия горячих газов.

#### **5. Выход газов из газогенератора с помощью поворотного кольца на корпусе:**

Данная схема относится не к регулированию площади свободного прохода газов, а к схеме «выключения» двигателя с помощью сброса давления в камере сгорания. Схема выброса газов с помощью поворотного кольца на корпусе показана на рисунке 17.

Принцип действия состоит в следующем: поворотное кольцо 2 вращаясь вокруг корпуса газогенератора имеет возможность открывать или закрывать отверстия для выхода газов, что позволяет изменять расход и соответственно заглушить газогенератор. В случае полного закрытия колец реализуется расчетный режим газогенератора. Во время работы возможны следующие варианты открытия газогенератора: полностью открыт (а), частично открыт (б), полностью закрыт (в).

Регулирование осуществляется за счет применения соосных колец 1, 2 с диаметрными отверстиями 3, 4.

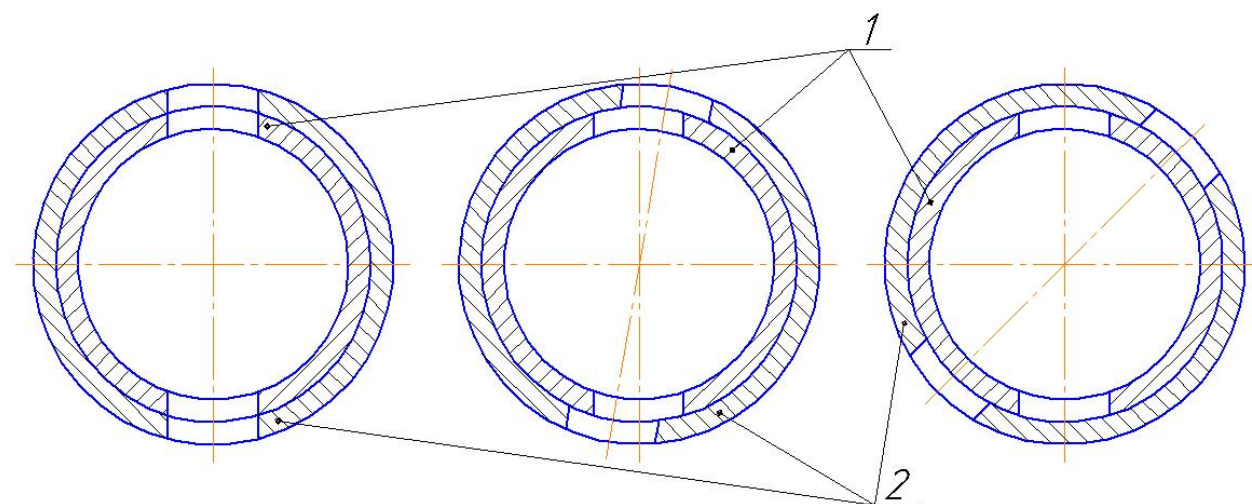


Рис. 18. Схема устройства для выхода газов с помощью поворотного кольца на корпусе и её различные положения во время работы

## **6. Выброс газов из газогенератора с помощью крышки на корпусе:**

Данная схема тоже относится к схемам «глушения» двигателя и показана на рисунке 18. Вариант выброса газов с помощью крышки на корпусе состоит из следующих основных частей: 1 - корпус газогенератора; 2 - крышка, открывающая и закрывающая отверстие для выброса газов и 3 - корпус ракеты. Принцип действия состоит в следующем: крышка 2 двигаясь поступательно имеет возможность открывать или закрывать отверстия для выброса газов, что позволит уменьшить тягу или заглушить газогенератор. Полости между газогенератором 1 и корпусом 3 герметизируются, чтобы не поразить внутренние элементы ракеты горячими газами.

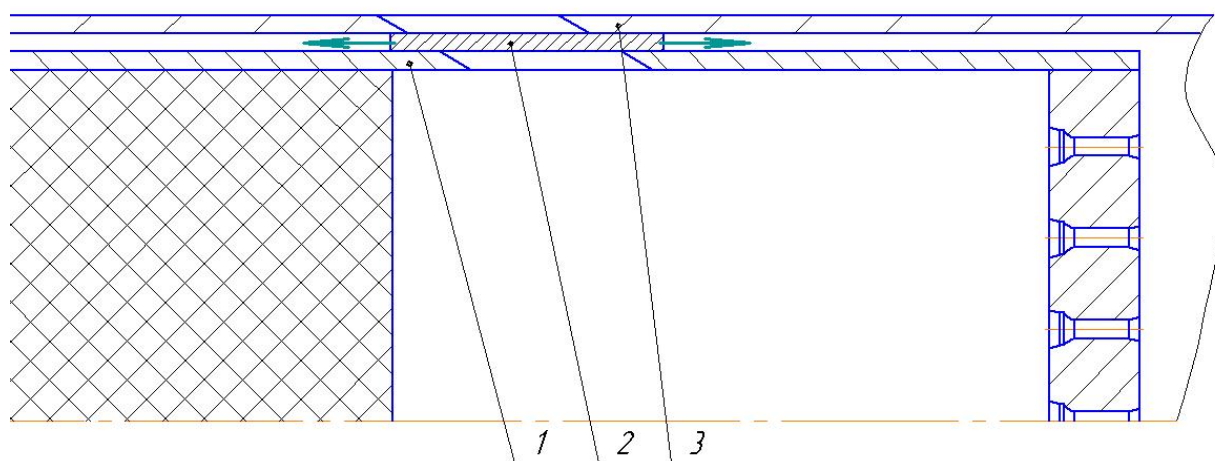


Рис. 18. Схема выброса газов из газогенератора с помощью крышки на корпусе

В заключение следует отметить, что на основании расчетно-теоретических исследований рассмотренных способов регулирования подачи горючих компонентов в камеру дожигания ПВРД ТТ по предварительной оценке, соответствующей стадии разработки технического предложения, наиболее дешевым по стоимости, относительно простым в производстве и надежным в эксплуатации является вариант регулирования газогенератора с помощью колец с пазами, который рекомендован к проектной разработке.

## **Список литературы**

1. Обносов Б.В., Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А., Францкевич В.П., Животов Н.П., Суриков Е.В., Кобко Г.Г., Тихомиров М.А., Шаров М.С. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе / под ред. В.А. Сорокина. 2-е изд. перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 303 с.

2. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов / под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1967. 424 с.
3. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1995. 400 с.