|  |  |
| --- | --- |
| 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)

**Лабораторная работа**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

|  |
| --- |
| «Проектирование энергетических установок РО» |
|  |

НА ТЕМУ:

|  |
| --- |
| Статическая чувствительность тяги и удельного импульса к определяющим |
| параметрам |

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

[Введение 3](#_Toc120050536)

[1. Теоретическая часть 3](#_Toc120050537)

[2. Практическая часть 5](#_Toc120050538)

[2.1. Исходные данные 5](#_Toc120050539)

[2.1. Расчет относительного отклонения тяги 6](#_Toc120050540)

[2.3. Отклонение удельного импульса 15](#_Toc120050541)

[Заключение 17](#_Toc120050542)

[Список литературы 18](#_Toc120050543)

# Введение

Тяга ракетного двигателя зависит от ряда параметров, таких как расход, скорость в выходном сечении сопла, давление в камере и т.д. В силу различных отклонений (химический состав и плотность топлива, колебания температуры окружающей среды, допуска на изготовление деталей тракта двигателя и т.п.) тяга реального двигателя отличается от номинального значения. Для анализа стендовых испытаний двигателя, разброса параметров на траектории, построения системы управления, проведение расчетов прочности и т.д. необходимо знать предельные отклонения тяги от номинального значения.

# 1. Теоретическая часть

Для определения предельных отклонений тяги от номинального значения, необходимо привести выражение тяги двигателя к виду:

где и – отклонение тяги и – го определяющего параметра от номинального значения, и – номинальные значения тяги и – го определяющего параметра, – число определяющих параметров, – функция веса.

Окончательное уравнение статической чувствительности тяги к определяющим параметрам записывается в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где – коэффициент реактивности сопла, который показывает какую часть тяги создает сверхзвуковая часть сопла. Коэффициент реактивности вычисляется по формуле

Величина называется реакцией газового потока

Согласно зависимости (1), основными факторами, обуславливающими непостоянство тяговых характеристик двигателя, являются: непостоянство скорости горения твердого топлива, различие размеров заряда и сопла двигателя в пределах допусков на их изготовление. Из перечисленных факторов главенствующую роль играет непостоянство единичной скорости горения твердого топлива. Единичная скорость горения твердого топлива существенно зависит от начальной температуры заряда, что в свою очередь обуславливает зависимость от нее тяговых параметров (при изменении температуры заряда на тяга двигателя может изменяться на ). Кроме этого, при одной и той же температуре в одном и том же двигателе наблюдается разброс скоростей горения зарядов вследствие различных отклонений от норм технологического процесса при их изготовлении и колебаний химического состава топлива (изменения в химическом составе топлива от партии к партии могут вызвать изменение тяги примерно на 3%).

Отклонения тяговых параметров от их расчетных значений могут вызываться случайными факторами, возникающими в процессе работы двигателя: увеличение поверхности горения вследствие появления трещин в заряде, увеличение диаметра критического сечения сопла и т.д. Отклонение поверхности горения заряда также может происходить из-за отклонения линейных размеров в пределах поля допуска. Исходя из требуемых значений отклонения тяги можно сформировать допуска на изготовление заряда и сопла, а также требования к химическому составу топлива.

Аналогичную формуле (1) можно составить и для удельного импульса. Рассматривая квазистационарный участок работы двигателя (так как тяга и расход на этом участке постоянны, то удельный импульс численно равен удельной тяге), можно получить выражение для отклонения удельного импульса

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где – предельный импульс при истечении в пустоту из полубесконечного сопла, – коэффициент реактивности полубесконечного сопла, – реакция потока на выходе из полубесконечного сопла.

# 2. Практическая часть

## 2.1. Исходные данные

Для выполнения лабораторной работы используются данные, полученные при выполнении домашнего задания по проектированию ракетного двигателя твердого топлива (таблица 1).

Таблица 1. Исходные данные для выполнения лабораторной работы

|  |  |
| --- | --- |
| Основные параметры | |
| Давление в камере сгорания |  |
| Коэффициент уширения сопла |  |
| Безразмерная скорость потока в выходном сечении сопла |  |
| Площадь критического сечения сопла |  |
| Площадь выходного сечения сопла |  |
| Параметры заряда | |
| Тип заряда | Канально-щелевой |
| Диаметр заряда |  |
| Толщина горящего свода |  |
| Внутренний диаметр заряда |  |
| Потребная площадь горения |  |
| Длина заряда |  |
| Длина пропилов |  |
| Ширина пропилов |  |
| Количество щелей |  |
| Параметры твердого топлива | |
| Плотность топлива |  |
| Газовая постоянная |  |
| Температура горения топлива |  |
| Показатель адиабаты |  |
| Показатель степени закона горения |  |
| Единичная скорость горения |  |
| Калорийность топлива |  |

Давление окружающей среды

Все необходимые расчеты в процессе выполнения лабораторной работы проводятся в среде языка программирования Python.

## 2.1. Расчет относительного отклонения тяги

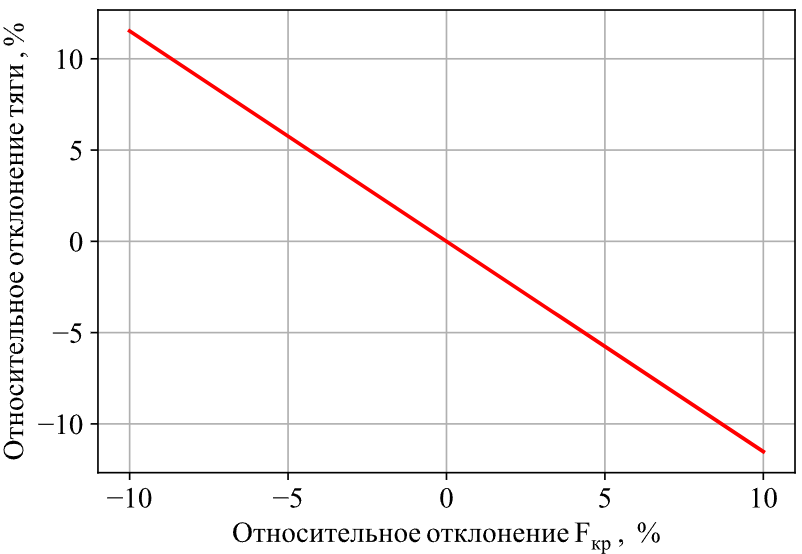
Отклонение тяги от номинального значения рассчитывается по зависимости (1). Для простоты анализа отклонений тяги, связанных с отклонением определяющих параметров, разделим выражение (1) на составляющие слагаемые:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |
|  | (4) |
|  | (5) |
|  | (6) |
|  | (7) |

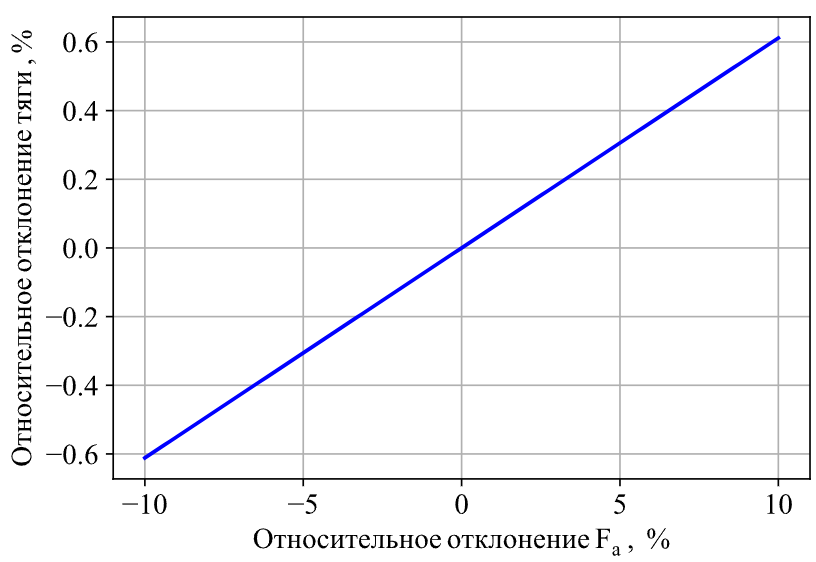
Коэффициент реакции газового потока рассчитывается по формуле

После подстановки числовых значений, получаем

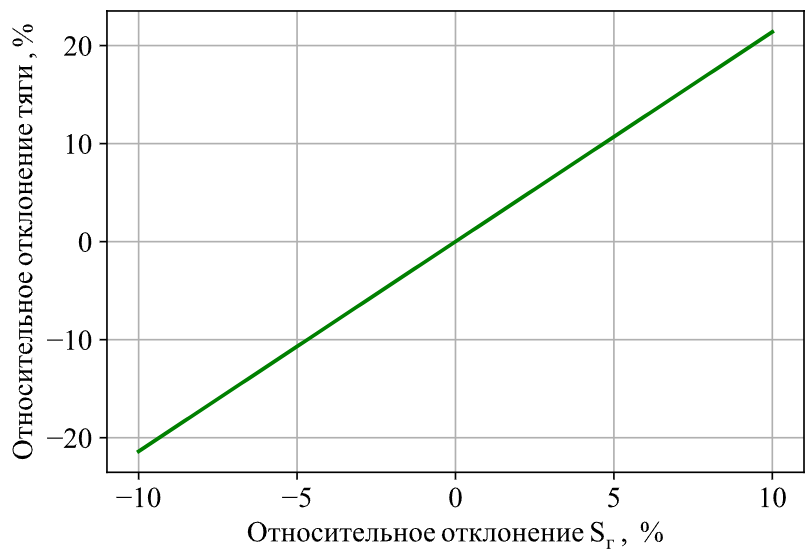
Зависимости отклонения тяги от определяющих параметров, соответственно, , , и представлены на рис. 1 – 4. *Предельные отклонения для плотности топлива приняты по рекомендации .* При проектировании ракетного двигателя на твердом топливе предварительно было назначено максимальное отклонение тяги – .



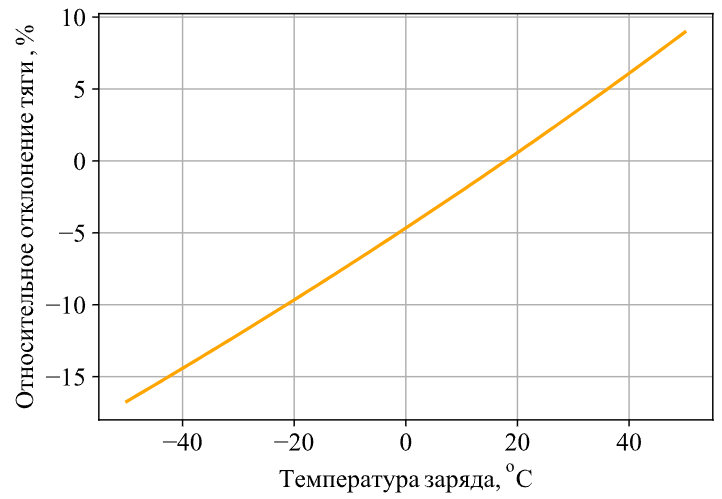
**Рис. 1.** Зависимость отклонения тяги от отклонения



**Рис. 2.** Зависимость отклонения тяги от отклонения



**Рис. 3.** Зависимость отклонения тяги от отклонения



**Рис. 4.** Зависимость отклонения тяги от температуры заряда

Как видно из графиков на рис. 1 – 4, наибольшее влияние на относительное отклонение тяги оказывает площадь критического сечения сопла, площадь поверхности горения, а также начальная температура заряда. Минимальное влияние на относительное отклонение тяги оказывает площадь выходного сечения . Температура заряда влияет на скорость горения. Поскольку отклонение скорости горения, связанное с химическим составом, принято 3%, общее отклонение будет складываться от отклонений из-за хим. состава и отклонений, возникающих при различной начальной температуре заряда.

Для проверки выполнения требований на предельное отклонение тяги (), заложенных в ТЗ, назначим допуска на диаметр критического сечения , диаметр выходного сечения , а также на геометрические параметры заряда (длина заряда , длина пропилов , ширина пропилов ), отклонение которых дает отклонение значений площади поверхности горения . Геометрические параметры сопла и заряда представлены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические характеристики определяющих параметров

|  |  |
| --- | --- |
| Диаметр критического сечения сопла |  |
| Диаметр выходного сечения сопла |  |
| Длина заряда |  |
| Длина пропилов |  |
| Толщина пропилов |  |

По ГОСТ 25346-89 [2] назначаются допуска на отверстия и валы. Согласно [2], наиболее предпочтительным допуском для отверстий являются допуска . Для валов наиболее предпочтительными допусками являются допуска

Назначаем в первом приближении для отверстий допуск . Согласно [2, таблица 3], предельное отклонение для допуска рассчитывается как половина допуска соответствующего квалитета [2, таблица 1]

где – порядковый номер квалитета.

Для валов назначается в первом приближении допуск

Геометрические параметры с назначенными отклонениями представлены в таблице 3.

Таблица 3. Размеры определяющих параметров с назначенными допусками для отверстий и для валов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Значение | Отклонение параметра от номинального значения |
| Диаметр критического сечения сопла | допуск по |  |
| Диаметр выходного сечения сопла | допуск по |  |
| Длина заряда | допуск по |  |
| Длина пропилов | допуск по |
| Толщина пропилов | допуск по |

Относительное отклонение тяги для выбранных в первом приближении отклонений размеров геометрических характеристик определяющих параметров представлено в таблице 4.

Таблица 4.1. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Таблица 4.2. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Таблица 4.3. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Как видно из таблиц 4, максимальное суммарное относительное отклонение тяги составляет

Выполнить требования ТЗ на данном этапе не представляется возможным.

Во втором приближении назначаются меньшие требования к точности геометрических характеристик определяющих параметров. Так, для отверстий назначается допуск , для валов - Значения геометрических характеристик рассматриваемых параметров для назначенных допусков представлены в таблице 5. Относительное отклонение тяги – в таблице 6.

Таблица 5. Размеры определяющих параметров с назначенными допусками для отверстий и для валов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Значение | Отклонение параметра от номинального значения |
| Диаметр критического сечения сопла | допуск по |  |
| Диаметр выходного сечения сопла | допуск по |  |
| Длина заряда | допуск по |  |
| Длина пропилов | допуск по |
| Толщина пропилов | допуск по |

Таблица 6.1. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Таблица 6.2. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Таблица 6.3. Относительное отклонение тяги при

|  |  |
| --- | --- |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| Отклонение |  |
| **Суммарное отклонение тяги** |  |

Максимальное значение отклонения тяги от номинального значения составляет

## 2.3. Отклонение удельного импульса

Отклонение удельного импульса рассчитывается по формуле (2)

При расчете коэффициент расхода сопла принимался равным , коэффициент тепловых потерь

После подстановки числовых значений отклонений определяющих параметров (таблица 5), получаем:

Значения отклонений удельного импульса для различных начальных температур заряда представлены в таблице 7.

Таблица 7. Отклонение удельного импульса

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Начальная температура заряда |  |  |  |
| Отклонение удельного импульса |  |  |  |

# Заключение

Таким образом, в результате выполнения лабораторной работы установлено, что относительное отклонение тяги, заложенное в ТЗ при проектировании РДТТ (), не достижимо. После проведенных вычислений значение отклонения тяги уточнено. Суммарные отклонения тяги от номинального значения для различных начальных температур заряда составляют, соответственно, *Максимальное отклонение тяги*

Максимальное отклонение удельного импульса при начальной температуре заряда составляет

Назначенные допуски на геометрические размеры определяющих параметров:

- диаметр критического сечения по ;

- диаметр выходного сечения по

- длина заряда по

- длина пропилов по

- ширина щелей по

# Список литературы

1. Лекция 17. «Статическая чувствительность тяги и удельного импульса к определяющим параметрам». Федоров А.А., каф. СМ6, МГТУ им. Н. Э. Баумана.

2. ГОСТ 25346-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. Москва: Изд-во стандартов, 1990, 23 с.