|  |  |
| --- | --- |
| Gerb-BMSTU_01 | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н. Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н. Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ «СПЕЦИАЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

КАФЕДРА «РАКЕТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ» (СМ-6)

**ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

|  |
| --- |
| Проектирование энергетических установок ракетного оружия |
|  |

НА ТЕМУ:

|  |
| --- |
| Проектирование ИДК |
|  |
|  |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил: студент группы | СМ6-92 |  |  |  | Говорун Г. А. |
|  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Проверил |  |  |  |  | Фёдоров А. А. |
|  |  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

Москва, 2021 г.

Содержание

[1. Техническое задание 3](#_Toc90334380)

[1.1. Этапы выполнения 3](#_Toc90334381)

[2. Формирование недостающих исходных данных 4](#_Toc90334382)

[2.1. Выбор конструктивного решения ИДК 4](#_Toc90334383)

[2.2. Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса 4](#_Toc90334384)

[2.3. Определение времени работы ИДК 6](#_Toc90334385)

[2.4. Определение действительного значения коэффициента тяги 7](#_Toc90334386)

[2.5. Определение величины тяги на квазистационарном участке 7](#_Toc90334387)

[2.6. Выбор марки топлива 9](#_Toc90334388)

[3. Определение геометрических размеров сопла 10](#_Toc90334389)

[4. Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла 12](#_Toc90334390)

[5. Проектирование заряда твердого топлива 13](#_Toc90334391)

[6. Второе приближение 16](#_Toc90334392)

[7. Определение навески воспламенителя 20](#_Toc90334393)

[8. Построение индикаторных кривых 23](#_Toc90334394)

[9. Конструкторская проработка 32](#_Toc90334395)

[Заключение 34](#_Toc90334396)

[Список использованной литературы 35](#_Toc90334397)

1. **Техническое задание**

Спроектировать блок из n=4 радиально расположенных импульсных двигателей коррекции, для поперечной коррекции ЛА калибром D=175 мм. Количество импульсов – Nкор=4. Суммарный импульс коррекции не менее при телесном угле коррекции . Частота вращения ЛА , скорость полёта в момент коррекции – . Время выхода двигателя на режим не более . Максимальная масса одного двигателя не более кг. Температурный диапазон эксплуатации

## Этапы выполнения

1. Сформировать недостающие исходные данные.

2. Спроектировать сопло и рассчитать газодинамические параметры потока на выходе.

3. Спроектировать топливный заряд по критерию минимальной массы.

4. Провести проверочный расчет в диапазоне заданных температур применения.

5. Разработать конструкцию спроектированного импульсного двигателя коррекции.

6. Рассчитать массовые характеристики ИДК.

## **Формирование** недостающих исходных данных

## Выбор конструктивного решения ИДК

Так как полный импульс относительно невелик Н·с, учитывая небольшой калибр снаряда D = 0,175 м, принимается решение о радиальном расположении по периферии корпуса ЛА 4-х идентичных однокамерных ТТД с центрально расположенным у каждого двигателя форкамерно-воспламенительным устройством трубчатого типа и односопловыми блоками для каждого двигателя. Схема размещения представлена на рис. 1.

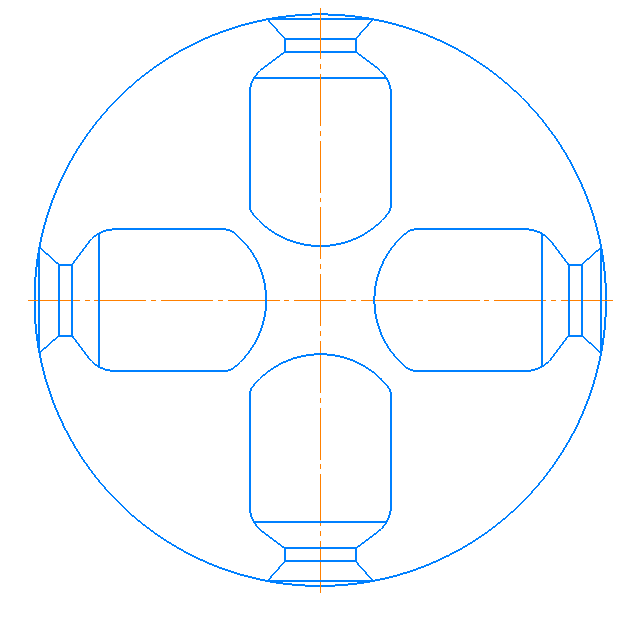


Рис. 1. Компоновочное решение

* 1. **Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса**

По имеющимся значениям диаметра миделя и количества ИДК, размещаемых в одном сечении, строится сектор с углом раствора равным 90°. Отступив от границ сектора зазор h (3 мм), вырисовывается новый сектор, в котором должен быть размещен ИДК. В данном случае невозможно определить размеры однозначно, так как длина двигателя будет зависеть от диаметра. Необходимо в начальном приближении назначить диаметр ( = 75 мм) и найти предельно возможную длину ИДК (*l* = 36,6 мм – длина прямоугольного участка).

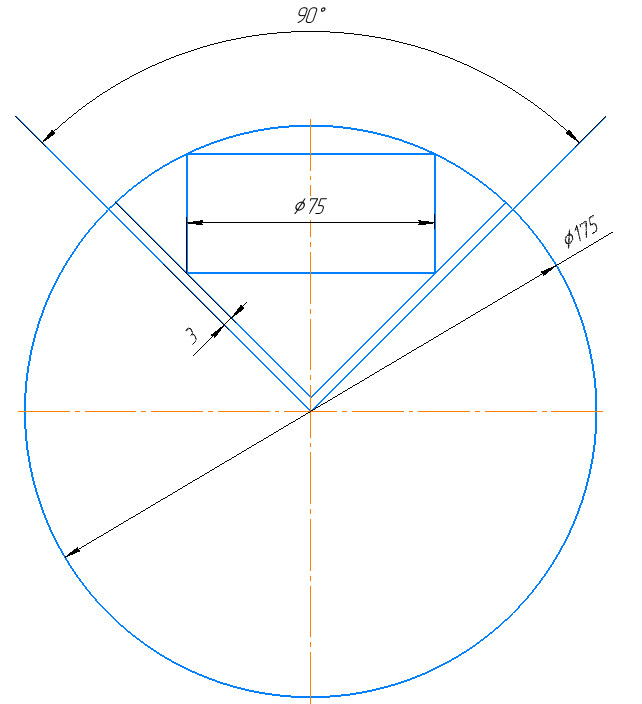


Рис. 2. Предварительная прорисовка поперечного заполнения корпуса ЛА

В первом приближении назначим давление внутри камеры сгорания ИДК Мпа. Тогда толщина стенки камеры сгорания ИДК:

где МПа - прочность материала стенки (СП-43Ш), – коэффициент запаса прочности.

Внутренний диаметр камеры ИДК:

м.

* 1. **Определение времени работы ИДК**

Движение снаряда по траектории происходит с вращением.

Полное расчетное время работы ИДК:

Время воспламенения основного заряда ИДК .

Для расчета времени горения основного заряда ИДК назначим коэффициент заполнения индикаторной кривой давления от полного расчетного времени работы ИДК (рис. 3).

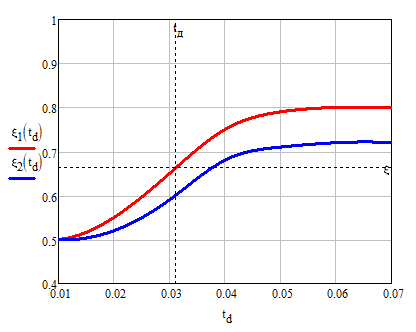


Рис. 3. График зависимости от

Возьмем значение 0,664, при котором время горения заряда будет соответствовать времени работы ИДК.

Время горения основного заряда ИДК:

Время последействия:

* 1. **Определение действительного значения коэффициента тяги**

Назначим в первом приближении коэффициент расширения сопла

Тогда теоретический коэффициент тяги .

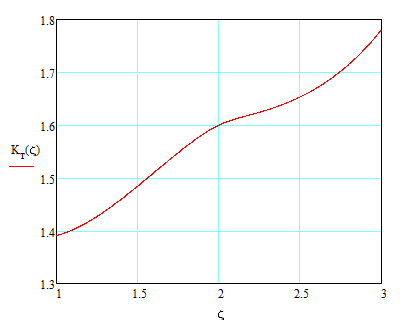


Рис. 4. Зависимость теоретического коэффициента тяги от коэффициента расширения сопла

Коэффициенты потерь назначаются по рекомендациям для данного типа конструкций.

- коэффициент тепловых потерь;

- коэффициент скоростных потерь;

Действительный коэффициент тяги:

* 1. **Определение величины тяги на квазистационарном участке**

Поправочные коэффициенты для тяги:

коэффициент, учитывающий снижение эффективности действия тяги за счет вращения.

Приняв, что коррекция происходит при Н=0 м (), найдем число Маха:

поправка на усиление реакции выдуваемого потока на поверхность снаряда;

Необходимая величина тяги одного двигателя на квазистационарном участке:

* 1. **Выбор марки топлива**

Выбранная марка топлива: Б-3. Топливо имеет стабильный характер закона горения, а также наибольшую скорость горения, чем и обусловлен выбор данного типа топлива.

Характеристики выбранной марки топлива Б-3:

кг/м3 – плотность топлива;

f =1,04 МДж/кг – сила топлива;

R =338 Дж/кг·К – газовая постоянная продуктов сгорания;

К – температура продуктов сгорания;

– показатель адиабаты продуктов сгорания;

м/с – единичный импульс;

К – термохимическая константа;

Закон горения топлива:

где зависимость скорости горения от давления, зависимость от скорости потока (принимается, что эрозионное горение отсутствует), зависимость горения от начальной температуры.

где – нормальная температура заряда.

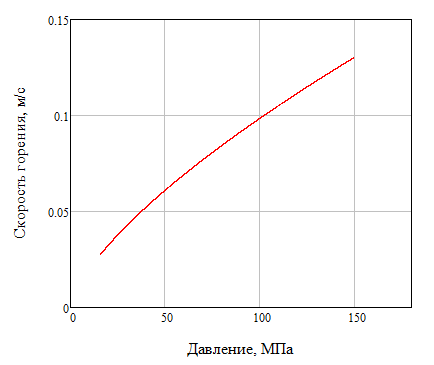


Рис. 5. Зависимость скорости горения от давления.

1. **Определение геометрических размеров сопла**

В первом приближении определяются уровни номинального и минимального давлений с помощью следствия из уравнения Бори для определения давления, как функции от начальной температуры заряда.

Из уравнений:

МПа уровень номинального давления;

МПа уровень минимального давления, по которому будет проектироваться двигатель.

Площадь критики:

Диаметр критического сечения:

Диаметр выходного сечения сопла:

Далее определяются длины дозвуковой и сверхзвуковой части сопла, а также другие геометрические параметры для первичной конструктивной прорисовки сопла:

угол наклона дозвуковой части;

угол наклона сверхзвуковой части.

Длина дозвуковой части:

гдедля прямых сопел.

Длина критики назначается от 0,002 м до . Примем м в целях экономии пространства.

Длина сверхзвуковой части:

Далее следует найти длину заряда и, исходя из этого, определить проходит по длине эта конструкция (сопло + заряд) или нет.

1. **Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла**

Газодинамические функции от безразмерной скорости потока:

Найдем значение безразмерной скорости потока в выходном сечении через формулу:

Тогда .

Скорость звука в критическом сечении:

Скорость потока в выходном сечении:

Давление потока в выходном сечении:

Температура потока в выходном сечении:

Плотность потока в выходном сечении:

1. **Проектирование заряда твердого топлива**

Для ИДК применяется вкладной многошашечный заряд ТТ всестороннего горения.

При проектировании необходимо выполнить следующие требования:

1) Коэффициент поперечного заполнения камеры .

2) Отсутствие эрозионного горения .

3) Критерий Шварца .

4) Обеспечение помещения в заданную длину при = 45 МПа (находится из разности между размещением (синяя штрихпунктирная линия) в заданный сектор и нижней границы прямоугольника в секторе).

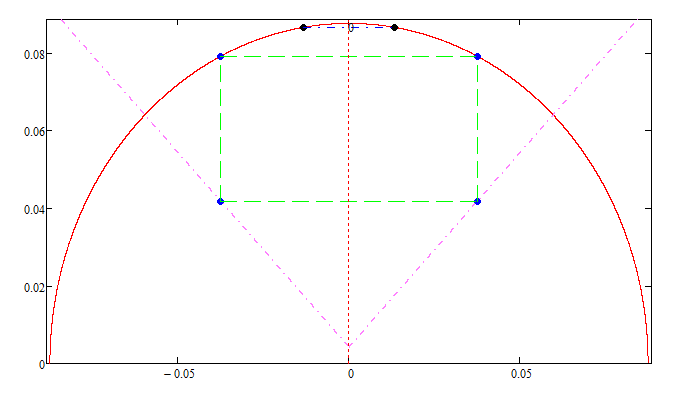
**

Рис. 6. Изображение диаметра выходного сечения сопла в секторе ИДК

Определим параметры заряжания:

расходный коэффициент:

Назначим коэффициент расхода сопла

Расход газов через сопло:

Опорный запас топлива:

Проектирование заряда ИДК ведётся для наихудшего случая – минимальной температуры окружающей среды.

Расчетная толщина горящего свода:

Потребная площадь горения:

Определение оптимального варианта заряда производится путем перебора и последующего сравнения нескольких вариантов с разным количеством шашек.

Рассматриваемые модули m: 3, 5, 7, 9, 11.

Общее количество шашек:

Назначаем зазор между стенкой и зарядом м.

Наружный диаметр заряда:

Внутренний диаметр заряда:

Длина заряда:

Параметры Победоносцева по внутреннему каналу:

Параметр Победоносцева по наружной поверхности:

Коэффициент заполнения поперечного сечения:

Критерий Шварца:

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
| n | 7 | 19 | 37 | 61 | 91 |
| , м | 0,024 | 0,014 | 0,01 | 8·10-3 | 6,55·10-3 |
| , м | 0,022 | 0,013 | 8,69·10-3 | 6,4·10-3 | 4,95·10-3 |
| , м | 0,113 | 0,071 | 0,052 | 0,042 | 0,035 |
|  | 20,26 | 22,28 | 24,18 | 26,22 | 28,5 |
|  | 58,8 | 56,17 | 56,5 | 57,46 | 58,7 |
|  | 0,098 | 0,155 | 0,211 | 0,264 | 0,314 |
|  | 0,117 | 0,125 | 0,134 | 0,143 | 0,154 |

Исходя из полученных результатов, принято решение об увеличении давления до 90 МПа, для уменьшения габаритов ИДК. Также в дальнейшем при расчетах будет учтен коэффициент тепловых потерь.

## Второе приближение

Назначим = 90 МПа.

Далее пересчитываются параметры, необходимые для прорисовки сопла:

толщина стенки ДУ:

внутренний диаметр ДУ:

Из уравнений:

МПа уровень номинального давления;

МПа уровень минимального давления.

Площадь критического сечения:

Диаметр критического сечения:

Диаметр выходного сечения сопла:

Длина ИДК составляет:

Длина дозвуковой части:

Длина сверхзвуковой части:

Пересчитаем газодинамические параметры в выходном сечении сопла:

давление потока в выходном сечении:

плотность потока в выходном сечении:

Найдем расчетную толщину горящего свода и потребную площадь горения:

На основе полученных данных строится новая таблица 2.

Таблица 2.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m | 3 | 5 | 7 | 9 | **11** |
| n | 7 | 19 | 37 | 61 | **91** |
| , м | 0,023 | 0,014 | 9,86·10-3 | 7,67·10-3 | **6,27·10-3** |
| , м | 0,02 | 0,011 | 7,26·10-3 | 5,07·10-3 | **3,67·10-3** |
| , м | 0,075 | 0,048 | 0,036 | 0,029 | **0,025** |
|  | 14,74 | 17,17 | 19,88 | 23,22 | **27,5** |
|  | 40,45 | 39,35 | 40,32 | 41,85 | **43,67** |
|  | 0,161 | 0,252 | 0,363 | 0,412 | **0,48** |
|  | 0,068 | 0,077 | 0,086 | 0,098 | **0,11** |

Выберем вариант с модулем m = 11, не смотря на небольшое несоблюдение наших ограничений по коэффициенту заполнения поперечного сечения, в дальнейшем это значение будет увеличено путем увеличения времени горения.

В камере ИДК будет располагаться форкамерный воспламенитель, минимальный диаметр которого равен 7 мм. Для этого необходимо удалить 3 ряда шашек, то есть 7 штук.

Таким образом, окончательное количество шашек:

Необходимо пересчитать длину заряда и коэффициент поперечного заполнения:

Также нам необходимо учесть коэффициент тепловых потерь при расчете площади критического сечения.

Используемые коэффициенты:

* Постоянная коэффициента теплоотдачи:
* Относительная разность температур:

Площадь торца заряда:

Объем заряда:

Объём камеры сгорания:

Свободный объем:

Площадь поверхности охлаждения:

, где

Калорийность топлива:

Коэффициент тепловых потерь:

Уточним значения:

Далее повторно проведём расчет для m=11. Получим новые значения:

1. **Определение навески воспламенителя**

Для определения навески воспламенителя для баллиститного топлива воспользуемся методикой для картузных воспламенительных устройств.

Характеристики воспламенителя:

* Теплота сгорания: ;
* Газовая постоянная: ;
* Показатель адиабаты: ;
* Плотность: ;
* Толщина горящего свода: ;
* Время воспламенения: ;
* Скорость горения: ;
* Показатель дегрессивности: .

Используемые коэффициенты:

* Постоянная коэффициента теплоотдачи:
* Относительная разность температур:
* Коэффициент теплопроводности:

Характеристики заряда:

* Показатель степени в законе горения:
* Единичная скорость горения:
* Плотность топлива:
* Показатель адиабаты:
* Температура вспышки:

Длина цилиндрической обечайки:

Температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки ТТ:

Найдем коэффициент

Время вспышки:

Давление вспышки при наихудших условиях (при -600С):

Потребная начальная площадь горения воспламенителя:

Коэффициент

Масса воспламенителя:

Давление воспламенителя:

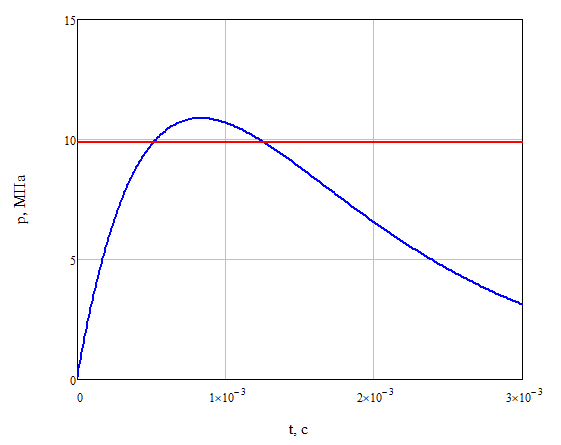


Рис. 7. График автономного горения воспламенителя

1. **Построение индикаторных кривых**

Зависимость площади горения от толщины горящего свода выглядит следующим образом:

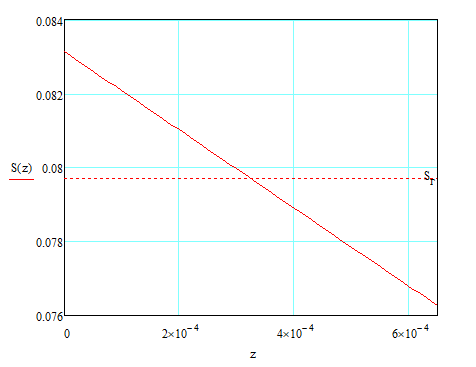
**

Рис. 8. График площади горения

Также поскольку закон скорости горения определен не до конца, поскольку имеет ограничения по давлениям (16<p<150), необходимо имеющуюся функцию экстраполировать. В MathCAD это можно сделать с помощью функции predict. Сначала благодаря этой функции определяются предсказанные точки для промежутков 0<p<16 и 150<p<240, далее на их основании аппроксимируются функции по полученным значениям. Таким образом можно будет составить полный закон горения баллиститного топлива Б-3. Ниже будут приведены предсказанные прямые и уравнения, описывающие их.

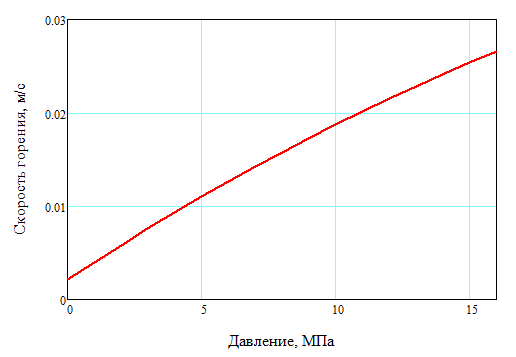


Рис. 9. Предсказанный участок в диапазоне давлений 0<p<16

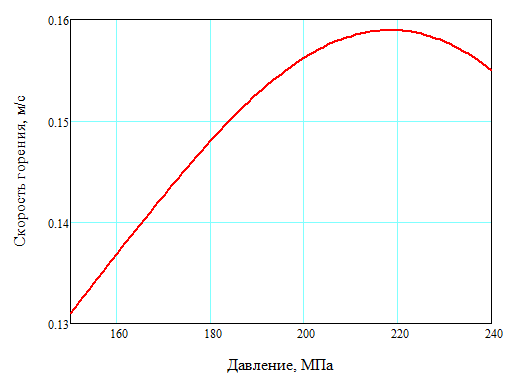


Рис. 10. Предсказанный участок в диапазоне давлений 150<p<240

Конечный закон скорости горения выглядит следующим образом:

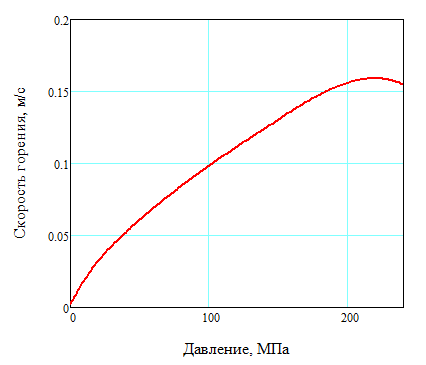
**

Рис. 11. Итоговый закон горения топлива

Индикаторная кривая строится для трёх характерных значений начальной температуры заряда (-60°С, +18°С, +60°С) на основе решения системы дифференциальных уравнений внутренней баллистики РДТТ:

где - функции-переключатели:

Начальные условия при интегрировании данной системы: , остальные параметры равны нулю. На основании решения ОЗВБ строится индикаторная кривая.

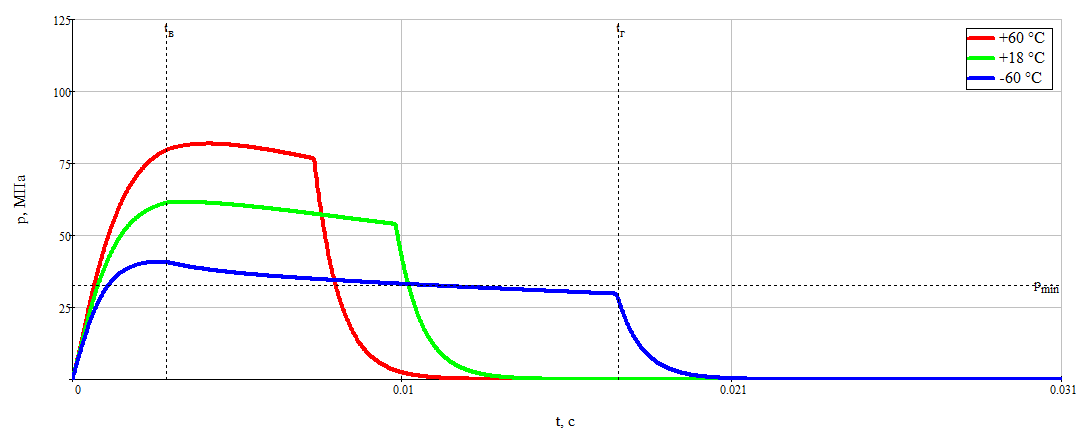


Рис. 12. Индикаторная кривая давления

Кривые тяги для трёх значений начальной температуры заряда посчитаны по формуле:

Опорное значение тяги:

Полученные графики представлены на рис. 12.

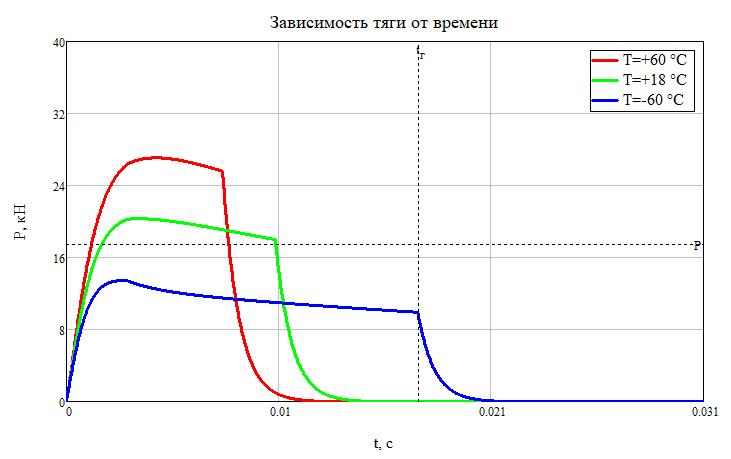


Рис. 13. Зависимость тяги от времени

Значения суммарного импульса для минимальной температуры заряда:

Определение отклонения суммарного импульса в процентах:

Заданный импульс не выполняется, в связи с этим принято решение об увеличении времени горения заряда и увеличении площади критического сечения. Для начала подберем такое время горения заряда ИДК, чтобы оно соответствовало его времени работы, тогда:

*.*

Затем подкорректируем значение площади критики так, чтобы суммарный импульс достигал своей опорной величины, тогда:

Далее идет пересчет параметров, результаты которых можно увидеть ниже:

Диаметр критического сечения:

Диаметр выходного сечения сопла:

Длина ИДК составляет:

Длина дозвуковой части:

Длина сверхзвуковой части:

В итоге нашим ограничениям наиболее удовлетворяют варианты с модулями 9 и 11, остановимся на m = 11, для сокращения длины ИДК. Результаты приведены ниже в таблице 3:

Таблица 3.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m | 3 | 5 | 7 | 9 | **11** |
| n | 7 | 19 | 37 | 61 | **91** |
| , м | 0,023 | 0,014 | 9,86·10-3 | 7,67·10-3 | **6,27·10-3** |
| , м | 0,019 | 9,8·10-3 | 5,86·10-3 | 3,67·10-3 | **2,27·10-4** |
| , м | 0,086 | 0,057 | 0,044 | 0,037 | **0,033** |
|  | 18,161 | 23,086 | 29,79 | 40,021 | **57,402** |
|  | 46,412 | 46,286 | 48,765 | 52,206 | **56,44** |
|  | 0,24 | 0,366 | 0,475 | 0,564 | **0,635** |
|  | 0,082 | 0,099 | 0,119 | 0,144 | **0,171** |

Но тогда возникает ещё одна проблема: заряд не размещается по длине. Для этого мы укорачиваем ряд шашек, находящихся возле стенки КС и удлиняем те, что в центре, ближе к переднему днищу, при этом значение площади горения должно оставаться расчетным. Выглядит это следующим образом:

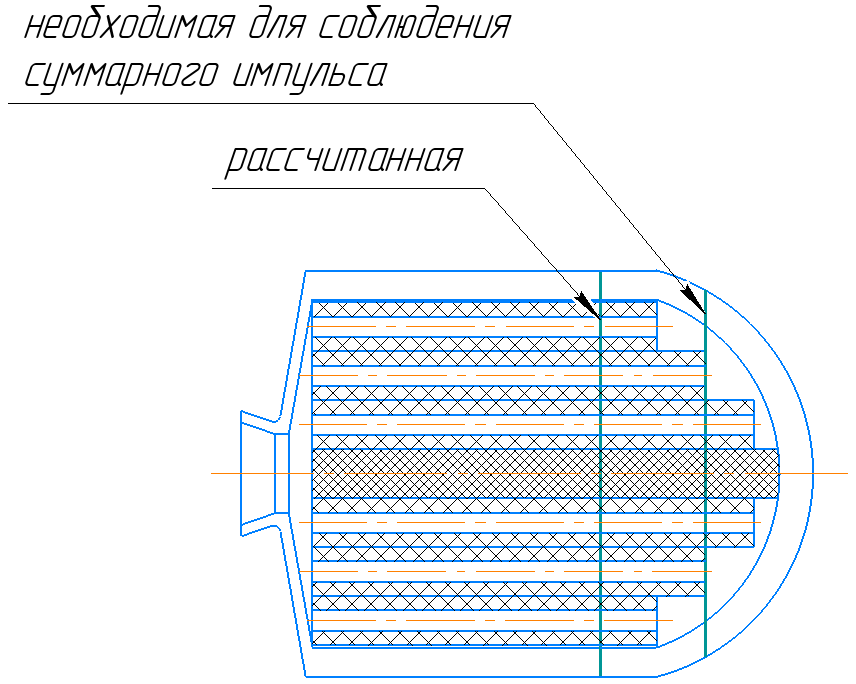


Рис. 14. Размещение шашек в заданный сектор

После удаления 7 центральных шашек (m = 3) размещается воспламенитель, и соответственно изменяются параметр длины заряда и параметры Победоносцева:

Масса воспламенителя:

Также пересчитывается система ОЗВБ и строится новый график тяги:

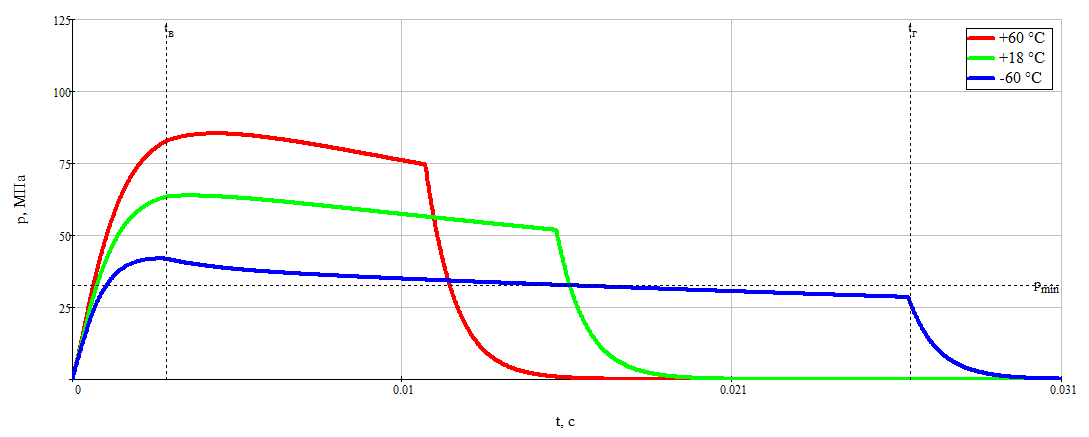


Рис. 15. Пересчет ОЗВБ

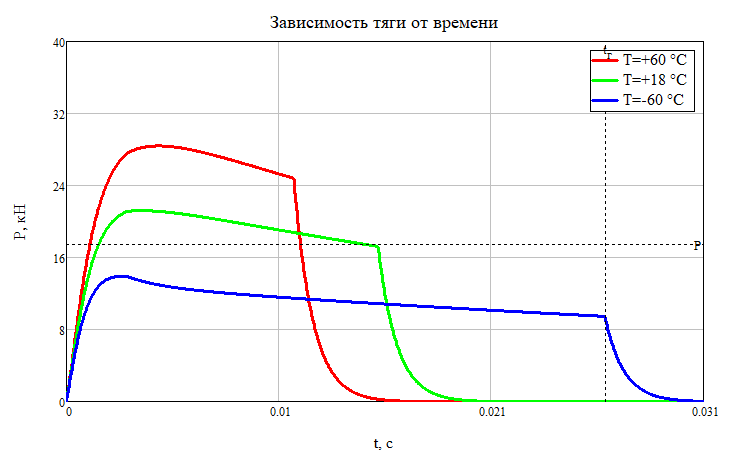


Рис. 16. Пересчет тяги

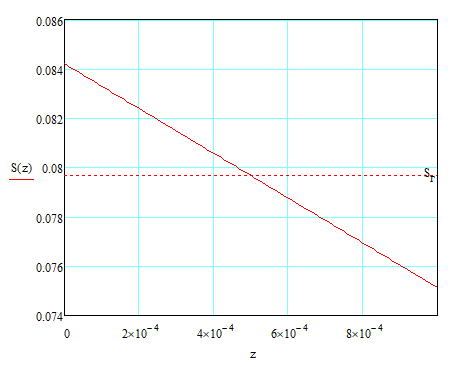


Рис. 17. Пересчет площади горения

После изменения параметров и системы ОЗВБ отклонение будет равно:

## Конструкторская проработка

В результате конструкторской проработки был сконструирован ИДК и система его крепления к корпусу.

В корпусе есть специальный отсек, стакан, куда вставляется сам ИДК и там крепится установочными винтами. Далее двигатель закрывается крышкой, в которой выполнено отверстие под сопло и крепится винтами к корпусу.

Переднее днище и обечайка являются единой деталью, где выполнено резьбовое отверстие для установки форкамерного воспламенительного устройства. Конструктивно ФВУ представляет собой трубку с отверстиями, внутри которой размещается навеска воспламенителя. Обечайка с задним днищем крепится при помощи резьбового соединения, в каждой детали предусмотрены канавки, куда вставляются резиновые уплотнители для избежания разгерметизации в КС. Внутри камеры сгорания находится многошашечный заряд, который крепится к переднему днищу при помощи полимерного вкладыша.

С помощью моделей всех деталей в CAD-пакете найдем массу всей конструкции. Задав плотность всех необходимых материалов, получим:

* масса обечайки и переднего днища: 165,664 г;
* масса заднего днища и сопла: 62,945 г;
* масса крышки: 88 г;
* масса трубки ФВУ и её крышки: 30,1 г;
* масса полимерного вкладыша: 3 г;
* масса топливного заряда: 112 г;
* масса воспламенителя: 4,7 г;
* масса 6 установочных винтов ISO 4766 - М4 x 6: 0,42 г;
* масса 8 винтов В.М2-6gx11 ГОСТ 17475-80: 0,00188 г;
* масса крепежных изделий и уплотнений: 3 г;
* масса заглушки: 3 г;
* масса крепежных изделий и уплотнений: 2 г;
* масса пиропатрона: 35,1 г.

Сложив полученные значения, мы получим 0,50993 кг. Таким образом можно сделать вывод, что полученная конструкция укладывается в ограничение по массе в 0,51 кг.

## Заключение

В данном домашнем задании был спроектирован радиально расположенный ИДК, удовлетворяющий требованиям технического задания: обеспечивается создание суммарного импульса , время выхода двигателя на режим не превышает , двигатель функционирует в диапазоне температур .

Был рассчитан топливный заряд (количество и параметры шашек), найдена масса навески воспламенителя = 4,76 г, а также построены индикаторные кривые давления, кривые тяги для трех разных температур.

Были проведены конструкторская проработка ИДК и массовый анализ, который показал, что масса конструкции не превышает заданное максимальное значение ДУ = 0,51 кг.

**Список использованной литературы**

1. Курс лекций А. А. Фёдорова по курсу «Проектирование энергетических установок ракетного оружия» за 2021-2022 год.