|  |  |
| --- | --- |
| 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 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_СМ1\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ***

***НА ТЕМУ:***

***Проектирование УБР на твердом топливе***

***Вариант 13***

Студент: Попов Е.В. группа СМ1-81

Руководитель курсового проекта: Навагин К.В., к.т.н.

Консультант: Навагин К.В., к.т.н.

*2022 г.*

**Содержание**

[Техническое задание 3](#_Toc105947669)

[Выбор числа ступеней 4](#_Toc105947670)

[Расчет массы полезной нагрузки 4](#_Toc105947671)

[Предварительное определение параметров УБР 7](#_Toc105947672)

[Расчетная оценка массово-геометрических характеристик конструкции ступеней 12](#_Toc105947673)

[Уточнение относительных характеристик 18](#_Toc105947674)

[Расчет параметров траектории 19](#_Toc105947675)

[Перерасчет параметров 22](#_Toc105947676)

[Окончательный выбор параметров УБР 22](#_Toc105947677)

[Литература 26](#_Toc105947678)

# **Техническое задание**

Определить основные массово-геометрические и тяговые характеристики УБР и сформировать её конструктивную схему, обеспечивающую выполнение заданных требований.

Максимальная дальность , тип – ПГРК

Число боевых блоков

Параметры поражаемых целей

*Для точечных целей*

Давление во фронте ударной волны, требуемое для поражения точечной цели

Требуемая вероятность поражения точечной цели

Среднеквадратичное отклонение точки падения ББ от точки прицеливания

*Для площадных целей*

Давление во фронте ударной волны, требуемое для поражения площадной цели

Требуемое математическое ожидание поражения части площадной цели

Требуемый радиус поражения площадной цели

Параметры разведения боевых блоков км км

*Требования к УБР*

Максимальное суммарное время работы ДУ маршевых ступеней

Минимальная высота окончания АУТ

Максимальная осевая перегрузка

Диапазон температур эксплуатации

*Характеристики топлива*

Удельный импульс при стандартных условиях

Плотность топлива

Диапазон скоростей горения при стандартных условиях

Показатель степени в законе горения

Коэффициент теплопроводности топлива

Разброс скоростей горения

Случайное отклонение давления от номинального значения

Показатель адиабаты продуктов сгорания

Массовая доля конденсированной фазы в продуктах сгорания

# **Выбор числа ступеней**

Максимальная дальность 9000 км, поэтому выбираем трехступенчатую ракету.

# **Расчет массы полезной нагрузки**

Для точечных целей:

Коэффициент защищенности цели

Мощность ББ

Для площадных целей:

Коэффициент защищенности цели

Мощность ББ

Выбираем наибольшую мощность

Выбор массы ББ

Полученная мощность составляет 0.091 Мт, следовательно назначаем мощность боевого блока равной и соответствующую данной мощности массу .

Расчет габаритов ББ

Диаметр основания

Длина боевого блока

Радиус носка ББ

Масса боевой комплектности

Масса платформы разведения

Масса системы управления

Масса конструкции боевой ступени

Масса топлива доводочного двигателя назначается с учетом того его остатки в результате разведения ББ составили не более 1 кг

Выбираем

Масса доводочного двигателя

Масса полезной нагрузки

где – коэффициент защищенности для мобильной базы

Двигательная установка боевой ступени двухрежимная. Тяга доводочного двигателя

– тяга при пониженном режиме

*–* тяга при повышенном режиме

Расход топлива доводочного двигателя:

– секундный массовый расход при пониженном режиме

– секундный массовый расход при повышенном режиме

Максимальный недолет на АУТ

Потребная величина приращения скорости для компенсации недолета на АУТ:

Производная определяется из Таблицы 1 Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1000 | 2500 | 4500 | 6000 | 8000 | 10000 | 12000 |
|  | 0,66 | 1,23 | 2,05 | 2,78 | 4,04 | 5,69 | 8 |

Угол наклона осей толкающих сопел к оси БС

Приращение скорости по

Изменение массы топлива на участках «движения БС»

Приращение времени на участках «движения» БС

На участках разворота, стабилизации:

На участках отделения БО:

Баллистическая сводка БС по этапам работы приведена в Таблице 2 Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| Перед началом работы | 722,552 | - | 86,9 | - | 0 | - |
| Отработка промаха | - | 0 | - | 21,125 | - | 30,056 |
| После окончания отработки промаха | 701,426 | - | 65,775 | - | 30.056 | - |
| Разворот, стабилизация | - | 0 | - | 1,406 | - | 10 |
| Отделение  первого ББ | - | 100 | - | 0 | - | 0 |
| После отделения первого ББ | 600,21 | - | 64,396 | - | 40,056 | - |
| Разворот стабилизация по направлению | - | - | - | 1,406 | - | 10 |
| После разворота и стабилизации | 598,615 | - | 62,963 | - | 50,056 | - |
| Разгон по направлению | - | - | - | 19,446 | - | 27,667 |
| После разгона по направлению | 579,169 | - | 43,517 | - | 77,723 | - |
| Разворот стабилизация | - | 0 | - | 1,406 | - | 10 |
| Отделение  второго ББ | - | 100 | - | 0 | - | 0 |
| После отделения второго ББ | 477,763 | - | 42,111 | - | 87,723 | - |
| Разворот стабилизация по направлению | - | - | - | 1,406 | - | 10 |
| После разворота и стабилизации | 476,357 | - | 40,705 | - | 97,723 | - |
| Разгон по направлению | - | - | - | 37,832 | - | 53,824 |
| После разгона по направлению | 438,525 | - | 2,874 | - | 151,547 | - |
| Разворот стабилизация | - | 0 | - | 1,406 | - | 10 |
| Отделение третьего ББ | - | 100 | - | 0 | - | 0 |
| После отделения третьего ББ | 337,12 | - | 1,468 | - | 161,547 | - |
| Отход ББ | - | - | - | 1,406 | - | 10 |
| После отхода | 335,714 | - | 0,062 | - | 171,547 | - |

Остаток топлива не превышает 1 кг, поэтому расчет массы топлива ББ успешен.

# **Предварительное определение параметров УБР**

Дальность меньше 5500 км, поэтому скорость Циолковского

Удельный пустотный импульс для первой ступени

Удельный пустотный импульс для второй ступени

Удельный пустотный импульс для третьей ступени

Среднее значение удельного пустотного импульса

Стартовая масса , где для трехступенчатых ракет, .

Распределение масс топлив по ступеням

Средняя относительная масса топлива , где число ступеней

Для трехступенчатой ракеты относительные массы топлива равны

* для первой ступени ;
* для второй ступени
* для третьей ступени ;

Время работы 1 ступени назначаем из диапазона 50...55 с

Время работы 2 ступени назначаем из диапазона 35...40 с

Время работы 3 ступени назначаем из диапазона 30...35 с

Суммарное время работы трех ступеней

Случайный разброс давления в камере сгорания

Должно выполняться следующее условие

Минимально допустимое время работы 2 ступени

Минимально допустимое время работы 3 ступени

Время работы третьей ступени больше минимально допустимого – параметры определены верно.

Относительная масса полезной нагрузки

Средняя относительная масса конструкции

Относительная масса конструкции первой ступени

Относительная масса конструкции третьей ступени

Относительная масса конструкции второй ступени

Массы ступеней

* 1 ступень , масса топлива , масса конструкции ;
* 2 ступень , масса топлива , масса конструкции .
* 3 ступень , масса топлива , масса конструкции .

Диаметры ступеней :

Давления в КС:

Относительная утопленность сопел ДУ ступеней:

Определение свода горения:

Допустимая относительная деформация

Коэффициент запаса

Максимальное давление, возникающее в двигателе

Для первой ступени

Для второй ступени

Для третьей ступени

Коэффициент линейного температурного расширения топлива

Коэффициент линейного температурного расширения конструкции

Модуль Юнга , коэффициент Пуассона

Разность температуры полимеризации топлива и минимальной температуры эксплуатации

Относительные диаметры каналов зарядов ступеней:

Относительные своды зарядов горения

Диаметры каналов зарядов ступеней

Своды горения зарядов ступеней

Наименьшая и наибольшая скорость горения топлива при стандартных условиях

Наименьшие и наибольшие реализуемые скорости горения топлива при номинальных давлениях в корпусах ДУ ступеней:

Наименьшее и наибольшее реализуемое значение времени работы ДУ ступеней

Номинальные значения скоростей горения

Расходные комплексы ДУ ступеней

Площади критических сечений

Диаметры критических сечений

Степени расширения сопла первой ступени

Диаметры среза сопла

Длины сопел

Теоретические значения удельного импульса в пустоте

Потери удельного импульса

Практические значения удельного пустотного импульса

**Расчетная оценка массово-геометрических характеристик конструкции ступеней**

*Масса конструкции ступени*

Силовой корпус «кокон»

Характеристики материала силовых оболочек (органопластика)

Максимальное давление, оказываемое на корпус

где

Максимально возможные значения коэффициентов объемного заполнения цилиндрических частей силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Максимально возможные значения коэффициентов объемного заполнения днищ силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Коэффициенты объемного заполнения цилиндрических частей силовых оболочек корпусов ДУ

Коэффициенты объемного заполнения цилиндрических частей силовых оболочек корпусов ДУ

Относительные и абсолютные диаметры передних полюсных отверстий силовых оболочек корпусов ДУ

Глубины утопленности сопел ДУ ступеней

Из геометрических соображений определяем диаметры задних полюсных отверстий силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Относительные диаметры задних полюсных отверстий силовых оболочек корпусов ДУ

Интерполируя данные таблицы 3 определяем коэффициенты для каждой ступени в зависимости от относительного диаметра заднего полюсного отверстия

Таблица 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
|  | 1,148 | 1,170 | 1,204 |
|  | 0,505 | 0,514 | 0,533 |
|  | 0,890 | 0,902 | 0,922 |

Получим следующие значения

Коэффициенты согласования для силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Масса силового корпуса

где

Длины цилиндрических частей силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Длины передних днищ силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Длины задних днищ силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Закладные фланцы кокона

Материал – титановый сплав ВТ-4

Средние относительные диаметры полюсных отверстий силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

Массы фланцев

где

Юбки кокона

Материал аналогичен материалу корпуса

где

Крышка воспламенительного устройства (ВУ)

Материал – титановый сплав ВТ-4

где

Защитно-крепящий слой (ЗКС)

Площади слоев

Массы ЗКС

Теплозащитное покрытие кокона

Используемый материал – резина

где

Сопло

Утопленная оболочка сопла

Используемый материал – титановый сплав ВТ-6

где

Теплозащитное покрытие утопленной оболочки (ТЗУО)

Используемый материал – углепластик

где

Корпус раструба (КР)

Используемый материал – титановый сплав ВТ-6

где

Облицовка раструба

Используемый материал – углепластик

где

Горловина

где

Привод рулевых машин и устройства управления вектором тяги

Постоянные коэффициенты

Из геометрических соображений нашли радиусы сфер передних днищ ДУ ступеней

Величина зазора между срезом сопла второй ступени и передним днищем первой ступени оказалась равным . Величину зазора между срезом сопла третьей ступени и передним днищем второй ступени для удобства также примем равным .

Так же из геометрических соображений, определяются и другие длины отсеков и ступеней:

Длины юбок

Длина хвостового отсека первой ступени

Длина приборного отсека первой ступени

Длина хвостового отсека второй ступени

Длина приборного отсека второй ступени

Длина хвостового отсека третьей ступени

Длина приборного отсека второй ступени

Длины ступеней

­Массы отсеков

где при поперечном разделении

Головной обтекатель

Площадь головного обтекателя

Масса головного обтекателя

где при поперечном разделении

Бортовая кабельная сеть (БКС)

где – составляющие, учитывающие транзитные кабели

**Уточнение относительных характеристик**

*Масса конструкций ступеней*

Масса конструкции корпуса

Масса конструкции ДУ

Масса конструкции ступеней

Масса третьей ступени

Масса второй ступени

Масса первой ступени

**Расчет параметров траектории**

*Активный участок траектории*

Оптимальный угол наклона вектора скорости к местному горизонту в конце АУТ определяем по таблице 4

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1000 | 2500 | 4500 | 6000 | 8000 | 10000 | 12000 |
|  | 42,7 | 38,4 | 34,9 | 31,5 | 27,0 | 22,5 | 18,0 |

Получаем

Средние углы наклона вектора скорости к местному горизонту на участках работы ДУ ступеней

*м*

*м*

Углы наклоны траектории в конце работы ступеней

Стартовая нагрузка на мидель

где площадь миделя

Удельные импульсы

где стандартное атмосферное давление

Коэффициенты учета потерь скорости на преодоление аэродинамического сопротивления и противодавления

Потери скорости на гравитацию

Скорости окончания работы маршевых ступеней

Скорость в конце АУТ

Высоты окончания работы маршевых ступеней

Высота в конце АУТ

Дальности окончания работы маршевых ступеней

Дальность конца АУТ

Радиус конца АУТ

Относительная скорость в конце АУТ

*Пассивный участок траектории*

Длина эллиптического участка

Расчетная дальность

Погрешность полученной дальности по сравнению с заданной

Погрешность определения скорости в конце АУТ

Распределение по ступеням

Корректировка параметров

Массы топлив получились равными

С учетом введенных корректировок необходимо произвести перерасчет параметров УБР

**Перерасчет параметров**

После перерасчета по формулам, представленным выше, получили следующие значения :

Практические значения удельного пустотного импульса:

Масса конструкции ступеней:

Масса топлива:

Расчетная дальность:

**Окончательный выбор параметров УБР**

Производя линейную интерполяцию, получаем окончательные значения масс топлив, конструкций и удельных пустотных импульсов при дальности

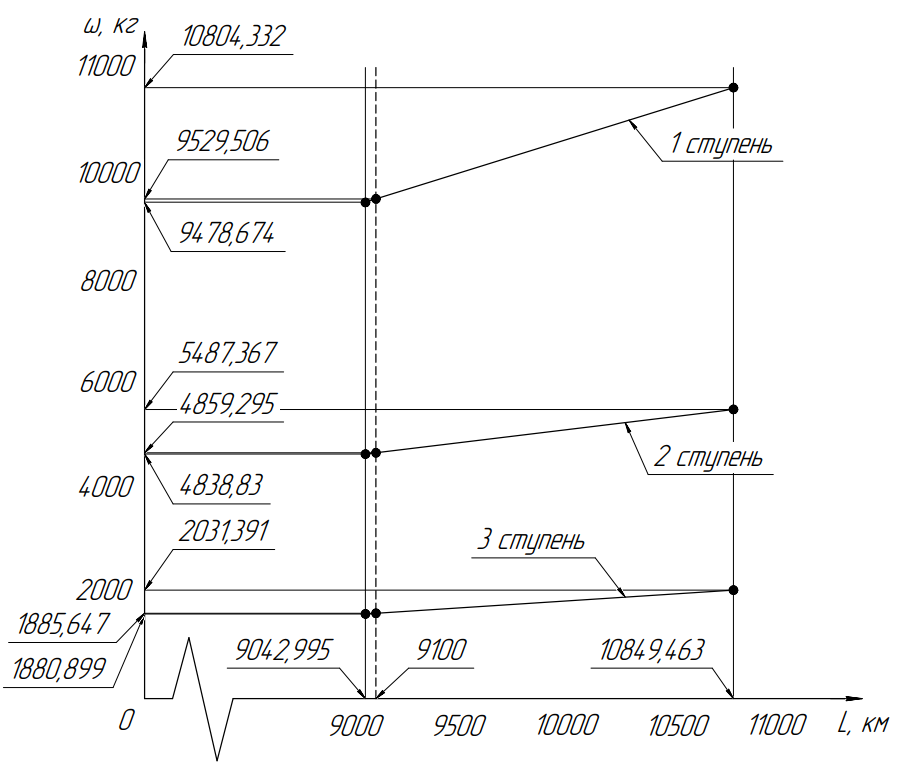


Рис. 1 Выбор массы топлива

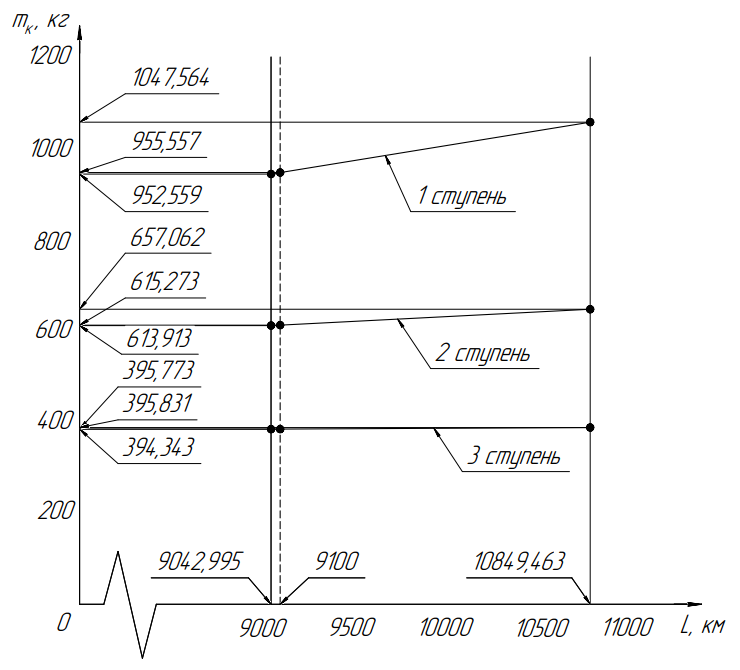


Рис. 2 Выбор массы конструкции

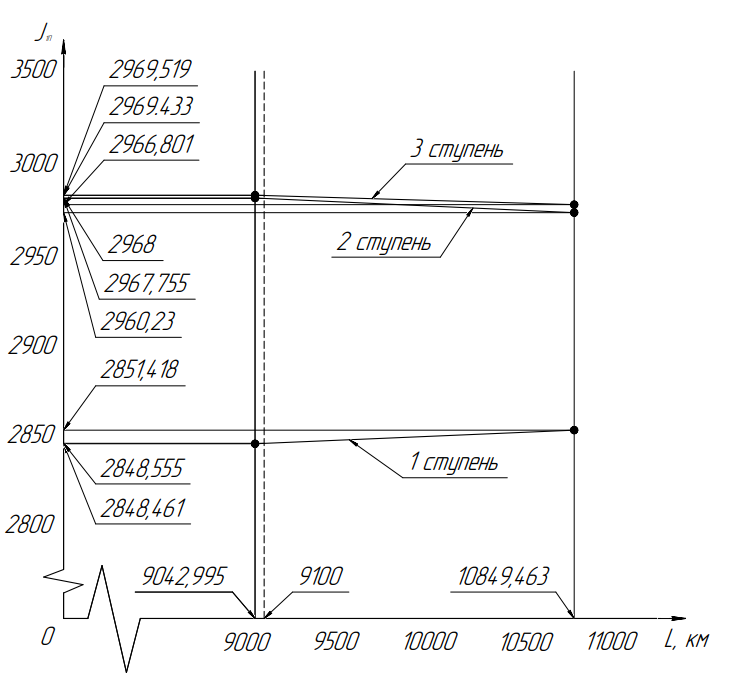


Рис. 3 Выбор удельного пустотного импульса

Окончательно имеем следующий набор параметров:

Для такого набора параметров УБР в результате конечного перерасчета получим следующие размеры ракеты:

Массовая и баллистическая сводка ракеты представлены в таблицах 5 и 6 соответственно

Таблица 5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 1 ступень | 2 ступень | 3 ступень |
| Силовой корпус | 264,999 кг | 113,586 кг | 35,143 кг |
| Закладные фланцы кокона | 26,518 кг | 20,801 кг | 7,466 кг |
| Юбки кокона | 37,941 кг | 19,064 кг | 9,106 кг |
| Крышка ВУ | 96,8 кг | 48,639 кг | 23,232 кг |
| Защитно-крепящий слой | 39,266 кг | 23,642 кг | 11,428 кг |
| Теплозащитное покрытие кокона | 82,76 кг | 40,604 кг | 18,393 кг |
| Утопленная оболочка сопла | 16,305 кг | 15,316 кг | 4,401 кг |
| ТЗУО | 6,546 кг | 5,007 кг | 2,061 кг |
| Корпус раструба | 22,214 кг | 19,176 кг | 6,002 кг |
| Облицовка раструба | 31,214 кг | 51,371 кг | 30,254 кг |
| Горловина | 43,571 кг | 28,98 кг | 13,338 кг |
| Привод РМУ | 102,575 кг | 69,174 кг | 21,206 кг |
| Головной обтекатель | 79,903 кг | | |
| Бортовая кабельная сеть | 4,927 кг | 8,831 кг | 10,768 кг |
| Конструкция корпуса | 548,843 кг | 266,657 кг | 104,861 кг |
| Конструкция ДУ | 771,267 кг | 455,68 кг | 182,123 кг |
| Конструкция ступени | 955,734 кг | 614,08 кг | 384,978 кг |

Таблица 6

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 1 ступень | 2 ступень | 3 ступень |
| Средний наклон траектории |  |  |  |
| Наклон в конце работы ступени |  |  |  |
| Удельный импульс | 2848,555 м/c | 2967,755 м/c | 2969,433 м/c |
| Скорость в конце работы ступени | 1705,574 м/с | 2380,063 м/c | 2812,673 м/c |
| Высота в конце работы ступени | 26,315 км | 4953 км | 39,67 км |
| Дальность в конце работы ступени | 23,552 км | 83,732 км | 86,067 км |
| Дальность эллиптического участка | 8790,371 км | | |
| Расчетная дальность | 9177, 076 км | | |

# **Литература**

1. Основы проектирования твердотопливных управляемых баллистических ракет : учеб. пособие / Николаев Ю. М., Панин С. Д., Соломонов Ю. С., Сычев М. П. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. Ч. 1. - 1998. - 103 с. : ил.

2. Основы проектирования твердотопливных управляемых баллистических ракет : учеб. пособие / Николаев Ю. М., Панин С. Д., Соломонов Ю. С., Сычев М. П. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. Ч. 2. - 2000. - 140 с. : ил.

3. Курс лекций Навагина К.В.