|  |  |
| --- | --- |
| 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 РО» |
|  |

НА ТЕМУ:

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

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил: студент группы | СМ6-92 |  |  |  | Михайлов Д.С. |
|  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Преподаватель |  |  |  |  | Федоров. А.А |
|  |  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

Москва, 2022 г.

Оглавление

[Техническое задание 3](#_Toc117383271)

[1. Формирование недостающих исходных данных 3](#_Toc117383272)

[1.1. Конструктивное решение 3](#_Toc117383273)

[1.2. Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса ИДК 3](#_Toc117383274)

[1.3. Определение времени работы ИДК 6](#_Toc117383275)

[1.4. Действительное значение коэффициента тяги 7](#_Toc117383276)

[1.5. Величина тяги на квазистационарном участке 8](#_Toc117383277)

[1.6. Выбор марки топлива 9](#_Toc117383278)

[2. Проектирование сопла и расчет газодинамических параметров сопла на выходе 10](#_Toc117383279)

[2.1. Определение геометрических размеров сопла 10](#_Toc117383280)

[2.1. Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла 16](#_Toc117383281)

[3. Проектирование заряда 17](#_Toc117383282)

[4. Проверочный расчет - решение ОЗВБ 22](#_Toc117383283)

[4.1. Определение зависимости площади горения заряда от толщины горящего свода 22](#_Toc117383284)

[4.2. Расчет массы навески воспламенителя 23](#_Toc117383285)

[4.3. Решение ОЗВБ 26](#_Toc117383286)

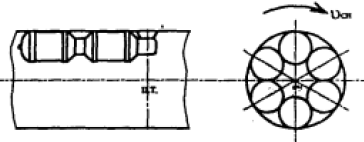
[5. Разработка конструкции спроектированного двигателя 29](#_Toc117383287)

[Список использованной литературы 30](#_Toc117383288)

# Техническое задание

Спроектировать блок из ИДК для поперечной коррекции вращающегося летательного аппарата (далее - ЛА) калибром . Количество импульсов коррекции . Суммарный импульс коррекции не менее при телесном угле коррекции Частота вращения ЛА скорость полета в момент коррекции - Время выхода двигателя на режим не более Максимальная масса одного двигателя не более Температурный диапазон эксплуатации

Принципиальная конструктивная схема представлена на рис. 1.

**

**Рис. 1.** Принципиальная конструктивная схема [1]

# 1. Формирование недостающих исходных данных

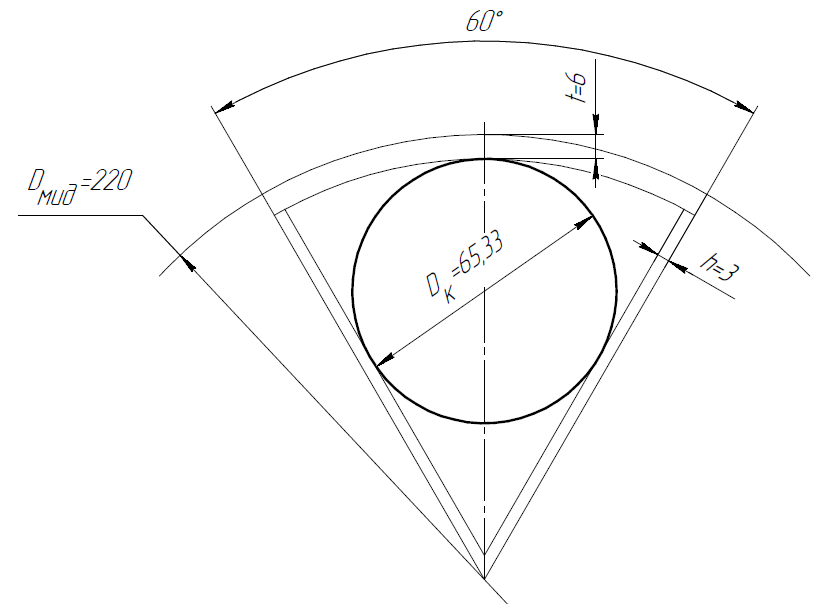
## 1.1. Конструктивное решение

Принципиальная конструктивная схема ИДК задана по условию домашнего задания (рис. 1). Имеем симметричное продольное размещение по периферии корпуса ЛА 12-х идентичных двигателей коррекции с воспламенительным устройством и односопловыми блоками для двух совмещенных двигателей, установленных под углом относительно продольной оси ЛА.

## 1.2. Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса ИДК

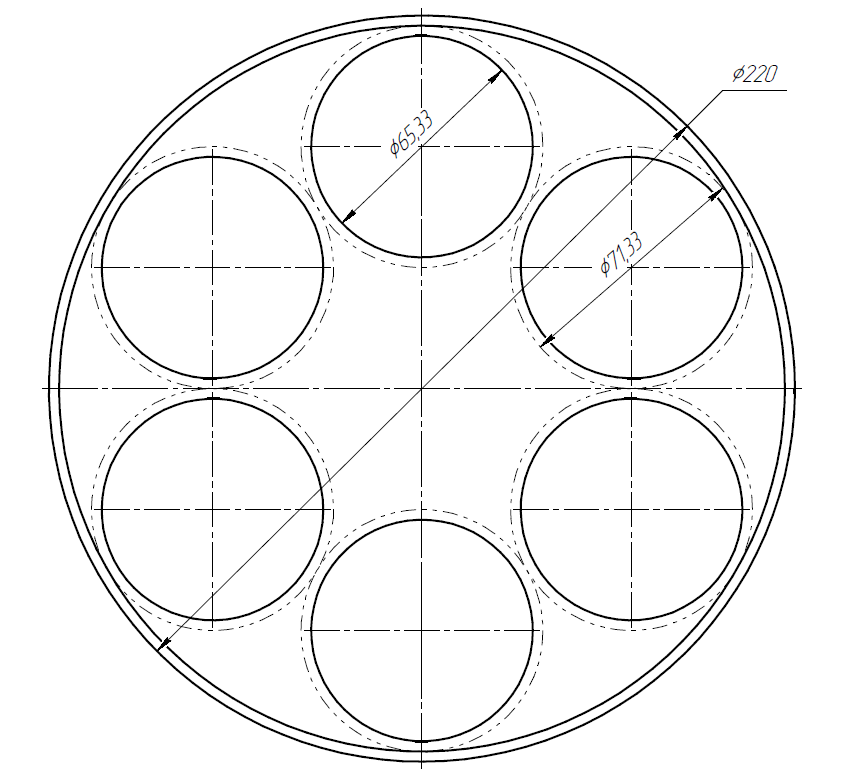
После выбора конструктивной схемы двигателя выполняется предварительная прорисовка компоновочной схемы. По известному значению диаметра миделя и количеству ИДК ( в поперечном сечении корпуса ЛА (рис. 1)) строится сектор с углом раствора, равным отношению к количеству ИДК в поперечном сечении ЛА

От границ сектора отступается зазор , значение которого принимается равным на сторону. Получаем новый сектор (геометрическое место существования объекта), в котором размещается ИДК (рис. 2). При данном расположении двигателей необходимо учесть толщину стенки корпуса ЛА и зазор между стенкой и ИДК, в данном случае, сумма этих размеров составляет



**Рис. 2.** Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса ИДК в первом приближении

Предварительная прорисовка заполнения поперечного сечения корпуса ЛА представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Предварительная прорисовка заполнения поперечного сечения корпуса ЛА

В первом приближении после предварительной прорисовки заполнения поперечного сечения корпуса ЛА, получаем значение внутреннего диаметра корпуса ИДК

В первом приближении назначается максимальное давление в камере двигателя Тогда толщина стенки и соответственно внутренний диаметр камеры сгорания (далее - КС) могут быть найдены по следующим формулам:

где - коэффициент безопасности, - предел прочности материала стенки (выбран материал 30ХГСА).

Внутренний диаметр камеры сгорания

После подстановки числовых значений, получаем:

Значение округлено в большую сторону для гарантированного выполнения коэффициента безопасности.

## 1.3. Определение времени работы ИДК

Время работы ИДК (время коррекции) является одним из самых ключевых параметров при проектировании ИДК и определяется на основе решения задачи внешней баллистики на участке коррекции. Поскольку по условию задан вращающийся летательный аппарат, время коррекции может быть рассчитано по формуле:

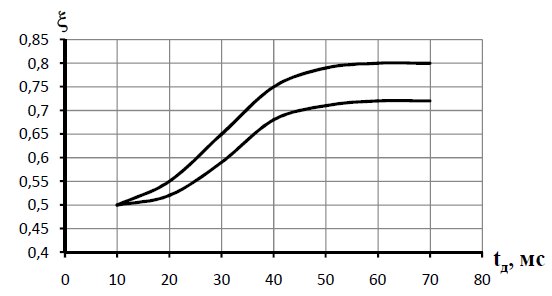
где - телесный угол коррекции, - максимальная скорость вращения летательного аппарата.

Время коррекции

По вычисленному времени коррекции может быть приближенно рассчитаны характерные времена горения и последействия, используя коэффициент заполнения индикаторной кривой давления Для определения воспользуемся графиком, представленным на рис. 4. Этот график показывает возможный диапазон значений коэффициента в зависимости от времени коррекции

По графику на рис. 4 имеем

Время горения заряда топлива (первое приближение)



**Рис. 4.** График зависимости [2]

Время последействия тяги:

## 1.4. Действительное значение коэффициента тяги

В первом приближении коэффициент расширения сопла назначается равным

Теоретический коэффициент тяги может быть найден аппроксимацией таблицы 1.

Таблица 1. Зависимость

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

По таблице 1 находим теоретический коэффициент тяги

Введем дополнительные потери на тепло и скорость. Коэффициент потерь на тепло (для развернутого сопла)

Коэффициент потерь на скорости

Действительный коэффициент тяги определяется по формуле с учетом потерь

## 1.5. Величина тяги на квазистационарном участке

Коэффициент, учитывающий снижение эффективности действия тяги для вращающихся ЛА

Поправка на усиление реакции выдуваемого потока на поверхность ЛА

Принимаем, что коррекция происходит при (), найдем число Маха:

Имеет место сверхзвуковая скорость полета летательного аппарата.

Необходимая тяга на квазистационарном участке равна:

## 1.6. Выбор марки топлива

Для ИДК отдается предпочтение пироксилиновым и баллиститным порохам. Предварительно выбирается марка топлива П-1. Характеристики топлива представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики топлива П-1

|  |  |
| --- | --- |
| Сила топлива |  |
| Показатель адиабаты |  |
| Газовая постоянная продуктов сгорания |  |
| Температура продуктов сгорания |  |
| Плотность топлива |  |
| Термохимическая константа |  |

Закон горения топлива задается в виде:

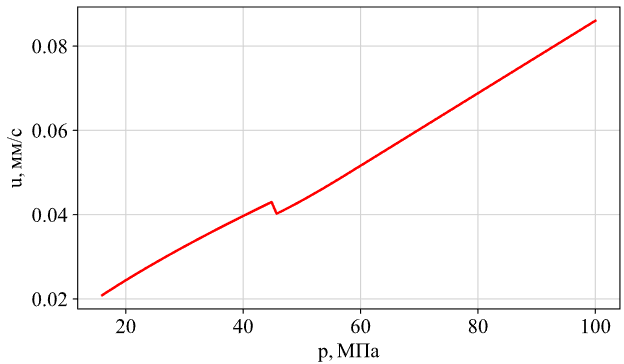
где - зависимость от давления, - поправка на возникновение эррозионного горения, - поправка на начальную температуру заряда.

При проектировании ИДК, как правило, не допускается эррозионное горение. Принимается Зависимость скорости горения от температуры записывается через термохимическую константу:

где - нормальная температура заряда.

Закон горения для топлива имеет вид:

Графическая интерпретация закона представлена на рис. 5.



**Рис. 5.** Графическая интерпретация закона горения топлива П-1

Из уравнения Бори выводится система уравнений, позволяющая найти максимальное, минимальное и номинальное давление по одному заданному. По значению максимального давления можно определить минимальное и номинальное давление в камере. Выведенная система уравнений имеет вид

В результате решения системы уравнений, предварительно приняв в начальном приближении , получаем:

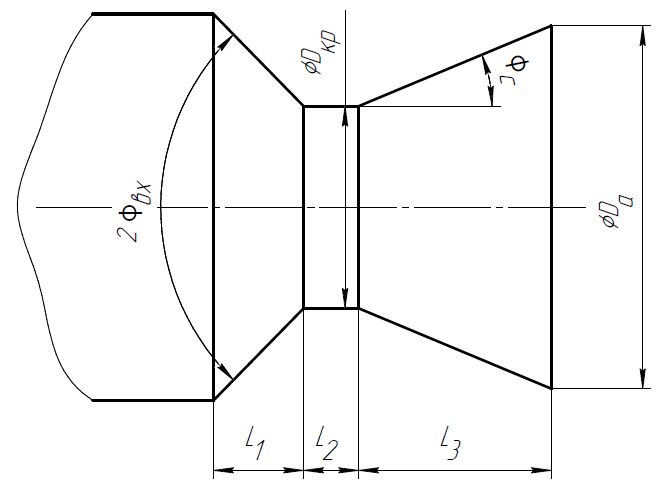
# 2. Проектирование сопла и расчет газодинамических параметров сопла на выходе

## 2.1. Определение геометрических размеров сопла

Площадь критического сечения сопла:

Диаметр критического сечения:

Для ИДК в большинстве случаев сопло коническое с прямолинейными образующими (рис. 6). Общие рекомендации по выбору углов наклона образующих такие же, как и для классических РДТТ. Назначим углы наклона входной (дозвуковой) и выходной частей сопла:

**

**Рис. 6.** Эскиз сопла

Длины участков сопла рассчитываются по формулам:

где - величина, учитывающая наличие дополнительного объема с сечением на больше критического сечения для развернутых на сопел.

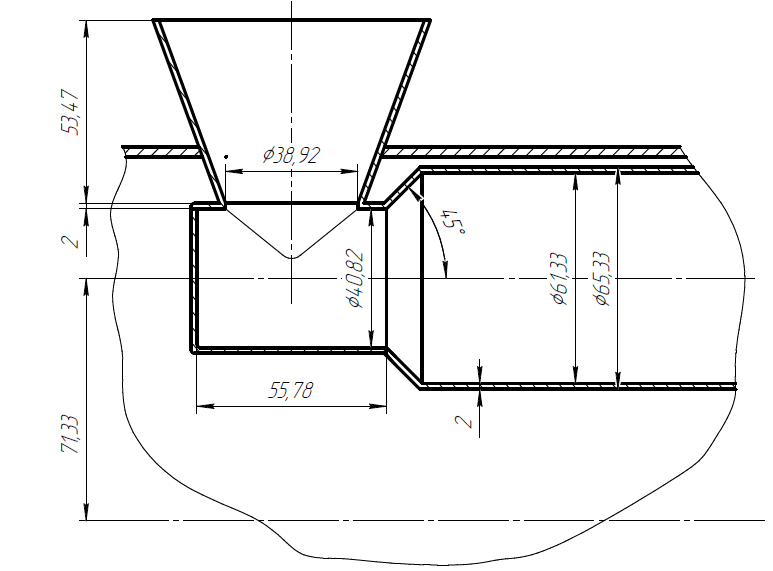
После подстановки числовых данных, получаем:

Диаметр форкамеры предсоплового объема должен быть на больше по площади критического сечения. Тогда диаметр форкамеры определяется по формуле:

Объем камеры должен быть не менее объема полусферы с диаметром камеры сгорания. Тогда длина форкамеры определяется по формуле.

После подстановки числовых значений

Применительно к заданной компоновке сопла по полученным размерам выполняется прорисовка внутренних обводов сопла (рис. 7).



**Рис. 7.** Предварительная прорисовка сопла

Сопло выступает за габариты корпуса летательного аппарата. Для уменьшения габаритов сопла необходимо уменьшить площадь критического сечения, а, следовательно, увеличить давление в камере. Необходимый диаметр критического сечения находится из геометрических соображений по рис. 7.

Из геометрических соображений определяется диаметр критического сечения, обеспечивающий возможность размещения сопла:

где по рис. 7.

В результате решения приведенного уравнения, получаем диаметр критического сечения

Тогда во втором приближении давление в камере равно:

Полученное значение выходит за границы устойчивой работы выбранного топлива П-1.

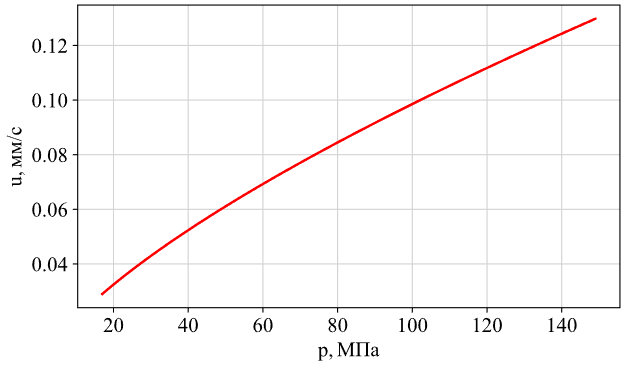
Изменим марку топлива. Выберем марку Б-3. Характеристики топлива представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики топлива Б-3

|  |  |
| --- | --- |
| Сила топлива |  |
| Показатель адиабаты |  |
| Газовая постоянная продуктов сгорания |  |
| Температура продуктов сгорания |  |
| Плотность топлива |  |
| Термохимическая константа |  |

Закон горения топлива имеет вид

Графическая интерпретация закона горения топлива Б-3 представлена на рис. 8.



**Рис. 8.** Закон горения топлива Б-3

Воспользуемся формулой Бори. В данном случае, по значению номинального давления можно определить минимальное и максимальное давления в камере из решения системы:

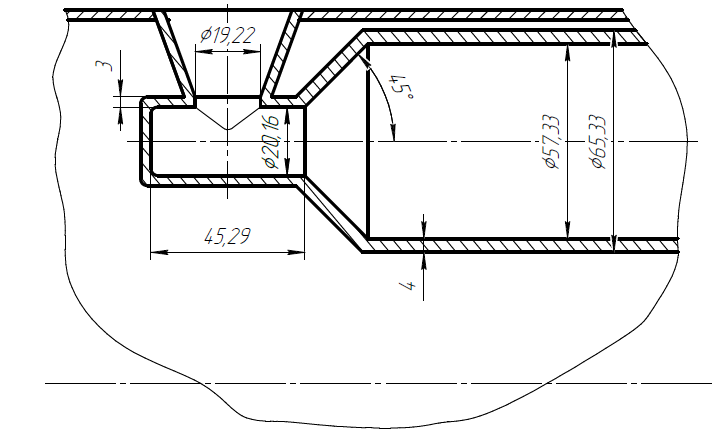
Задавшись начальным приближением и , получим

Пересчитаем зависящие от давления параметры:

Толщина стенки значительна, поэтому принято решение перейти на сталь ЭП 679-ВД с

Толщина стенки для нового материала

Пересчитываем параметры, рассчитанные ранее

  
**Рис. 9.** Прорисовка сопла

## 2.1. Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла

Безразмерная скорость потока определяется из газодинамической функции при заданном коэффициенте расширения сопла.

Безразмерная скорость сопла в выходном сечении потока определяется из решения уравнения

Безразмерная скорость

Критическая скорость звука:

Скорость в выходном сечении сопла:

Давление в выходном сечении сопла:

Температура в выходном сечении сопла:

Плотность потока в выходном сечении сопла:

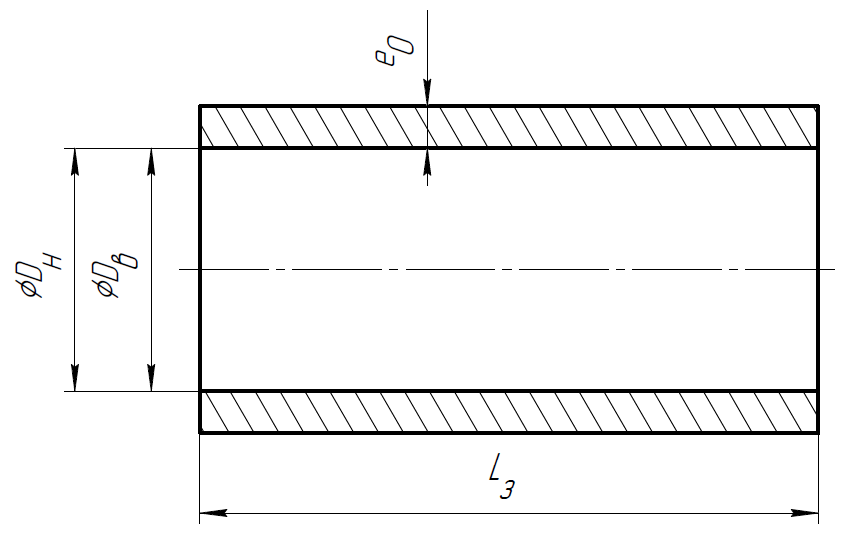
# 3. Проектирование заряда

Проектирование заряда сводится к выбору топлива и формы заряда, определению параметров заряжания двигателя, а также расчету всех его геометрических размеров, параметров и характеристик.

Форма заряда должна обеспечивать максимальное заполнение корпуса двигателя при условии допустимых скоростей газового потока, омывающего заряд (не допуск эрозионного горения).

Коэффициент поперечного заполнения сечения двигательной установки (далее - ДУ)

Для импульсных двигателей используют только вкладные заряды, изготавливаемые чаще всего из пироксилинового или баллиститного твердого топлива. Чаще всего применяются трубчатые заряды (рис. 10).



**Рис. 10.** Геометрические параметры заряда

Наибольшая плотность укладки шашек многошашечного заряда определяется формулой:

где - модуль, целое число шашек, укладывающееся по диаметру камеры.

Зависимость числа шашек от модуля представлена в таблице 4.

Таблица 4. Зависимости числа шашек от модуля

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

После выбора марки пороха и формы определяются параметры заряжания.

Расходный комплекс:

Назначается коэффициент расхода сопла

Расход газов через сопло определяется по формуле:

Опорный запас топлива:

Проектирование заряда ИДК ведется для наихудшего случая - минимальной температуры окружающей среды. Расчетная толщина горящего свода при этом определяется по формуле

Потребная площадь горения:

Поскольку не существует аналитического решения по определению значений параметров , то будем последовательно задавать количество пороховых элементов и рассчитывать необходимые геометрические размеры. Критерием оценки каждого из вариантов будет *максимальное значение коэффициента поперечного заполнения КС* при *непревышении параметром Победоносцева* *критического значения* И выполнение технологических ограничений.

Задаемся значением критического числа параметра Победоносцева

Задаемся значениями модуля

Наружный диаметр заряда определяется по формуле:

где - зазор между зарядом и стенкой.

Внутренний диаметр заряда определяется по формуле

Общее число шашек равно

Длина заряда

Параметр Победоносцева по внутреннему каналу

Параметр Победоносцева по наружной поверхности

Коэффициент заполнения поперечного сечения

Критерий Шварца

Вычисления, проделанные по приведенным выше формулам, сводятся в таблицу 5.

Таблица 5. Результаты вычислений

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

Примем вариант с как наиболее рациональный.

В импульсных РДТТ для уменьшения времени выхода на режим применяются форкамерные воспламенительные устройства. Такой воспламенитель представляет из себя перфорированную трубку с воспламенительным составом, размещенную в центре КС. Минимальный диаметр такого устройства составляет мм. Следовательно, для размещения воспламенителя необходимо изъять центральный пороховой элементы (-ы). В варианте с модулем 7 можно убрать 4 элемента, а в варианте с модулем - элемент. Рассмотрим оба варианта.

Округлим геометрические параметры. В скобках представлены значения для :

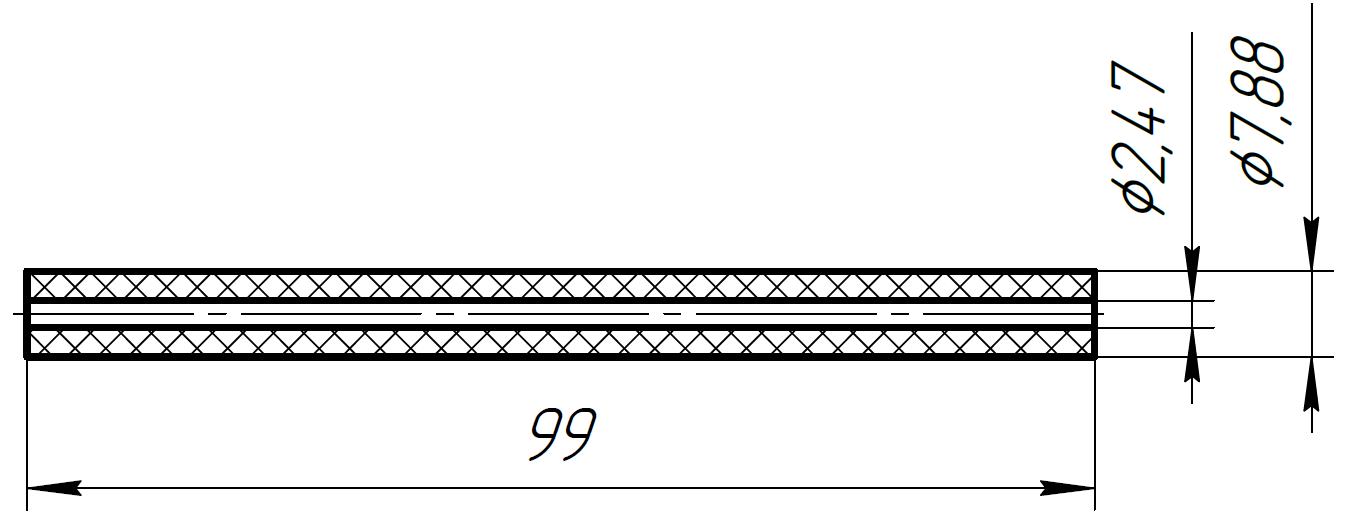
Количество шашек, обеспечивающих заданную площадь горения с убранными шашками:

Длина заряда:

Коэффициент заполнения поперечного сечения:

Выбираем заряд с модулем , поскольку он является наиболее рациональным из представленной совокупности: удовлетворяет требованиям технологичности [4] (внутренний диаметр , толщина горящего свода ), параметр Победоносцева как по внутреннему каналу, так и по наружной поверхности не превышает коэффициент заполнения поперечного сечения .

Выбранный заряд представлен на рис. 11.

****

**Рис. 11.** Заряд твердого топлива

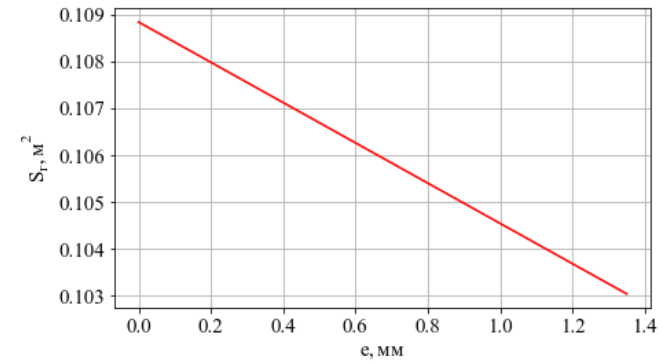
# 4. Проверочный расчет - решение ОЗВБ

## 4.1. Определение зависимости площади горения заряда от толщины горящего свода

Поскольку канальная шашка является зарядом всестороннего горения, зависимость площади горения одного такого заряда от толщины горящего свода будет иметь вид

Так как применяется несколько канальных шашек, зависимость площади горения от для всей совокупности зарядов, размещаемых в КС, рассчитывается согласно зависимости

Графическая интерпретация закона горения представлена на рис. 12.



**Рис. 12.** График зависимости

## 4.2. Расчет массы навески воспламенителя

Определение массы навески воспламенителя осуществляется согласно методике, реализуемой в лабораторной работе 2 [3].

Исходные данные для определения массы навески воспламенителя представлены в таблице 6.

Таблица 6. Исходные данные

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики ДУ | |
| Диаметр камеры м |  |
| Диаметр критического сечения сопла м |  |
| Постоянная коэффициента теплоотдачи |  |
| Безразмерная температура стенки |  |
| Характеристики заряда твердого топлива | |
| Показатель степени закона горения |  |
| Единичная скорость горения |  |
| Плотность |  |
| Газовая постоянная |  |
| Показатель адиабаты |  |
| Температура горения топлива |  |
| Характеристики воспламенителя (ДРП) | |
| Газовая постоянная |  |
| Теплота сгорания |  |
| Скорость горения |  |
| Показатель адиабаты |  |
| Плотность |  |
| Показатель дегрессивности |  |
| Толщина горящего свода зерна воспламенителя |  |

Площадь поверхности охлаждения

Свободный объем камеры вычисляется как разность объема камеры сгорания, объема форкамеры () и объема, занимаемого зарядом твердого топлива:

Расходный комплекс:

Время горения воспламенителя:

Температура рассчитывается согласно зависимости:

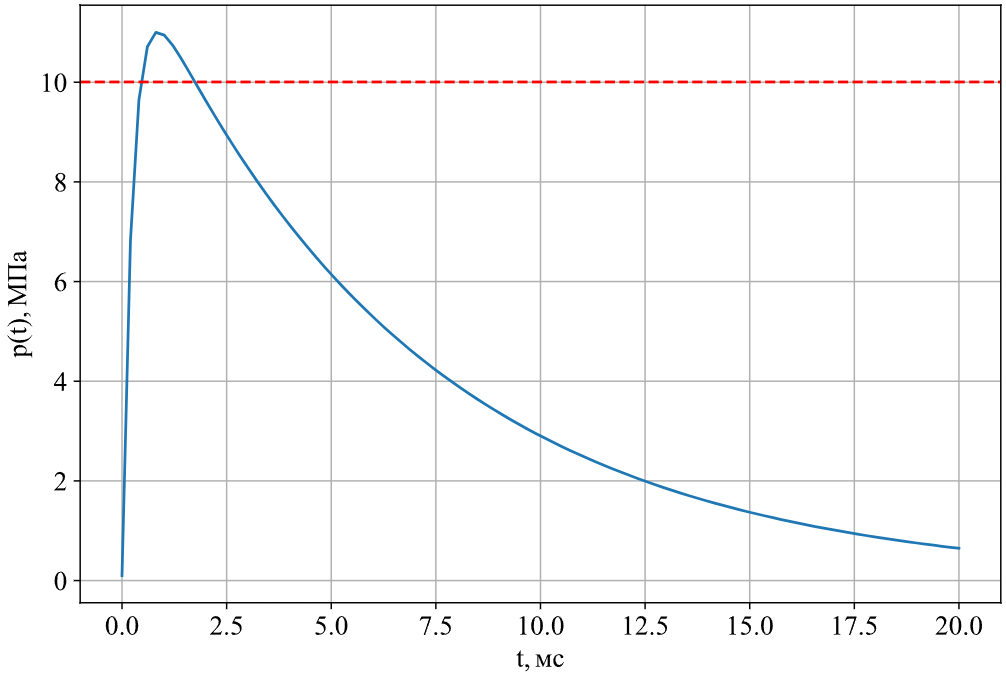
Определим приближенное значение давления вспышки топлива по формуле

Выполним подстановку в приведенную формулу числовых значений соответствующих величин:

Тогда

Давление вспышки для тогда

Кривая автономного горения воспламенителя представлена на рис. 13.



**Рис. 13.** Кривая автономного горения воспламенителя

Параметры воспламенителя представлены в таблице 7.

Таблица 7. Параметры воспламенителя

|  |  |
| --- | --- |
| Масса навески воспламенителя |  |
| Показатель дегрессивности |  |
| Толщина горящего свода воспламенителя |  |

## 4.3. Решение ОЗВБ

Для решения ОЗВБ необходимо решить систему дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения изменения давления в камере сгорания, уравнения изменения объема , уравнение изменения массы навески воспламенителя, массы топлива, а также уравнения изменения толщины горящего свода.

Система ДУ имеет следующий вид:

где – закон горения, – функции Хевисайда.

Функции Хевисайда:

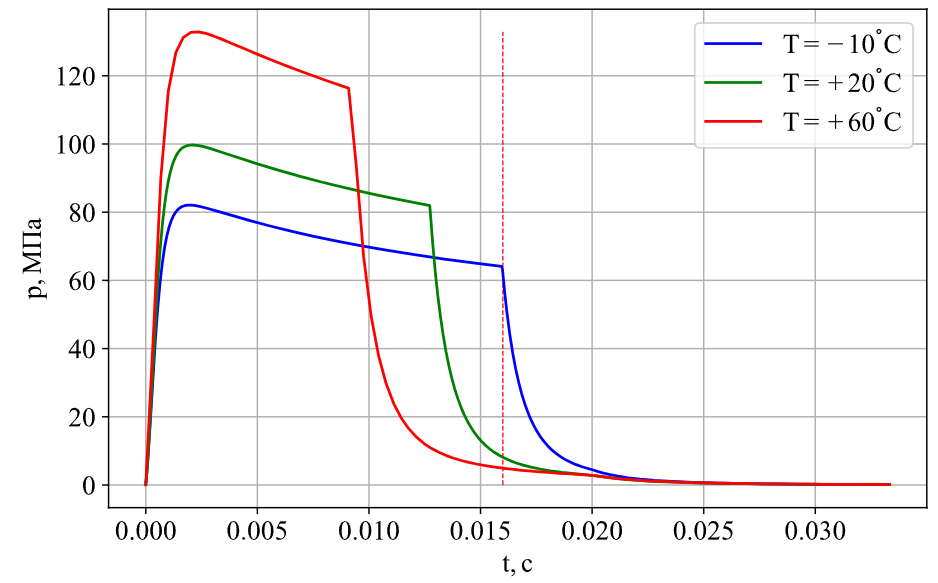
Для решения системы уравнений ОЗВБ задаются начальными условиями:

Система интегрируется в среде языка программирования Python с помощью библиотеки SciPy, функцией Odeint.

Интегрирование проводится для трех характерных участков работы двигательной установки с различным шагом интегрирования. Так, для участка заброса давления (область кривой где изменение параметров происходит наиболее интенсивно) интегрирование ведется с шагом , для участка, который начинается после заброса давления и продолжается до падения давления в КС, интегрирование ведется с шагом , для участка, на котором происходит падение давления в КС в качестве шага интегрирования выбран шаг .

Система решается для 3-х начальных температур: .

В результате интегрирования системы уравнений, получаем индикаторные кривые (рис. 14).

**

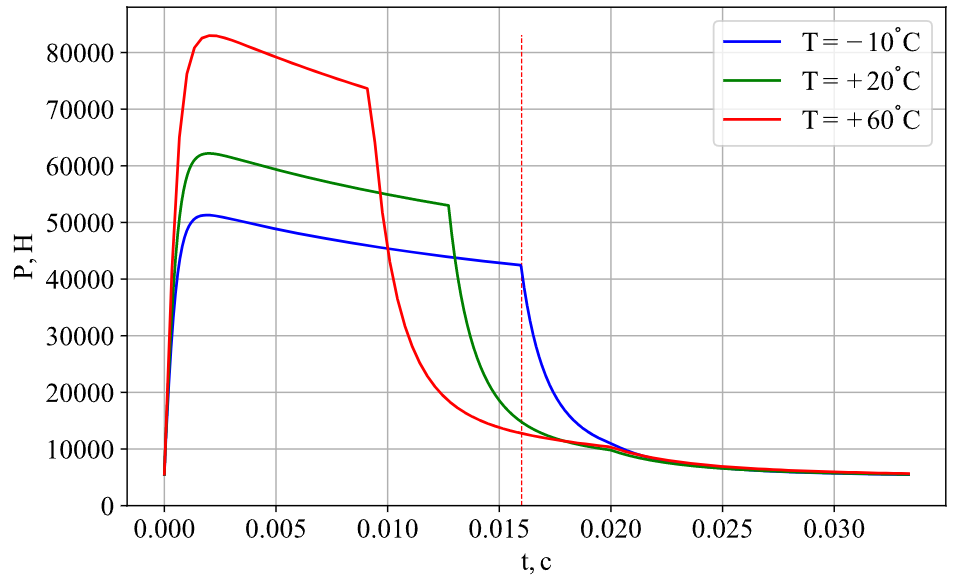
**Рис. 14.** Индикаторные кривые

Определим тягу и суммарный для проверки выполняемости требований технического задания.

Тяга определяется по формуле:

где .

График зависимости представлен на рис. 15.



**Рис. 15.** График зависимости

Полный импульс рассчитывается по формуле:

Интегрирование проводится с помощью библиотеки SciPy языка программирования Python.

Значения суммарного импульса для 3-х температур:

В результате выполнения проверочного расчета - решении задачи ОЗВБ можно сделать вывод, что требования технического задания выполняются: во всех трёх случаях значение суммарного импульса не менее заданного .

# 5. Разработка конструкции спроектированного двигателя

# Список использованной литературы

1. Варианты исходных данных для выполнения домашнего задания.

2. Лекция 14, Алгоритм проектирования ИДК.

3. Исследование и расчет РДТТ: учеб. пособие по курсу «Проектирование энергетических установок ракетного оружия». «Специальные двигатели ракетного оружия». – Ч. 1: Исследование и расчет автономного горения воспламенителя / И.О. Толкачева, М.А. Максимова, И.Е. Никитина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 – 40 с.: ил.

4. Лекция 13. Основные характеристики ИДК.