|  |  |
| --- | --- |
| 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 «Энергомашиностроение»

КАФЕДРА «Ракетные двигатели»

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ***

***НА ТЕМУ:***

Маршевый ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя

Студент Э1-122  Е.И. Гаврилова

(Группа) (Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР В.В. Козичев

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант по технологической части М.А. Комков

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант по охране труда и экологии А.А. Аграфонова

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант по

организационно-экономической части Э.Б. Мазурин

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Нормоконтролер Е.И. Бардакова

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**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)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой Э–1

(Индекс)

Д.А. Ягодников

(И.О.Фамилия)

«     08     »      февраля      20   21  г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

Студент группы Э1-122

Гаврилова Елизавета Ивановна

(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы: Маршевый ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя

Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т.п.)

НИР кафедры

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением по факультету Энергомашиностроение № 03.05.01-04/17 от «  11   »      декабря     20   20  г

***Часть 1. Конструкторская часть. \_***

Рассчитать и спроектировать маршевый ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя

***Часть 2.*** ***Исследовательская часть.***

Определить качественный характер зависимости параметров двигателя от параметров используемых топлив. Обосновать выбор топливной пары

Консультант В.В. Козичев

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

***Часть 3.*** ***Технологическая часть.***

Разработать технологический процесс изготовления заряда из смесевого твердого ракетного топлива

Консультант М.А. Комков

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

***Часть 4. Охрана труда и экология.***

Провести общий анализ вредных и опасных факторов, негативно влияющих как на человека, так и на окружающую среду. Рассчитать и проанализировать шумовое воздействие на кабину персонала во время проведения испытаний

Консультант А.А. Аграфонова

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

***Часть 5. Организационно-экономическая часть.***

Рассчитать затраты на проектирование ракетного двигателя твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя, изготовление опытных образцов и их испытания

Консультант Э.Б. Мазурин

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

***Оформление квалификационной работы:***

Расчетно-пояснительная записка на            листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

Дата выдачи задания «     08     »      февраля      20 21 г.

В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объеме в срок до «          »      июня      20 21 г.

**Руководитель квалификационной работы** В.В. Козичев

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**Студент** Е.И. Гаврилова

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**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**  **Э**  УТВЕРЖДАЮ

**КАФЕДРА** **Э1** Заведующий кафедрой Э‑1

(Индекс)

**ГРУППА** **Э1-122** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д.А. Ягодников

(И.О.Фамилия)

«     08    »      февраля      20   21  г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

**выполнения выпускной квалификационной работы**

студента: Гавриловой Елизаветы Ивановны

(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы Маршевый ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наименование этапов выпускной квалификационной работы** | **Сроки выполнения этапов** | | **Отметка о выполнении** | |
| **план** | **факт** | **Должность** | **ФИО, подпись** |
| 1. | Задание на выполнение работы. Формулирование проблемы, цели и задач работы | 08.02.21 |  | Руководитель ВКР |  |
| 2. | 1 часть Конструкторская часть | 15.03.21 |  | Руководитель ВКР |  |
| 3. | Утверждение окончательных формулировок решаемой проблемы, цели работы и перечня задач | 20.03.21 |  | Заведующий кафедрой |  |
| 4. | 2 часть Исследовательская часть | 02.04.21 |  | Руководитель ВКР |  |
| 5. | 3 часть Технологическая часть | 12.04.21 |  | Консультант по технологической части |  |
| 6. | 4 часть Охрана труда и экология | 20.04.21 |  | Консультант по охране труда и экологии |  |
| 7. | 5 часть Организационно-экономическая часть | 26.04.21 |  | Консультант по организационно-экономической части |  |
| 8. | 1-я редакция работы | 03.05.21 |  | Руководитель ВКР |  |
| 9. | Подготовка доклада и презентации | 20.05.21 |  |  |  |
| 10. | Заключение руководителя | 27.05.21 |  | Руководитель ВКР |  |
| 11. | Допуск работы к защите на ГЭК (нормоконтроль) | 10.06.21 |  | Нормоконтролер |  |
| 12. | Внешняя рецензия | 11.06.21 |  |  |  |
| 13. | Защита работы на ГЭК | 17.06.21 |  | Секретарь ГЭК |  |

*Студент*  *Руководитель работы*

**Оглавление**

[Введение 8](#_Toc73736400)

[1. Конструкторская часть 10](#_Toc73736401)

[1.1. Задание на проектирование 11](#_Toc73736402)

[1.2. Проектирование заряда твердого топлива 12](#_Toc73736403)

[1.2.1. Выбор формы заряда 12](#_Toc73736404)

[1.2.2. Выбор твердого ракетного топлива 14](#_Toc73736405)

[1.2.3. Термодинамический расчет характеристик 18](#_Toc73736406)

[1.2.4. Расчет внутрибаллистических характеристик 18](#_Toc73736407)

[1.2.5. Расчет отклонений внутрибаллистических параметров 23](#_Toc73736408)

[1.3. Расчет тепловых потоков и толщины слоя теплозащитного покрытия в КС 27](#_Toc73736409)

[1.4. Расчет и проектирование корпуса РДТТ 39](#_Toc73736410)

[1.4.1. Расчет толщины силовой оболочки корпуса 40](#_Toc73736411)

[1.4.2. Расчет соединений корпусных деталей 43](#_Toc73736412)

[1.5. Расчет и проектирование соплового блока 44](#_Toc73736413)

[1.5.1. Профилирование сужающейся части сопла 45](#_Toc73736414)

[1.5.2. Профилирование трансзвуковой части сопла 46](#_Toc73736415)

[1.5.3. Профилирование сверхзвуковой части сопла 46](#_Toc73736416)

[1.5.4. Особенности проектирования соплового блока 47](#_Toc73736417)

[1.6. Расчет тепловых потоков в сопле РДТТ 47](#_Toc73736418)

[1.6.1. Расчет конвективного теплового потока по длине сопла 47](#_Toc73736419)

[1.6.2. Расчет радиационного теплового потока по длине сопла 58](#_Toc73736420)

[1.7. Расчет потерь удельного импульса 61](#_Toc73736421)

[1.8. Расчет воспламенительного устройства 62](#_Toc73736422)

[1.8.1. Расчет заряда основного воспламенителя 63](#_Toc73736423)

[1.8.2. Расчет толщины бронирующего покрытия основного воспламенителя 67](#_Toc73736424)

[1.8.3. Расчет толщины теплозащитного покрытия 67](#_Toc73736425)

[1.8.4. Расчет толщины стенки корпуса воспламенителя 70](#_Toc73736426)

[1.8.5. Расчет предвоспламенителя 70](#_Toc73736427)

[1.9. Расчет и проектирование сопловой заглушки 71](#_Toc73736428)

[2. Исследовательская часть 73](#_Toc73736429)

[Введение 74](#_Toc73736430)

[2.1. Массоприход с поверхности горения 75](#_Toc73736432)

[2.2. Влияние свойств топлив на РДТТ 75](#_Toc73736433)

[3. Технологическая часть 79](#_Toc73736434)

[Введение 80](#_Toc73736435)

[3.1. Схема технологического процесса изготовления заряда 81](#_Toc73736437)

[3.2. Разработка операционного технологического процесса 86](#_Toc73736438)

[3.3. Описание операций 90](#_Toc73736439)

[3.4. Расчет шнекового экструдера 96](#_Toc73736440)

[4. Охрана труда и экология 102](#_Toc73736441)

[Введение 103](#_Toc73736442)

[4.1. Анализ вредных и опасных факторов 104](#_Toc73736444)

[4.2. Оценка выбросов при огневых стендовых испытаниях 105](#_Toc73736445)

[4.3. Расчет звукоизоляции кабины для персонала 108](#_Toc73736446)

[5. Организационно-экономическая часть 113](#_Toc73736447)

[Введение 114](#_Toc73736448)

[5.1. Основные этапы НИиОКР 115](#_Toc73736450)

[5.2. Затраты на проектирование, изготовление и испытание 117](#_Toc73736451)

[5.2.1. Расчет заработной платы при проектировании и изготовлении 117](#_Toc73736459)

[5.2.2. Затраты на оборудование 123](#_Toc73736460)

[5.2.3. Затраты на вспомогательное ПО 123](#_Toc73736461)

[5.2.4. Затраты на материалы 123](#_Toc73736462)

[5.2.5. Суммарные затраты на проектирование 124](#_Toc73736463)

[5.2.6. Затраты на испытания 125](#_Toc73736464)

[5.2.7. Полные затраты 126](#_Toc73736465)

[Заключение 127](#_Toc73736466)

[Список литературы 128](#_Toc73736467)

[Приложение А. Характеристики ТРТ 129](#_Toc73736468)

[Приложение Б. Термодинамический расчет 133](#_Toc73736469)

[Приложения В. Теплофизические свойства ПС 137](#_Toc73736470)

# Введение

Ракетным двигателем на твердом топливе (РДТТ) называется двигатель прямой реакции, в котором химическая энергия твердого топлива преобразуется сначала в тепловую, а затем – в кинетическую энергию продуктов сгорания (ПС), истекающих с большой скоростью в окружающее пространство. Находящийся в камере сгорания (КС) заряд твердого топлива, являющийся источником химической энергии и рабочего тела, выполняется определенной формой, массой и размером.

РДТТ нашли широкое применение в роли вспомогательных ракетных двигателей для коррекции траектории и стабилизации летательных аппаратов, торможения и посадки, маршевых двигателей многоступенчатых баллистических ракет и ракетоносителей для вывода космических аппаратов на орбиту.

Целью данного дипломного проекта является разработка РДТТ третьей ступени ракеты-носителя.

Необходимость разработки РДТТ в данном случае определяется рядом его преимуществ перед жидкостный ракетный двигатель (ЖРД):

1. Сравнительная простота конструкции РДТТ, связанная с размещением заряда твердого топлива в камере сгорания, что позволяет исключить сложные системы подачи топлива. Сопловой блок, как правило, не требует принудительного охлаждения. В конструкции РДТТ, за исключением органов управления вектором тяги, отсутствуют подвижные части.
2. Простота эксплуатации ракет с РДТТ, предопределенная простотой конструкции РДТТ, отсутствием необходимости в сложных регламентных проверках и предпусковых технологических операциях.
3. Постоянная готовность к действию, поскольку стабильность свойств современных твердых топлив и конструкционных материалов позволяет дли­тельно хранить РДТТ в снаряженном состоянии на стартовых позициях.
4. Надежность и безотказность. Надежность действия какой-либо установки равна произведению надежностей отдельных агрегатов, из которых она состоит. Следовательно, чем больше отдельных агрегатов входит в состав двигательной установки, тем меньше и ее надежность в целом. Так как РДТТ прост по своей конструкции и не имеет отдельных сложных агрегатов, то и надежность его работы велика.

Для достижения основной цели дипломного проекта поставлены следующие задачи:

1. Проектирование заряда твердого топлива.
2. Разработка корпуса двигателя.
3. Разработка конструкции соплового блока.
4. Расчет теплозащитного покрытия (ТЗП).
5. Проектирование воспламенительного устройства.

В исследовательской части проекта необходимо определить качественный характер зависимости параметров двигателя от параметров используемых топлив, обосновать выбор топливной пары.

В технологической части рассматривается технологический процесс изготовления заряда из смесевого твердого ракетного топлива, прочно скрепленного с корпусом РДТТ.

В организационно-экономической части поставлена задача определения затрат на проектирование РДТТ третьей ступени, изготовление опытных образцов и их испытания.

В части посвященной экологии и промышленной безопасности необходимо оценить влияние вредных и опасных факторов на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла изделия, провести расчет и анализ шумового воздействия на кабину персонала во время испытаний.

# Конструкторская часть

## Задание на проектирование

Исходными данными для проектирования являются импульс тяги РДТТ, время работы двигателя, среднее давление в камере сгорания, диаметр «ведущего» и «ведомого» зарядов, численные значения которых приведены в таблице Таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные

|  |  |
| --- | --- |
| Импульс тяги РДТТ, | 1500 |
| Время работы двигателя , |  |
| Среднее давление в камере сгорания, | 5 |
| Диаметр «ведомого» заряда | 0,5 |
| Диаметр «ведущего» заряда | 0,02 |

## Проектирование заряда твердого топлива

### Выбор формы заряда

Торцевой заряд твердого топлива, несмотря на ряд преимуществ, таких как простота расчета баллистических характеристик, высокая технологичность, высокий коэффициент заполнения камеры сгорания [1] имеет главный недостаток, ограничивающий его использование в маршевых двигателях – малая величина площади поверхности горения при значительной толщине свода.

В качестве решения данной проблемы выбрана следующая концепция заряда: по оси расположен заряд вспомогательного топлива («ведущий») пренебрежимо малого диаметра, что позволяет торцевой поверхности основного заряда («ведомый») при выгорании глухой вершины конуса не разгораться по сферической поверхности.

Параметры горения топлив «ведущего» и «ведомого» зарядов определяют массово-габаритные характеристики изделия, влияют на поведение двигателя (конечный импульс) после выгорания «ведущего» заряда ввиду наличия дегрессивно догорающих остатков [2]. Таким образом, поиск подходящей пары топлив для «ведущего» и «ведомого» зарядов является важной задачей оптимизации при проектировании РДТТ.

На рисунке Рисунок 1.1 представлен общий вид заряда с внутренней конической поверхностью горения и осевым ускорительным зарядом.

На рисунке Рисунок 1.2 представлены параметры горения составного заряда с коническим углублением.

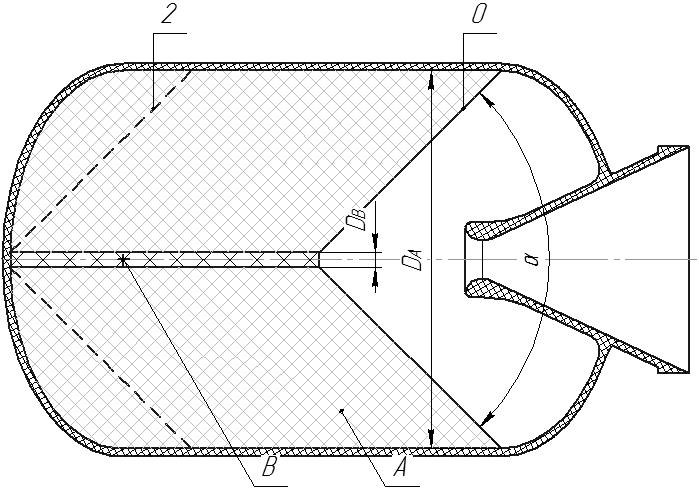


Рисунок 1.1 – Общий вид заряда с внутренней конической поверхностью горения и осевым ускорительным зарядом. А – заряд основного топлива, В – центральный заряд быстрогорящего («ведущего») топлива, 0 – исходная поверхность горения, 2 – поверхность горения, соответствующая началу догорания остаточной части основного заряда топлива.

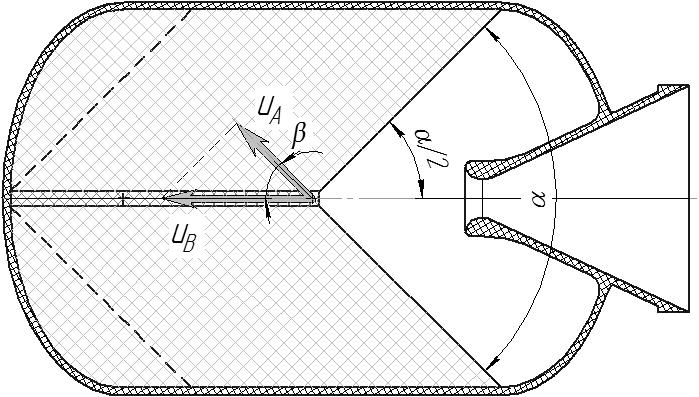


Рисунок 1.2 – Параметры горения составного заряда с коническим углублением.

Торцевой заряд с коническим углублением при достаточно малом угле конуса обеспечивает необходимую начальную площадь поверхности горения и величину тяги.

Подобная конфигурация заряда позволяет гармонично организовать утопленное в заряд сопло, что повысит коэффициент заполнения камеры и улучшит массогабаритные показатели двигателя.

### Выбор твердого ракетного топлива

Для обеспечения заданных условий работы РДТТ, необходимо подобрать топливо из имеющейся базы данных, которое будет максимально удовлетворять исходным данным.

В современных ракетных двигателях на твердом топливе чаще используют смесевое твердое ракетное топливо (СТРТ), чем баллиститное твердое ракетное топливо (БТРТ).

Стремительное развитие и использование СТРТ как в нашей стране, так и за рубежом обусловлено более высокими энергомассовыми и другими характеристиками по сравнению с БТРТ [3].

Подбор топлива осуществляется путем выбора из композиций, приведенных в приложении А.

Массоприход с поверхности заряда твердого топлива определяется по следующей зависимости [4]:

,

где  плотность топлива,  единичная скорость горения,  показатель в законе горения,  давление в камере сгорания,  площадь горения.

Тогда массоприход с поверхности горения для рассматриваемой конфигурации:

,

где индекс 1 используется для топлива «ведомого» заряда, индекс 2 используется для «ведущего» заряда.

Угол наклона конуса горящей поверхности определяется следующей зависимостью:

.

Тогда площадь горения «ведомого»:

,

где внешний диаметр «ведомого», внутренний диаметр «ведомого».

Получаем итоговую зависимость:

.

В результате расчета, учитывая полученные значения расхода топлива при заданном диаметре заряда и угол наклона конуса горящей поверхности, что позволяет гармонично организовать утопленное в заряд сопло, для «ведущего» заряда выбрано топливо марки ПХН – 2М, для «ведомого» выбрано топливо марки ПХА – 4М.

Характеристики комбинации представлены в таблице Таблица 1.2 и таблице Таблица 1.3.

Таблица 1.2 – Характеристики топлива ПХН – 2М

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Состав | Окислитель | перхлорат нитрония, % | 30 |
| Горючее | порошкообразный алюминий, % | 60 |
| ГСВ | поливинилхлорид, % | 10 |
| Условная химическая формула | | |  |
| Энтальпия образования , | | |  |
| Закон горения | | |  |
| Плотность топлива , | | | 2430 |
| Теплопроводность, | | |  |
| Коэффициент теплопроводности λ, | | | 4,5 |
| Коэффициент линейного расширения, | | |  |
| Минимальное давление устойчивого горения, кПа | | | 0,7 |
| Эксплуатационный интервал температур | | | [240;293] |

Таблица 1.3 – Характеристики топлива ПХА – 4М

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Состав | Окислитель | перхлорат аммония, % | 35 |
| Горючее | порошкообразный алюминий, % | 20 |
| ГСВ | нитразол, % | 45 |
| Условная химическая формула | | |  |
| Энтальпия образования , | | |  |
| Закон горения | | |  |
| Плотность топлива , | | | 1800 |
| Теплопроводность, | | |  |
| Коэффициент теплопроводности λ, | | | 0,94 |
| Коэффициент линейного расширения, | | |  |
| Минимальное давление устойчивого горения, кПа | | | 30 |
| Эксплуатационный интервал температур | | | [220;320] |

### Термодинамический расчет характеристик

С помощью программы «TERRA» [5] проводится термодинамический расчет горения в камере сгорания, расширения в сопле и равновесного состава продуктов сгорания.

В приложении Б приводятся результаты термодинамического расчета.

### Расчет внутрибаллистических характеристик

Для получения основных параметров РДТТ необходимо провести расчет внутрибаллистических характеристик.

Из результатов термодинамического расчета выбранной пары топлив используется значения равновесной температуры продуктов сгорания , показателя адиабаты , удельного импульса .

Приведенная скорость потока продуктов сгорания в выходном сечении сопла:

.

Газодинамические функции:





Комплекс:

.

Расход:

.

Площадь критического сечения:



где коэффициент, учитывающий потери энергии на нагрев стенок камеры сгорания и на неполноту сгорания твердого топлива, коэффициент потерь в сопле.

Диаметр критического сечения:

.

Площадь выходного сечения сопла:

.

Диаметр выходного сечения сопла:

.

Площадь горения:



Скорость горения:

,

где единичная скорость горения «ведомого» топлива; показатель в законе горения.

Для расчёта изменения поверхности горения используется геометрический метод, в основе которого лежит допущение о равномерности поля скорости горения топлива, т.е. одинаковой скорости горения во всех направлениях. Из этого допущения следует, что скорость горения всегда нормальна к поверхности горения, и процесс выгорания происходит параллельными (эквидистантными) слоями.

Полученные данные используются для расчета давления в камере сгорания, скорости горения заряда и тяги по времени работы РДТТ в зависимости от величины сгоревшего свода заряда.

Расчет давления в зависимости от площади горения:

.

Скорость горения:

.

Время работы:

.

Тяга:

.

Результаты расчета представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Зависимости площади горения, давления в камере сгорания, скорости горения и тяги от величины сгоревшего свода «ведомого» заряда

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0 | 0 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 2 | 1,33 | 0,0222 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 3 | 2,67 | 0,0445 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 4 | 4 | 0,0667 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 5 | 5,33 | 0,0889 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 6 | 6,67 | 0,1112 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 7 | 8 | 0,1334 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 8 | 9,33 | 0,1556 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 9 | 10,67 | 0,1779 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 10 | 12 | 0,2001 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 11 | 13,33 | 0,2223 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 12 | 14,67 | 0,2445 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 13 | 16 | 0,2668 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 14 | 17,33 | 0,2890 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 15 | 18,67 | 0,3112 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 16 | 20 | 0,3335 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 17 | 21,33 | 0,3557 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 18 | 22,67 | 0,3779 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 19 | 24 | 0,4002 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 20 | 25,33 | 0,4224 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 21 | 26,67 | 0,4446 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 22 | 28 | 0,4669 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 23 | 29,33 | 0,4891 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 24 | 30,67 | 0,5113 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 25 | 32 | 0,5336 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 26 | 33,33 | 0,5558 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 27 | 34,67 | 0,5780 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 28 | 36 | 0,6003 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 29 | 37,33 | 0,6225 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 30 | 38,67 | 0,6447 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 31 | 40 | 0,6669 | 0,3601 | 5 | 16,674 | 36046,96 |
| 32 | 40,89 | 0,6818 | 0,3557 | 4,9106 | 16,602 | 35402,41 |
| 33 | 41,79 | 0,6967 | 0,3472 | 4,7568 | 16,475 | 34293,89 |
| 34 | 42,70 | 0,7115 | 0,3337 | 4,5144 | 16,269 | 32546,36 |
| 35 | 43,62 | 0,7264 | 0,3142 | 4,1709 | 15,964 | 30069,85 |
| 36 | 44,57 | 0,7413 | 0,2874 | 3,7088 | 15,520 | 26738,33 |
| 37 | 45,55 | 0,7561 | 0,2507 | 3,0993 | 14,866 | 22343,86 |
| 38 | 46,59 | 0,7710 | 0,1929 | 2,1965 | 13,687 | 15835,38 |
| 39 | 48,76 | 0,7859 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Полный импульс тяги:

.

### Расчет отклонений внутрибаллистических параметров

Разделяем отклонения параметров на случайные и неслучайные. К случайным относят отклонения из-за разбросов технологических режимов и различных свойств сырья в пределах одной партии, из-за неточного измерения начальной температуры заряда, из-за изменения свойств стенок и условий теплопередачи, из-за разброса площади критического сечения и среза сопла в пределах допуска.

Для расчета объединяем все случайные факторы и считаем разброс характеристик из-за случайных параметров равным .

Тогда:

,

.

К неслучайным отклонениям можно отнести отклонения из-за изменения начальной температуры заряда.

Отклонения из-за изменения начальной температуры заряда:

,

.

,

.

,

.

Отклонения по давлению в камере сгорания:

,

.

Давление в камере сгорания:

,

.

Скорость горения:

,

.

Время работы:

.

Тяга:

.

Таблица 1.5 – Зависимости площади горения, давления в камере сгорания, скорости горения, времени работы и тяги от величины сгоревшего свода при двух случаях предельных отклонений

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | MIN | | | | MAX | | | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,022 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,045 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,067 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,089 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,111 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,133 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,156 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,178 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,200 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,222 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,245 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,267 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,289 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,311 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,334 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,356 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,378 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,400 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,422 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,445 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,467 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,489 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,511 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,534 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,556 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,578 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,600 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,623 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,645 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,667 | 0,360 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,682 | 0,356 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,697 | 0,347 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,712 | 0,334 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,726 | 0,314 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,741 | 0,287 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,756 | 0,251 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,771 | 0,193 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,786 | 0 |  |  |  |  |  |  |  |  |

## Расчет тепловых потоков и толщины слоя теплозащитного покрытия в КС

В процессе работы РДТТ основные элементы конструкции и узлы испытывают значительные тепловые нагрузки, наибольшая доля теплового потока реализуется в КС.

Возможные негативные эффекты:

1. Нагрев элементов конструкции, ухудшение прочностных характеристик.
2. Разрушение конструкционных материалов, которые обеспечивают газодинамический профиль сопла, что приводит к изменению критического сечения, искажению профиля сопла.
3. Осаждение конденсированной фазы на газодинамический профиль двигателя.

Расчет тепловых потоков проводится по методике В.С. Авдуевского для следующих начальных условий [6]:

1. давление в камере сгорания ;
2. температура ;
3. диаметр критического сечения ;
4. газовая постоянная ;
5. показатель адиабаты ;
6. массовая доля конденсированных частиц ;
7. полная энтальпия ПС ;
8. коэффициент динамической вязкости ;
9. теплоёмкость продуктов сгорания .

Теплозащитное покрытие должно обеспечивать:

1. надежную защиту стенки КС от воздействия тепловых потоков;
2. надежную адгезию к корпусу и защитно-крепящему слою;
3. сохранение собственных несущих свойств в условиях упругой деформации;
4. стабильность свойств при длительном хранении;

В качестве материала ТЗП применяется композиционный материал с основой связующего из термопластичного полимера и дисперсно-волокнистого наполнителя из керамики.

Данный аблятор обладает следующими характеристиками:

1. Плотность материала покрытия .
2. Удельная теплоёмкость покрытия .
3. Коэффициент теплопроводности .
4. Температура поверхности газового тракта .
5. Полная энтальпия материала покрытия .
6. Массовое содержание связующего .
7. Удельная теплота абляции материала .

Исходные данные для расчета цилиндрической части приведены в таблице Таблица 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры цилиндрической части

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |
| 1 | 0 | 25 | 500 |
| 2 | 3,79 | 25 | 500 |
| 3 | 7,59 | 27 | 500 |
| 4 | 11,39 | 30 | 500 |
| 5 | 15,18 | 32 | 500 |
| 6 | 18,98 | 35 | 500 |
| 7 | 22,77 | 37 | 500 |
| 8 | 26,57 | 40 | 500 |
| 9 | 30,36 | 42 | 500 |
| 10 | 34,16 | 45 | 500 |
| 11 | 37,95 | 47 | 500 |
| 12 | 41,75 | 48 | 500 |
| 13 | 45,54 | 50 | 500 |

Исходные данные для расчета заднего днища приведены в таблице Таблица 1.7.

Таблица 1.7 – Параметры заднего днища

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |
| 1 | 48,76 | 50 | 500 |
| 2 | 48, 76 | 62,5 | 458,33 |
| 3 | 48, 76 | 75 | 416,67 |
| 4 | 48, 76 | 87,5 | 375 |
| 5 | 48, 76 | 100 | 333,33 |
| 6 | 48, 76 | 112,5 | 291,67 |
| 7 | 48, 76 | 125 | 250 |
| 8 | 48, 76 | 137,5 | 208,33 |
| 9 | 48, 76 | 150 | 166,67 |
| 10 | 48, 76 | 162,5 | 125 |
| 11 | 48, 76 | 175 | 83,33 |
| 12 | 48, 76 | 187,5 | 41,67 |

Число Маха в данной зоне:

,

где  характерная скорость течения газа.

Статическая температура ПС:

.

Коэффициент восстановления температуры:

,

где  критерий Прандтля.

Температура ПС на адиабатической стенке:

.

Энтальпия ПС на адиабатической стенке:

,

где  теплоёмкость продуктов сгорания.

Энтальпия ПС при температуре стенки :

.

Плотность ПС при температуре стенки :

.

Значение числа Рейнольдса и Прандтля у стенки:

,

,

где эквивалентный размер области; коэффициент динамической вязкости;  коэффициент теплопроводности.

Значение числа Стантона на идеальной стенке:

.

Значение числа Стантона для реальных условий:

,

где коэффициент, учитывающий вдув газа в результате разложения газа,; коэффициент, учитывающий шероховатость стенки, ;коэффициент, учитывающий влияние турбулентности пульсаций, ; коэффициент, учитывающий влияние конденсированных частиц ПС, .

Плотность конвективного теплового потока к стенке камеры сгорания:

,

,

где коэффициент теплоотдачи.

Далее рассчитывается значение плотности радиационного теплового потока.

Значение степени черноты стенки.

Для определения степени черноты продуктов сгорания используется методика, изложенная в [7]. Из результатов термодинамического расчета находятся мольные концентрации молекул воды  и углекислого газа . Парциальные давление указанных молекул рассчитываются с использованием значения молекулярной массы газообразных продуктов сгорания по зависимостям:

,

.

Далее, принимая характерный диаметр излучающего объема, равным характерному размеру зоны, определяем среднюю длину пути луча:

.

По номограмме находим интегральные излучательные способности трехатомных молекул и газообразных ПС в целом:

,

,

.

Будем считать, что плотность конденсированной фазы составляет .

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:



где .

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания:



Эффективная излучательная способность продуктов сгорания:

.

Плотность радиационного теплового потока:



где  постоянная Стефана-Больцмана, .

Скорость уноса массы материала ТЗП рассчитывается в предположении равенства начальной температуры ТЗП :

,

где  полная энтальпия ПС.

Примем, что максимально допустимая температура силовой оболочки выполненной, например, из органопластика, под материалом ТЗП равна . Тогда с учетом определенных выше значений необходимая толщина слоя абляционного ТЗП рассчитывается по формуле:

,

где  коэффициент температуропроводности покрытия.

Аналогичным образом рассчитывается потребные значения толщин ТЗП в других характерных зонах камеры сгорания РДТТ. При этом изменяются в расчете только характерная скорость течения газа и эквивалентный размер диаметра. Результаты расчета приведены в таблице Таблица 1.8 – Таблица 1.11.

Таблица 1.8 – Результаты расчета для цилиндрической части

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 0,0189 | 3906,33 | 3906,425 | 25362,0325 | 0,6422606 | 1,17055 | 1,15372 |
| 0,0189 | 3906,33 | 3906,425 | 25362,0325 | 0,6422606 | 1,17055 | 1,15372 |
| 0,0204 | 3906,35 | 3906,462 | 25362,2753 | 0,6936415 | 1,152667 | 1,13609 |
| 0,0227 | 3906,38 | 3906,524 | 25362,6744 | 0,7707128 | 1,128626 | 1,11239 |
| 0,0242 | 3906,41 | 3906,568 | 25362,9638 | 0,8220936 | 1,114147 | 1,09812 |
| 0,0265 | 3906,45 | 3906,64 | 25363,433 | 0,8991649 | 1,09435 | 1,07860 |
| 0,0280 | 3906,48 | 3906,692 | 25363,7691 | 0,9505458 | 1,082249 | 1,06667 |
| 0,0302 | 3906,53 | 3906,775 | 25364,3083 | 1,0276170 | 1,065498 | 1,05016 |
| 0,0318 | 3906,56 | 3906,834 | 25364,6911 | 1,0789979 | 1,055146 | 1,03995 |
| 0,0340 | 3906,62 | 3906,928 | 25365,3004 | 1,1560692 | 1,040678 | 1,02569 |
| 0,0355 | 3906,66 | 3906,994 | 25365,7299 | 1,2074500 | 1,03166 | 1,01680 |
| 0,0363 | 3906,68 | 3907,028 | 25365,9517 | 1,2331405 | 1,027322 | 1,01253 |
| 0,0378 | 3906,72 | 3907,099 | 25366,4092 | 1,2845213 | 1,018962 | 1,00429 |

Таблица 1.9 – Результаты расчета для цилиндрической части

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 0,9958 | 1,4003448 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,263536 | 2,3912438 |
| 0,99583 | 1,4003448 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,263536 | 3,3913696 |
| 1,0591 | 1,4892626 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,269677 | 4,3836526 |
| 1,1521 | 1,6202173 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,278722 | 5,4342314 |
| 1,2132 | 1,7060570 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,284651 | 6,5348997 |
| 1,3033 | 1,8328371 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,293408 | 7,7152468 |
| 1,3626 | 1,9161434 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,299162 | 8,9184475 |
| 1,4503 | 2,0394371 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,307678 | 10,221698 |
| 1,5081 | 2,1206003 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,313284 | 11,522892 |
| 1,5935 | 2,2409122 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,321594 | 12,943663 |
| 1,6499 | 2,3202244 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,327072 | 14,339195 |
| 1,6780 | 2,3596256 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,329793 | 15,678150 |
| 1,7337 | 2,4379392 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151479 | 0,335202 | 17,145222 |

Таблица 1.10 – Результаты расчета для заднего днища

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 0,0378 | 3906,72 | 3907,099 | 25366,4092 | 1,2845213 | 1,018962 | 1,00429 |
| 0,0473 | 3907,01 | 3907,604 | 25369,6923 | 1,4718474 | 0,99155 | 0,97726 |
| 0,0568 | 3907,37 | 3908,223 | 25373,7056 | 1,6056517 | 0,974391 | 0,96035 |
| 0,0662 | 3907,80 | 3908,953 | 25378,4496 | 1,6859342 | 0,964867 | 0,95096 |
| 0,0757 | 3908,29 | 3909,797 | 25383,9247 | 1,7126951 | 0,961761 | 0,94790 |
| 0,0851 | 3908,85 | 3910,753 | 25390,1315 | 1,6859342 | 0,964714 | 0,95081 |
| 0,0946 | 3909,47 | 3911,821 | 25397,0706 | 1,6056517 | 0,974082 | 0,96005 |
| 0,1041 | 3910,16 | 3913,003 | 25404,7427 | 1,4718474 | 0,991079 | 0,97680 |
| 0,1135 | 3910,91 | 3914,298 | 25413,1486 | 1,2845213 | 1,018317 | 1,00365 |
| 0,1230 | 3911,73 | 3915,706 | 25422,2891 | 1,0436736 | 1,061365 | 1,04609 |
| 0,1325 | 3912,62 | 3917,227 | 25432,1652 | 0,7493041 | 1,133934 | 1,11762 |
| 0,1419 | 3913,57 | 3918,862 | 25442,7778 | 0,4014129 | 1,284514 | 1,26607 |

Таблица 1.11 – Результаты расчета для заднего днища

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 1,73370731 | 2,4379392 | 0,45 | 0,274799 | 2,4151467 | 0,335202 | 18,224466 |
| 2,10882420 | 2,9654285 | 0,412 | 0,274119 | 2,4091728 | 0,371224 | 19,798430 |
| 2,48679033 | 3,4969245 | 0,375 | 0,273439 | 2,4031933 | 0,407521 | 21,417090 |
| 2,87289370 | 4,0398631 | 0,337 | 0,272758 | 2,3972082 | 0,444608 | 23,096477 |
| 3,27273765 | 4,6021236 | 0,3 | 0,272076 | 2,3912175 | 0,48303 | 24,857168 |
| 3,69313566 | 5,1932873 | 0,262 | 0,271394 | 2,3852212 | 0,523447 | 26,727188 |
| 4,14333821 | 5,8263621 | 0,225 | 0,270711 | 2,3792192 | 0,566759 | 28,747073 |
| 4,63720988 | 6,5208445 | 0,187 | 0,270027 | 2,3732117 | 0,614312 | 30,979683 |
| 5,19782860 | 7,3091865 | 0,15 | 0,269343 | 2,3671985 | 0,668347 | 33,531512 |
| 5,86905958 | 8,2530715 | 0,112 | 0,268658 | 2,3611797 | 0,733126 | 36,606792 |
| 6,75276198 | 9,4957338 | 0,075 | 0,267973 | 2,3551552 | 0,81854 | 40,681906 |
| 8,19608561 | 11,525335 | 0,037 | 0,267287 | 2,3491251 | 0,958308 | 47,384707 |

## Расчет и проектирование корпуса РДТТ

Корпус РДТТ – часть РДТТ, предназначенная для образования КС, размещения заряда твердого ракетного топлива, монтажа узлов и агрегатов, а также для соединения узла РДТТ с перемещающимся аппаратом.

Так как одной из особенностей РДТТ является то, что корпус двигателя одновременно является и корпусом, и «баком», и камерой сгорания, то к нему выдвигается ряд требований:

1. Должен выдерживать внутренние нагрузки, которые обусловлены рабочим процессом;
2. Корпус должен быть спроектирован так, чтобы в системе корпус – заряд возникало минимальное количество возмущений;
3. Конструкция должна быть оптимальной с точки зрения интеграции в состав подвижного аппарата;
4. Конструкция должна быть технологична;
5. Масса конструкции должна быть минимальной.

Основные задачи:

1. Выбор формы корпуса;
2. Выбор материалов;
3. Расчет толщины корпуса;
4. Выбор соединений и их расчет.

В настоящее время в РДТТ применяются в основном обечайки из трех типов материалов: металлические, из композиционных материалов и комбинированные. Широко используются композитные корпуса типа «кокон» (углепластиковые, органопластиковые и др.), изготавливаемые из волокна, пропитанного термостойким связующим, путем спирально-кольцевой намотки на оправку.

Корпус проектируемого РДТТ выполнен методом непрерывной намотки лентой органопластика на основе арамидных волокон, пропитанных эпоксидным связующим.

В качестве материала силовой оболочки принят композиционный материал – органопластик на основе армирующего материала – органоволокна марки «АРМОС» 600-А-К ТУ 6-12-172-91 и связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 3-4759-80. Основные характеристики приведены в таблице Таблица 1.12.

Таблица 1.12 – Основные характеристики материала силовой оболочки корпуса

|  |  |
| --- | --- |
| Прочность волокна, МПа | 2500 |
| Модуль упругости, ГПА | 97 |
| Плотность, | 1,350 |
| Содержание связующего, % | 25-30 |

### Расчет толщины силовой оболочки корпуса

Расчет проводится для начальных условий:

1. Максимальное давление в камере сгорания ;
2. Диаметры переднего и заднего полюсных отверстий , ;
3. Диаметр корпуса ;

Допустимое напряжение:

,

где коэффициент запаса прочности; предел прочности на разрыв в тангенциальном направлении.

Вычислим значения:

,

.

Допустимые напряжения при спиральной и кольцевой намотке :

,

.

Углы намотки волокон у переднего  и заднего  днищ:

,

.

Толщины обечаек спиральной намотки в месте соединения цилиндрической обечайки с передним  и задним  днищами:

,

.

Угол намотки волокон цилиндрической части оболочки:

.

Так как выполняется условие , то толщины спиральной и кольцевой намоток в центральной части обечайки:

,

.

Принимаем , , , .

Толщина центральной части цилиндрической обечайки:

.

Толщина обечайки в центральной части заднего днища:

.

Для безмоментной оболочки должно выполняется условие :

,

условие выполняется.

Текущая толщина спирального слоя на днищах:

,

,

где .

Таблица 1.13 ‒ Результаты расчета толщин переднего и заднего днищ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 40 | 0,078 | 3,581 | — |
| 85 | 0,166 | 2,457 | — |
| 130 | 0,253 | 1,986 | — |
| 180 | 0,351 | 1,688 | — |
| 245 | 0,478 | 1,447 | 7,650 |
| 300 | 0,585 | 1,308 | 3,926 |
| 340 | 0,663 | 1,228 | 3,168 |
| 390 | 0,760 | 1,147 | 2,643 |
| 440 | 0,858 | 1,080 | 2,315 |
| 480 | 0,936 | 1,034 | 2,126 |
| 512,9 | 1 | 1 | 2 |

### Расчет соединений корпусных деталей

Расчет болтового соединения заднего днища с сопловым блоком:

Внутренний диаметр резьбы:



где  коэффициент запаса прочности болта, ;  внутренний радиус уплотнения, ;  коэффициент запаса нераскрытия стыка, ;  коэффициент основной нагрузки, ;  предел прочности материала болтов, , число болтов, .

Берем болты М8 с наружным диаметром резьбы  и внутренним диаметром резьбы , материал – Сталь45.

Усилие за счет силы, раскрывающей соединение, действующее на один болт:

.

Усилие затяжки одного болта:

.

Нагрузка, действующая на болт:

.

Напряжения, возникающие в болте:

.

Действительный коэффициент запаса прочности болта:

.

## Расчет и проектирование соплового блока

Сопло – это часть РДТТ, образующая канал переменного сечения, в котором осуществляется преобразование тепловой энергии топлива в кинетическую энергию истекающей струи ПС, основным назначением которого является создание тяги.

На сопло воздействуют следующие нагрузки:

1. Тепловое воздействие
2. Скоростной напор
3. Механическое воздействие
4. Химическое взаимодействие ПС с конструкционными материалами
5. Эрозионное воздействие двухфазного потока на трансзвуковую часть сопла
6. Внешнее воздействие

С учетом основного предназначения сопла и особенностей нагрузок качество профилирования контура сопла определяет массово-габаритные и тягово-импульсные характеристики, как двигательной установки (ДУ), так и летательного аппарата (ЛА) в целом. Поэтому проектирование соплового блока является одним из основных вопросов, для решения которого необходимо выполнить ряд задач:

1. Выбор типа сопла, расчет геометрических размеров характерных сечений.
2. Определение необходимости регулирования тяги РДТТ.
3. Построение геометрического профиля сужающейся, трансзвуковой и расширяющейся частей сопла.
4. Определение потерь удельного импульса и расчет действительных характеристик РДТТ.
5. Конструкционная проработка соплового блока.
6. Учет влияния сопла на другие узлы и агрегаты.

Требования, предъявляемые к соплу РДТТ:

1. Сопловой блок должен выдерживать все факторы рабочего процесса: давление, температура, воздействие конденсированной фазы, воздействие космического излучения и др.
2. Сопловой блок должен удовлетворять эксплуатационным требованиям (удобство транспортировки, возможность управления вектором тяги и др.).
3. Сопловой блок должен обеспечивать минимальность осевых габаритов двигателя.
4. Сопловой блок должен быть технологичным в изготовлении.

### Профилирование сужающейся части сопла

В настоящее время в конструкциях РДТТ используются сопла, у которых сужающаяся и трансзвуковая части располагаются в районе камеры сгорания – так называемые утопленные сопла. Профилирование профиля утопленной части сопла может выполняться поверхностью, образованной вращением эллипса с полуосями  и  относительно оси сопла [7].

Причем:

.

Для уменьшения эрозии сопла входное сечение выполняется в соответствии с рекомендацией:

,

,

.

Тогда:

,

,

.

### Профилирование трансзвуковой части сопла

Неоптимальный профиль критического сечения сопла, как и неверный профиль сужающейся части, может привести к возникновению системы скачков уплотнения, которые снижают энергетические характеристики соплового блока в целом.

Минимальную длину обеспечивает сверхзвуковой профиль с угловой точкой, в котором сопряжение дозвукового и сверхзвукового участков сопла выполнено с изломом [7].

### Профилирование сверхзвуковой части сопла

Для профилирования сверхзвуковой части сопла можно использовать метод Рао (огибающих). Данный метод позволяет построить контур сверхзвуковой части сопла, близкий к контуру, получаемому при использовании точных методик, основанных на интегрировании дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих сверхзвуковое течение идеального газа [7].

Из внутрибаллистического расчета известны следующие геометрические характеристики:

,

.

Методика приближенного построения такого профиля включает в себя нахождение углов  и относительной длины расширяющейся части, а образующая описывается параболой общего вида, которая строится геометрическим методом по координатам двух точек и касательным в них.

Безразмерный диаметр выходного сечения сопла:



Принимаем 

Для рассчитанных  и выбранного угла  по таблице [9, кн. 1, с. 355…362] определяется относительная длина расширяющейся части сопла  и угол входа в сопло .

Длина профилированного участка:



### Особенности проектирования соплового блока

С целью достижения высоких качеств сопла выберем из всех известных типов сопловых блоков односопловую конструкцию с центральным расположением относительно оси корпуса, сопловой блок проектируем утопленным.

Коэффициент утопления сопла:

,

где  полная длина сопла,  глубина погружения (расстояние от входа в сопло до точки пересечения оси сопла с контуром заднего днища).

## Расчет тепловых потоков в сопле РДТТ

### Расчет конвективного теплового потока по длине сопла

Расчет тепловых потоков проводится по методике В.С. Авдуевского [6].

В качестве объекта расчета принимается проточная часть классического осесимметричного сопла Лаваля, имеющая текущие координаты  и  или их безразмерные значения ; , где радиус критического сечения.

Начало продольной координаты *x* обычно располагается в минимальном (критическом) сечении сопла. Расчет тепло-и массопереноса в пограничном слое течения ведется в продольной криволинейной координате  контура, которая определяется либо интегрированием, либо линейной интерполяцией по координатам . Поскольку вход в сопло не является «внезапным» и ему предшествует некоторая предыстория развития пограничного слоя, целесообразно условно отнести начало координаты *s* от сечения входа в сопло на некоторое расстояние вверх по потоку для избежания неестественных результатов решения для этой области.

Координаты точек контура заносятся в таблицу Таблица 1.14.

Таблица 1.14 – Построение координат контура сопла

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0 | 0 | 55,2 | 1,5 | 36,8 |
| 2 | 11,045 | 0,300 | 42,057 | 1,143 | 54,866 |
| 3 | 22,09 | 0,600 | 38,334 | 1,042 | 66,549 |
| 4 | 25,755 | 0,699 | 37,648 | 1,023 | 70,278 |
| 5 | 29,42 | 0,799 | 37,174 | 1,010 | 73,974 |
| 6 | 33,11 | 0,899 | 36,893 | 1,003 | 77,675 |
| 7 | 36,8 | 1 | 36,8 | 1 | 81,367 |
| 8 | 40,49 | 1,100 | 39,353 | 1,069 | 85,854 |
| 9 | 44,18 | 1,200 | 41,773 | 1,135 | 90,267 |
| 10 | 51,56 | 1,401 | 46,271 | 1,257 | 98,911 |
| 11 | 58,915 | 1,601 | 50,378 | 1,369 | 107,335 |
| 12 | 66,27 | 1,801 | 54,186 | 1,472 | 115,617 |
| 13 | 88,36 | 2,401 | 64,457 | 1,752 | 139,981 |
| 14 | 110,45 | 3,001 | 73,693 | 2,003 | 163,925 |
| 15 | 132,54 | 3,602 | 82,059 | 2,229 | 187,547 |
| 16 | 154,63 | 4,202 | 89,678 | 2,436 | 210,915 |
| 17 | 176,72 | 4,802 | 96,722 | 2,628 | 234,101 |
| 18 | 198,81 | 5,402 | 103,303 | 2,807 | 257,151 |
| 19 | 220,9 | 6,002 | 109,483 | 2,975 | 280,09 |
| 20 | 242,99 | 6,603 | 115,312 | 3,133 | 302,936 |
| 21 | 265,08 | 7,203 | 120,83 | 3,283 | 325,705 |
| 22 | 287,17 | 7,804 | 126,076 | 3,426 | 348,409 |
| 23 | 309,26 | 8,404 | 131,081 | 3,561 | 371,06 |
| 24 | 331,35 | 9,004 | 135,876 | 3,692 | 393,664 |
| 25 | 353,44 | 9,604 | 140,487 | 3,818 | 416,23 |
| 26 | 375,53 | 10,204 | 144,914 | 3,938 | 438,759 |
| 27 | 397,62 | 10,804 | 149,149 | 4,053 | 461,252 |
| 28 | 419,71 | 11,405 | 153,181 | 4,163 | 483,707 |
| 29 | 441,8 | 12,005 | 157 | 4,266 | 506,125 |

Теплофизические свойства ПС получены из термодинамического расчета состояния с помощью ПК «TERRA» (Приложение В).

Газодинамическая функция расходонапряженности  характеризует собой текущую относительную плотность потока при постоянстве расхода в сопле  и определяется зависимостью:

.

По значениям ГДФ  в текущих сечениях по этой формуле определяется приведенная скорость .

По текущим значениям  определяется ГДФ давления , температуры  и плотности  в соответствующих сечениях:



,



Далее по текущим значениям ГДФ определяются текущие значения давления, температуры и плотности.

,

,

.

Скорость течения ПС рассчитывается по формуле:

,

где  скорость ПС в критическом сечении.

Число Маха определяется по формуле:



где местная скорость звука, .

Промежуточные результаты расчета заносятся в таблицу Таблица 1.15.

Таблица 1.15 – Результаты термогазодинамического расчета

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0 | 2,25 | 0,444 | 0,286 | 0,274 | 3878,88 | 4,7819 | 3,27803 | 1315,80 | 361,293 |
| 2 | 11,045 | 1,306 | 0,7656 | 0,544 | 0,527 | 3807,21 | 4,2477 | 2,96663 | 1303,59 | 687,717 |
| 3 | 22,09 | 1,0851 | 0,9215 | 0,736 | 0,721 | 3725,07 | 3,6981 | 2,63974 | 1289,45 | 930,295 |
| 4 | 25,755 | 1,0466 | 0,9554 | 0,801 | 0,788 | 3692,00 | 3,4945 | 2,51672 | 1283,71 | 1011,65 |
| 5 | 29,42 | 1,0204 | 0,9799 | 0,866 | 0,856 | 3655,80 | 3,2824 | 2,3874 | 1277,40 | 1093,81 |
| 6 | 33,11 | 1,0050 | 0,9949 | 0,932 | 0,926 | 3615,96 | 3,0617 | 2,25143 | 1270,43 | 1177,61 |
| 7 | 36,8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3572,47 | 2,8352 | 2,11024 | 1262,76 | 1262,76 |
| 8 | 40,49 | 1,1435 | 0,8744 | 1,358 | 1,415 | 3290,13 | 1,6805 | 1,35816 | 1211,84 | 1715,70 |
| 9 | 44,18 | 1,2885 | 0,7760 | 1,494 | 1,588 | 3160,81 | 1,3026 | 1,09581 | 1187,78 | 1887,21 |
| 10 | 51,56 | 1,5809 | 0,6325 | 1,664 | 1,821 | 2981,72 | 0,8993 | 0,80196 | 1153,64 | 2101,73 |
| 11 | 58,915 | 1,8741 | 0,5335 | 1,775 | 1,987 | 2853,68 | 0,6804 | 0,63405 | 1128,60 | 2242,56 |
| 12 | 66,27 | 2,1680 | 0,4612 | 1,858 | 2,116 | 2753,55 | 0,5423 | 0,52371 | 1108,62 | 2346,81 |
| 13 | 88,36 | 3,067 | 0,3259 | 2,023 | 2,399 | 2539,97 | 0,3247 | 0,33995 | 1064,76 | 2555,00 |
| 14 | 110,45 | 4,0101 | 0,2493 | 2,129 | 2,601 | 2393,07 | 0,2224 | 0,24713 | 1033,51 | 2688,85 |
| 15 | 132,54 | 4,9722 | 0,2011 | 2,204 | 2,757 | 2283,91 | 0,1653 | 0,19248 | 1009,66 | 2784,15 |
| 16 | 154,63 | 5,9384 | 0,1683 | 2,261 | 2,883 | 2198,86 | 0,1299 | 0,15710 | 990,689 | 2856,20 |
| 17 | 176,72 | 6,9080 | 0,1447 | 2,307 | 2,988 | 2129,69 | 0,1060 | 0,13239 | 974,982 | 2913,49 |
| 18 | 198,81 | 7,8800 | 0,1269 | 2,344 | 3,078 | 2071,72 | 0,0889 | 0,11421 | 961,621 | 2960,64 |
| 19 | 220,9 | 8,8511 | 0,1129 | 2,376 | 3,158 | 2022,19 | 0,0763 | 0,10034 | 950,056 | 3000,34 |
| 20 | 242,99 | 9,8186 | 0,1018 | 2,402 | 3,228 | 1979,19 | 0,0665 | 0,08944 | 939,902 | 3034,39 |
| 21 | 265,08 | 10,780 | 0,0927 | 2,426 | 3,291 | 1941,40 | 0,0589 | 0,08067 | 930,885 | 3064,00 |
| 22 | 287,17 | 11,737 | 0,0851 | 2,447 | 3,348 | 1907,79 | 0,0527 | 0,07347 | 922,791 | 3090,09 |
| 23 | 309,26 | 12,687 | 0,0788 | 2,465 | 3,400 | 1877,60 | 0,0476 | 0,06746 | 915,463 | 3113,34 |
| 24 | 331,35 | 13,632 | 0,0733 | 2,482 | 3,448 | 1850,25 | 0,0433 | 0,06236 | 908,77 | 3134,26 |
| 25 | 353,44 | 14,573 | 0,0686 | 2,497 | 3,49 | 1825,26 | 0,0398 | 0,05798 | 902,612 | 3153,25 |
| 26 | 375,53 | 15,506 | 0,0644 | 2,510 | 3,534 | 1802,38 | 0,0367 | 0,0542 | 896,936 | 3170,54 |
| 27 | 397,62 | 16,426 | 0,0608 | 2,523 | 3,573 | 1781,43 | 0,0341 | 0,05091 | 891,710 | 3186,29 |
| 28 | 419,71 | 17,326 | 0,0577 | 2,534 | 3,608 | 1762,29 | 0,0318 | 0,04805 | 886,905 | 3200,61 |
| 29 | 441,8 | 18,201 | 0,0549 | 2,544 | 3,641 | 1744,82 | 0,0298 | 0,04555 | 882,5 | 3213,62 |

При решении тепловых задач используются два подхода: полуэмпирическое решение по дифференциальным уравнениям пограничного слоя в интегральных параметрах и решение по феноменологическим моделям, полученным эмпирическим или полуэмпирическим путем и представляемых алгебраическими формулами в обобщенных переменных (критериальными формулами).

Чаще всего в расчетах РДТТ применяется модель В.С. Авдуевского, полученная для плоской непроницаемой пластины или цилиндра:



,

,

,

,

,

,

,



где  число Стантона (безразмерный коэффициент теплоотдачи);  число Рейнольдса;  число Прандтля;  функциональная поправка на переменность свойств потока по толщине пограничного слоя;  функциональная поправка на сжимаемость потока;  коэффициент восстановления температуры на адиабатической стенке;  энтальпия восстановления на адиабатической стенке;  температура восстановления на адиабатической стенке.

Подстрочный индекс  указывает на то, что данная величина определяется по температуре газа на стенке, индекс  – что величина определяется по температуре адиабатической стенки.

Плотность ПС в расчетных сечениях при  определяется с помощью уравнения состояния в допущении постоянства по сечению давления и газовой постоянной:

.

Остальные свойства газового потока при температуре  берутся из таблицы свойств продуктов сгорания путем аппроксимации.

Неизвестная априори температура стенки на границе контакта с рабочим телом принимается исходя из практики применяемых материалов теплозащиты, и может быть условно оценена величиной температурного фактора:



Действительная температура стенки может быть найдена только из решения задачи теплопроводности в сопряженной области – стенке.

Значение коэффициента восстановления можно оценить по следующей рекомендации для турбулентного потока:

.

Значение числа Стантона для реальных условий:

.

Коэффициент теплоотдачи  определяется по значению числа Стантона:



Плотность конвективного теплового потока:

.

Результаты заносятся в таблицу Таблица 1.16 и

Таблица 1.17.

Таблица 1.16 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0 | 36,8 | 0,304 | 0,6725 | 3897,255 | 6474,3 | 25232,2 | 3312,66 | 3495,9 | 11580,97 |
| 2 | 11,045 | 54,866 | 0,299 | 0,6686 | 3873,398 | 6273,0 | 24297,8 | 3292,38 | 3425,0 | 11276,59 |
| 3 | 22,09 | 66,549 | 0,298 | 0,6679 | 3846,052 | 6052,0 | 23276,6 | 3269,14 | 3345,2 | 10936,05 |
| 4 | 25,755 | 70,278 | 0,299 | 0,6688 | 3835,271 | 5968,3 | 22890,2 | 3259,98 | 3314,1 | 10804,2 |
| 5 | 29,42 | 73,974 | 0,301 | 0,6705 | 3823,704 | 5880,8 | 22486,7 | 3250,14 | 3281,1 | 10664,25 |
| 6 | 33,11 | 77,675 | 0,305 | 0,6730 | 3811,314 | 5790,0 | 22067,7 | 3239,61 | 3246,0 | 10516,06 |
| 7 | 36,8 | 81,367 | 0,309 | 0,6764 | 3798,221 | 5697,5 | 21640,6 | 3228,48 | 3209,3 | 10361,38 |
| 8 | 40,49 | 85,854 | 0,353 | 0,7068 | 3725,611 | 5246,7 | 19547,3 | 3166,77 | 3012,1 | 9538,796 |
| 9 | 44,18 | 90,267 | 0,381 | 0,7248 | 3701,106 | 5114,3 | 18928,8 | 3145,94 | 2948,2 | 9274,996 |
| 10 | 51,56 | 98,911 | 0,432 | 0,7562 | 3680,833 | 5010,7 | 18443,6 | 3128,70 | 2896,4 | 9062,298 |
| 11 | 58,915 | 107,33 | 0,468 | 0,7762 | 3670,712 | 4960,7 | 18209,3 | 3120,10 | 2871,0 | 8958,046 |
| 12 | 66,27 | 115,61 | 0,496 | 0,7913 | 3665,663 | 4936,1 | 18094,2 | 3115,81 | 2858,4 | 8906,522 |
| 13 | 88,36 | 139,98 | 0,560 | 0,8242 | 3666,131 | 4938,4 | 18104,8 | 3116,21 | 2859,6 | 8911,287 |
| 14 | 110,45 | 163,92 | 0,588 | 0,8376 | 3660,502 | 4911,2 | 17977,7 | 3111,42 | 2845,7 | 8854,194 |
| 15 | 132,54 | 187,54 | 0,589 | 0,8381 | 3643,566 | 4831,3 | 17603,2 | 3097,03 | 2804,2 | 8684,91 |
| 16 | 154,63 | 210,91 | 0,583 | 0,8356 | 3625,647 | 4749,0 | 17218,3 | 3081,8 | 2761,3 | 8509,916 |
| 17 | 176,72 | 234,10 | 0,579 | 0,8339 | 3611,187 | 4684,0 | 16914,8 | 3069,50 | 2727,4 | 8371,834 |
| 18 | 198,81 | 257,15 | 0,577 | 0,8327 | 3599,474 | 4632,0 | 16672,8 | 3059,55 | 2700,4 | 8262,073 |
| 19 | 220,9 | 280,09 | 0,575 | 0,8319 | 3589,625 | 4588,6 | 16471,6 | 3051,18 | 2678,0 | 8171,248 |
| 20 | 242,99 | 302,93 | 0,574 | 0,8313 | 3581,134 | 4551,5 | 16299,8 | 3043,96 | 2659,0 | 8094,027 |
| 21 | 265,08 | 325,70 | 0,573 | 0,8307 | 3573,719 | 4519,3 | 16150,9 | 3037,66 | 2642,6 | 8027,417 |
| 22 | 287,17 | 348,41 | 0,572 | 0,8303 | 3567,196 | 4491,1 | 16020,9 | 3032,11 | 2628,3 | 7969,472 |
| 23 | 309,26 | 371,06 | 0,571 | 0,8300 | 3561,425 | 4466,3 | 15906,6 | 3027,21 | 2615,8 | 7918,706 |
| 24 | 331,35 | 393,66 | 0,571 | 0,8298 | 3556,287 | 4444,3 | 15805,4 | 3022,84 | 2604,8 | 7873,906 |
| 25 | 353,44 | 416,23 | 0,571 | 0,8296 | 3551,686 | 4424,7 | 15715,2 | 3018,93 | 2594,9 | 7834,116 |
| 26 | 375,53 | 438,76 | 0,570 | 0,8295 | 3547,566 | 4407,2 | 15634,8 | 3015,43 | 2586,2 | 7798,744 |
| 27 | 397,62 | 461,25 | 0,570 | 0,8294 | 3543,878 | 4391,5 | 15563,2 | 3012,29 | 2578,5 | 7767,297 |
| 28 | 419,71 | 483,71 | 0,570 | 0,8294 | 3540,563 | 4377,5 | 15499,0 | 3009,47 | 2571,6 | 7739,19 |
| 29 | 441,8 | 506,13 | 0,570 | 0,8294 | 3537,564 | 4364,9 | 15441,1 | 3006,92 | 2565,3 | 7713,903 |

Таблица 1.17 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0,933666 | 3,8383 | 0,546585 | 0,349 | 0,7380 | 1,0005 | 0,7384 | 3,1764 | 15,3998 | 9,00258 |
| 2 | 0,929796 | 3,4305 | 1,392151 | 0,352 | 0,7412 | 1,0018 | 0,7426 | 2,6332 | 21,2775 | 12,36246 |
| 3 | 0,925337 | 3,0078 | 2,012449 | 0,357 | 0,7448 | 1,0035 | 0,7474 | 2,4437 | 22,8751 | 13,19686 |
| 4 | 0,923574 | 2,8502 | 2,194131 | 0,358 | 0,7461 | 1,0041 | 0,7493 | 2,4006 | 22,9415 | 13,19803 |
| 5 | 0,92168 | 2,6854 | 2,357496 | 0,360 | 0,7475 | 1,0049 | 0,7512 | 2,3649 | 22,7928 | 13,07294 |
| 6 | 0,919649 | 2,5129 | 2,499498 | 0,362 | 0,7489 | 1,0058 | 0,7533 | 2,3355 | 22,4360 | 12,82661 |
| 7 | 0,917501 | 2,3350 | 2,614973 | 0,365 | 0,7503 | 1,0067 | 0,7554 | 2,3122 | 21,8816 | 12,46673 |
| 8 | 0,905588 | 1,4110 | 2,29521 | 0,379 | 0,7559 | 1,0137 | 0,7663 | 2,3536 | 17,1639 | 9,591904 |
| 9 | 0,901567 | 1,1009 | 2,080362 | 0,384 | 0,7571 | 1,0175 | 0,7703 | 2,3931 | 14,6602 | 8,138852 |
| 10 | 0,898235 | 0,7642 | 1,768847 | 0,389 | 0,7579 | 1,0234 | 0,7757 | 2,4715 | 11,4995 | 6,349205 |
| 11 | 0,89657 | 0,5799 | 1,556905 | 0,391 | 0,7583 | 1,0280 | 0,7796 | 2,5390 | 9,48012 | 5,219821 |
| 12 | 0,895739 | 0,4628 | 1,401972 | 0,392 | 0,7584 | 1,0319 | 0,7827 | 2,5984 | 8,06782 | 4,43609 |
| 13 | 0,895816 | 0,2770 | 1,106276 | 0,392 | 0,7584 | 1,0411 | 0,7897 | 2,7493 | 5,56614 | 3,060934 |
| 14 | 0,894888 | 0,1900 | 0,936205 | 0,393 | 0,7586 | 1,0478 | 0,7949 | 2,8557 | 4,15344 | 2,280553 |
| 15 | 0,892093 | 0,1419 | 0,830869 | 0,398 | 0,7591 | 1,0527 | 0,7991 | 2,9222 | 3,23869 | 1,770058 |
| 16 | 0,889129 | 0,1120 | 0,759479 | 0,402 | 0,7596 | 1,0565 | 0,8026 | 2,9684 | 2,62432 | 1,427233 |
| 17 | 0,886729 | 0,0918 | 0,706578 | 0,406 | 0,7601 | 1,0598 | 0,8055 | 3,0063 | 2,19451 | 1,188718 |
| 18 | 0,88478 | 0,0773 | 0,665506 | 0,409 | 0,7604 | 1,0626 | 0,8081 | 3,0388 | 1,87905 | 1,014543 |
| 19 | 0,883137 | 0,0665 | 0,632821 | 0,411 | 0,7607 | 1,0651 | 0,8103 | 3,0668 | 1,63881 | 0,882408 |
| 20 | 0,881718 | 0,0581 | 0,606279 | 0,413 | 0,7610 | 1,0674 | 0,8123 | 3,0911 | 1,45044 | 0,779136 |
| 21 | 0,880476 | 0,0515 | 0,584365 | 0,415 | 0,7613 | 1,0694 | 0,8142 | 3,1124 | 1,29931 | 0,696508 |
| 22 | 0,879381 | 0,0462 | 0,565956 | 0,417 | 0,7616 | 1,0712 | 0,8158 | 3,1312 | 1,17563 | 0,629058 |
| 23 | 0,878411 | 0,0418 | 0,550275 | 0,418 | 0,7618 | 1,0729 | 0,8174 | 3,1480 | 1,07273 | 0,573069 |
| 24 | 0,877546 | 0,0381 | 0,536706 | 0,420 | 0,7620 | 1,0745 | 0,8188 | 3,1633 | 0,98582 | 0,525882 |
| 25 | 0,87677 | 0,0350 | 0,524805 | 0,421 | 0,7622 | 1,0759 | 0,8201 | 3,1773 | 0,91147 | 0,485592 |
| 26 | 0,876075 | 0,0323 | 0,514414 | 0,422 | 0,7624 | 1,0773 | 0,8213 | 3,1899 | 0,84741 | 0,450936 |
| 27 | 0,875452 | 0,0301 | 0,505462 | 0,423 | 0,7625 | 1,0785 | 0,8225 | 3,2013 | 0,79193 | 0,420978 |
| 28 | 0,874891 | 0,0281 | 0,497916 | 0,424 | 0,7627 | 1,0797 | 0,8235 | 3,2112 | 0,74371 | 0,394977 |
| 29 | 0,874383 | 0,0264 | 0,491741 | 0,424 | 0,7628 | 1,0808 | 0,8245 | 3,2196 | 0,70167 | 0,372332 |

### Расчет радиационного теплового потока по длине сопла

Радиационный тепловой поток к поверхности сопла РДТТ складывается из излучения трехатомных газов и конденсированных частиц, находящихся в продуктах сгорания твердого топлива.

Плотность радиационного теплового потока:



где  – эффективная излучательная способность продуктов сгорания, состоящих из конденсированной и газовой фаз;  – эффективная степень черноты стенки.

Излучательная способность молекул  и  рассчитывается по формулам:

,

.

Тогда излучательная способность смеси газов  и  определяется как:

.

Принимая характерный диаметр излучающего объема, равным характерному размеру зоны, определяем среднюю длину пути луча:

.

Будем считать, что плотность конденсированной фазы составляет .

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:



Эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания:

.

Эффективная излучательная способность продуктов сгорания:

.

Суммарный тепловой поток по длине сопла:

.

Результаты представлены в таблице Таблица 1.18.

Таблица 1.18 – Конвективный, радиационный и суммарный тепловые потоки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 9,00258 | 0,541512 | 9,544091 |
| 12,36246 | 0,404894 | 12,76736 |
| 13,19686 | 0,323089 | 13,51995 |
| 13,19803 | 0,296482 | 13,49451 |
| 13,07294 | 0,269681 | 13,34262 |
| 12,82661 | 0,242291 | 13,0689 |
| 12,46673 | 0,214336 | 12,68106 |
| 9,591904 | 0,063808 | 9,655711 |
| 8,138852 | 0,007105 | 8,145958 |
| 6,349205 | -0,06324 | 6,285961 |
| 5,219821 | -0,10674 | 5,113084 |
| 4,43609 | -0,13773 | 4,298365 |
| 3,060934 | -0,1991 | 2,861836 |
| 2,280553 | -0,23448 | 2,046068 |
| 1,770058 | -0,25472 | 1,515341 |
| 1,427233 | -0,2685 | 1,158728 |
| 1,188718 | -0,27996 | 0,908762 |
| 1,014543 | -0,29 | 0,72454 |
| 0,882408 | -0,29896 | 0,583446 |
| 0,779136 | -0,30706 | 0,472076 |
| 0,696508 | -0,31447 | 0,382033 |
| 0,629058 | -0,32135 | 0,307707 |
| 0,573069 | -0,32779 | 0,245277 |
| 0,525882 | -0,33388 | 0,192006 |
| 0,485592 | -0,33967 | 0,145926 |
| 0,450936 | -0,34518 | 0,105758 |
| 0,420978 | -0,35042 | 0,070558 |
| 0,394977 | -0,35537 | 0,039602 |
| 0,372332 | -0,36003 | 0,012303 |

## Расчет потерь удельного импульса

Потери удельного импульса можно разделить на ряд составляющих:

,

где потери удельного импульса из-за рассеяния потока; потери удельного импульса из-за трения потока; потери из-за наличия в ПС конденсированной фазы; потери из-за утопленности сопла; потери из-за химической неравновесности.

Потери удельного импульса из-за рассеяния потока:



где .

Потери удельного импульса из-за трения потока:



где  температурный фактор; шероховатость внутренней стенки сопла.

Потери из-за наличия в ПС конденсированной фазы:

,

,

,

,

.

где коэффициент, учитывающий абсолютное значение давления в камере сгорания РДТТ и обусловливающий снижение потерь при увеличении давления торможения вследствие ускорения процессов скоростной релаксации потока;  коэффициент, учитывающий влияние геометрической степени расширения сопла РДТТ, обусловливающего уменьшение двухфазных потерь за счет снижения градиента скорости потока по длине сопла.

Потери из-за утопленности сопла:

.

Потери из-за химической неравновесности:

.

Коэффициент потерь :



## Расчет воспламенительного устройства

Основным назначением системы воспламенения является зажигание топливного заряда РДТТ за заданное время по определенному закону и при выполнении совокупности дополнительных требований:

1. Обеспечение заданной скорости нарастания давления в КС при выходе на режим.
2. Отсутствие забросов давления при воспламенении заряда за установленный предел.
3. Надежность, приемлемость массово-габаритных характеристик, эксплуатационные требования.

Основными задачами при проектировании системы воспламенения являются:

1. Выбор способа воспламенения.
2. Выбор конструктивной схемы системы воспламенения, её пространственного размещения в камере сгорания.
3. Выбор марки воспламенительного состава.
4. Определение массовых, геометрических параметров системы воспламенения.

Так как в космических условиях требуется большее время для воспламенения топлива, то в качестве воспламенителя используем РДТТ малой тяги.

### Расчет заряда основного воспламенителя

Время работы воспламенителя для некосмического РДТТ:

.

Время работы воспламенителя для РДТТ, запускаемого в космосе:

.

Для воспламенения используем пиротехнический состав Б – 20СН, так как у него большая температура продуктов сгорания и большее количество конденсированной фазы в продуктах сгорания.

Удельные теплоемкости:

,

.

Коэффициент теплопроводности:

.

Коэффициент динамической вязкости:

.

Полная энтальпия:

.

Относительная массовая концентрация конденсированной фазы:

.

Газовая постоянная продуктов сгорания воспламенителя:

.

Температура продуктов сгорания воспламенителя:

.

Давление, которое должен обеспечить воспламенитель:

.

Плотность продуктов сгорания воспламенителя:

.

Свободный объем в камере:

.

Масса воспламенителя:

.

Масса воспламенителя в расчете на 1 м2 поверхности горения:

.

Принимаем массу воспламенителя:

.

Массовый расход воспламенителя:

.

Минимальное давление в критическом сечении сопла воспламенителя:

.

Минимальное давление в камере воспламенителя:

,

где  показатель адиабаты продуктов сгорания воспламенителя.

Принимаем давление в камере воспламенителя:

.

Скорость горения воспламенителя:

,

где  единичная скорость горения; показатель в законе горения.

Свод горения воспламенителя:

.

Плотность воспламенителя:

.

Площадь горения воспламенителя:

.

Берем воспламенитель в виде вкладного одноканального заряда с забронированными торцами.

Диаметр внутреннего канала заряда:

.

Наружный диаметр заряда:

.

Длина заряда:

.

Критерий Победоносцева для внутреннего канала:

.

Внутренний диаметр камеры:

.

Критерий Победоносцева для наружного канала:

.

Температура в камере:

.

Комплекс :

.

Площадь критического сечения:

.

где коэффициент расхода отверстия.

Количество отверстий в воспламенителе:

.

Диаметр одного отверстия:



Принимаем .

### Расчет толщины бронирующего покрытия основного воспламенителя

Для бронирующего покрытия АЦ–2:

Удельные теплоемкости:

.

Коэффициент теплопроводности:

.

Плотность:

.

Температуры:

,

.

Толщина бронирующего покрытия основного воспламенителя:



### Расчет толщины теплозащитного покрытия

Плотность материала покрытия:

.

Удельная теплоемкость покрытия:

.

Температура пиролиза ТЗП:

.

Полная энтальпия материала покрытия:

.

Массовое содержание связующего:

.

Удельная теплота абляции материала:

.

Коэффициент температуропроводности ТЗП:

.

Число Прандтля:

.

Температура восстановления газа на адиабатической стенке:

.

Энтальпия восстановления газа на адиабатической стенке:

Температура стенки:

.

Примем:

.

Плотность потока при температуре стенки:

.

Скорость:

.

Характерный размер:

.

Число Рейнольдса при температуре стенки:

.

Число Стантона:

.

Плотность конвективного теплового потока к стенке:

.

Конвективный тепловой поток:

.

Примем радиационный тепловой поток:

.

Суммарный тепловой поток:

.

Скорость выгорания ТЗП:

,

.

Толщина ТЗП:



Принимаем .

### Расчет толщины стенки корпуса воспламенителя

Корпус выполнен из стали:

,

.

Наружный диаметр корпуса:

.

Толщина стенки корпуса:

.

Принимаем .

### Расчет предвоспламенителя

Предвоспламенитель выполнен из дымного ружейного пороха (ДРП).

Относительная массовая концентрация к-фазы:

.

Газовая постоянная продуктов сгорания предвоспламенителя:

.

Температура продуктов сгорания предвоспламенителя:

.

Давление, которое должен обеспечить предвоспламенитель:

.

Плотность продуктов сгорания предвоспламенителя:

.

Свободный объем в воспламенителе:

.

Масса предвоспламенителя:

.

Принимаем .

Насыпная плотность предвоспламенителя:

.

Объем предвоспламенителя:



Выбираем пленочный насыпной предвоспламенитель бескаркасного типа.

## Расчет и проектирование сопловой заглушки

Для создания в камере сгорания давления, необходимого для воспламенения основного заряда, используют сопловые заглушки.

Важным контролируемым параметром для сопловых заглушек является давление вылета.

По известным значениям давления вылета и диаметра, на котором установлена заглушка, можно определить усилие, которое действует на плоскость заглушки при вылете:

,

.

Площадь поверхности заглушки, на которую действует усилие:

.

Сила, действующая на заглушку со стороны камеры при вылете:

.

Потребная сила, необходимая для удержания заглушки:

.

Для крепления заглушки к стенке сопла будем использовать карбонильный клей, допускаемое значение на срез которого равно .

Величина боковой поверхности заглушки:

.

Ширина боковой стенки заглушки:

.

# Исследовательская часть

## Введение

Торцевой заряд твердого топлива, несмотря на ряд преимуществ, таких как простота расчета баллистических характеристик, высокая технологичность, высокий коэффициент заполнения камеры сгорания [1] имеет главный недостаток, ограничивающий его использование в маршевых двигателях – малая величина площади поверхности горения при значительной толщине свода. В качестве решения данной проблемы в статье [Заряд РДТТ с торцевой конической поверхностью горения] приведена следующая концепция заряда: по оси расположен заряд вспомогательного топлива («ведущий») пренебрежимо малого диаметра, что позволяет торцевой поверхности основного заряда («ведомый») при выгорании глухой вершины конуса не разгораться по сферической поверхности.

Параметры горения топлив «ведущего» и «ведомого» зарядов определяют массово-габаритные характеристики изделия, влияют на поведение двигателя (конечный импульс) после выгорания «ведущего» заряда ввиду наличия дегрессивно догорающих остатков [2]. Таким образом, поиск подходящей пары топлив для «ведущего» и «ведомого» зарядов является важной задачей оптимизации при проектировании РДТТ.



## Массоприход с поверхности горения

Массоприход с поверхности заряда твердого топлива определяется по следующим зависимостям [3]:

,

где  плотность топлива,  единичная скорость горения,  показатель в законе горения,  давление в камере сгорания,  площадь горения.

Тогда массоприход с поверхности горения для рассматриваемой конфигурации:

,

где индекс 1 используется для топлива «ведомого» заряда, индекс 2 используется для «ведущего» заряда.

Угол наклона конуса горящей поверхности «ведущего» определяется следующей зависимостью:

.

Тогда площадь горения «ведомого»:

,

где внешний диаметр «ведомого», внутренний диаметр «ведомого».

Получаем итоговую зависимость:

.

## Влияние свойств топлив на РДТТ

Характеристики топлив искомой пары напрямую влияют на количество дегрессивно выгорающих остатков, количество которых определяет конечный импульс РДТТ.

Одним из косвенных параметров, который зависит от соотношения скоростей горения топлив является угол наклона свода «ведомого» заряда . Угол определяет количество несгоревших остатков. Помимо вышеупомянутого фактора угол определяет момент, в который начнется дегрессивное горение.

Зависимость относительного расхода от соотношения скоростей горения топлив при :



На рисунке Рисунок 2.1 представлен график влияния соотношения скоростей на угол наклона конуса и относительный расход основного топлива.

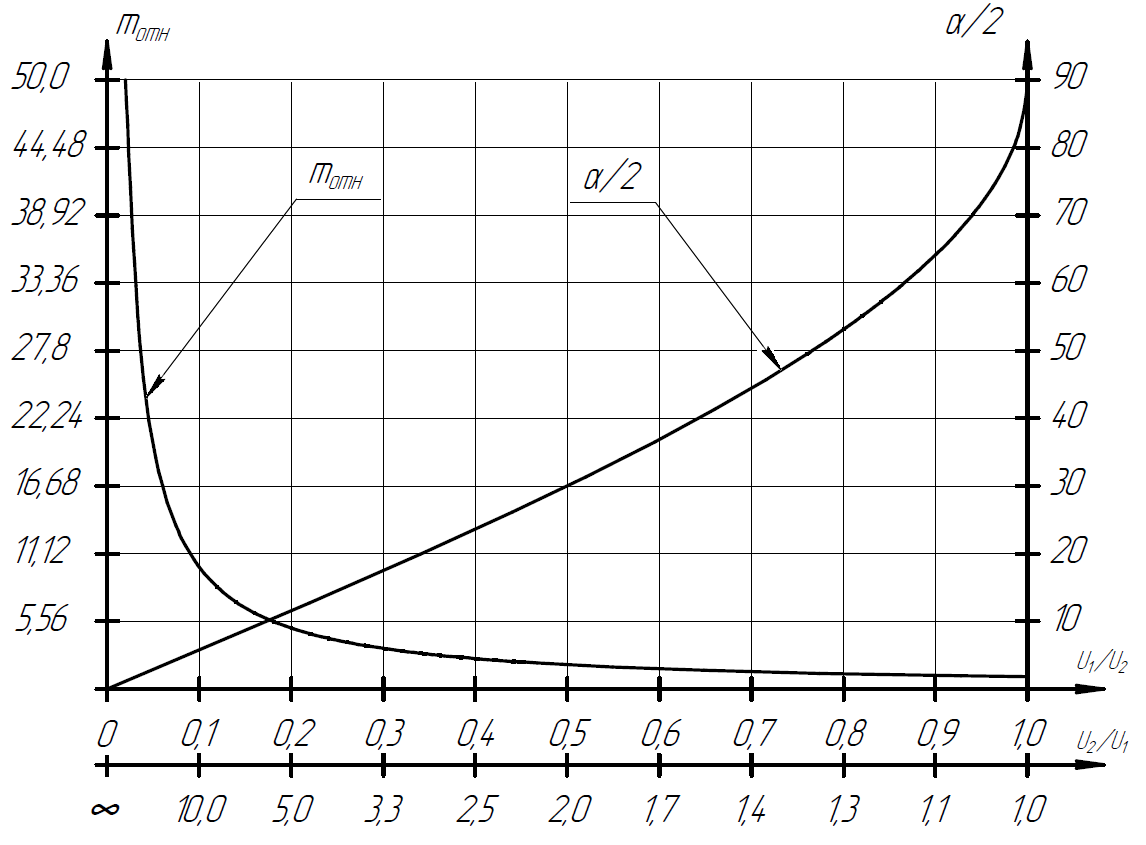


Рисунок 2.1 – Влияние соотношения скоростей на угол наклона конуса и относительный расход основного топлива

Параметр  может быть определен по следующей формуле:

,

где

,

,

.

На рисунке Рисунок 2.2 представлен график влияния соотношения диаметров и термодинамики топлив на общую термодинамику двигателя.

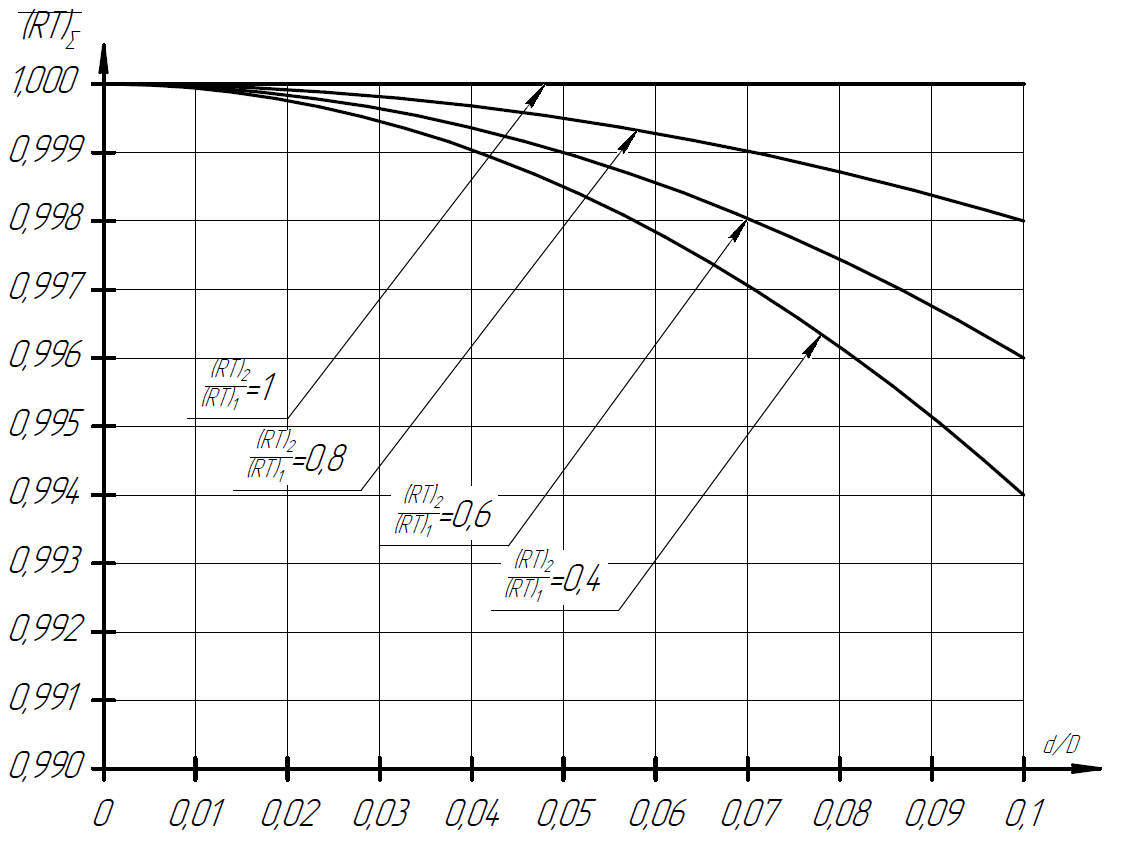


Рисунок 2.2 – Влияние соотношения диаметров и термодинамики топлив на общую термодинамику двигателя

График влияния параметров закона горения на относительный расход в широком диапазоне давления  представлен на графическом листе №…

Относительного расхода при :



Принимаем:

,

.

Итоговая зависимость относительного расхода от параметров закона горения при :

.

# Технологическая часть

## Введение

В данной части дипломного проекта рассматривается технологический процесс изготовления заряда из смесевого твердого ракетного топлива, прочно скрепленного с корпусом РДТТ.

Смесевые твердые топлива являются ярко выраженными гетерогенными, многофазными взрывчатыми системами, представляющими собой смесь, как правило, неорганического окислителя, органического высокомолекулярного горючего-связующего и содержащие специальные добавки (энергетические, эксплуатационные, технологические). По своей структуре СТРТ – высоконаполненные (до 95%) композиционные материалы, в полимерной матрице которых равномерно распределены мелкодисперсные окислитель, металлическое (металлосодержащее) горючее и другие компоненты.



## Схема технологического процесса изготовления заряда

В конструкторской части дипломного проекта была выбрана следующая конфигурация заряда: по оси расположен заряд вспомогательного топлива («ведущий») пренебрежимо малого диаметра, что позволяет торцевой поверхности основного заряда («ведомый») при выгорании глухой вершины конуса не разгораться по сферической поверхности.

Для «ведущего» заряда выбрано топливо марки ПХН – 2М, для «ведомого» выбрано топливо марки ПХА – 4М.

Характеристики комбинации представлены в таблице Таблица 3.1 и таблице Таблица 3.2.

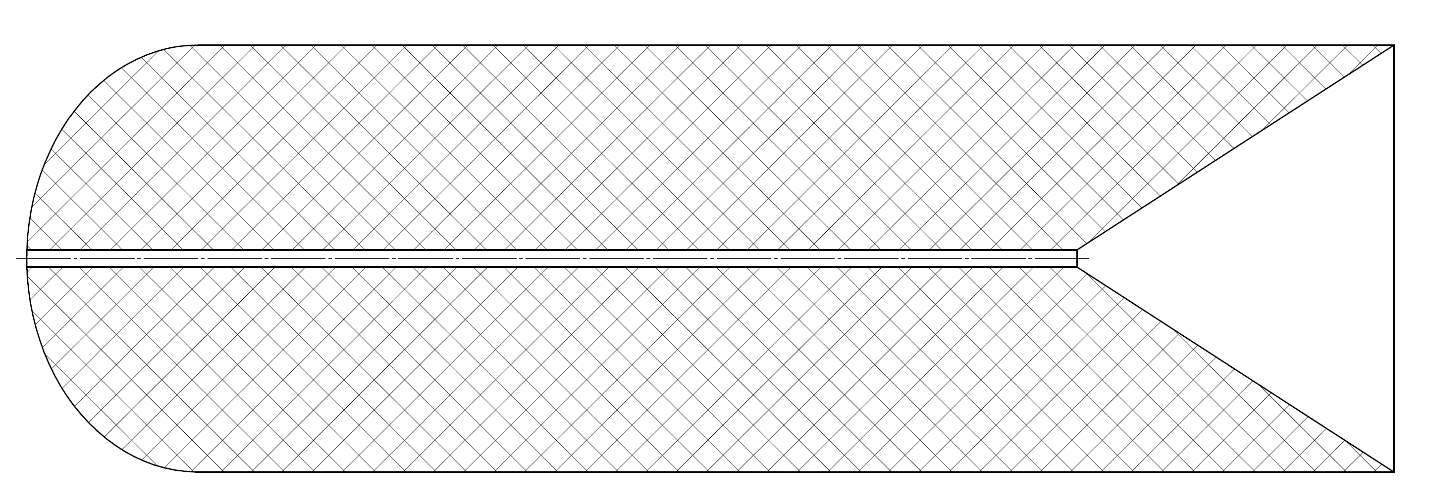


Рисунок 3.1 – Геометрия заряда

Таблица 3.1 – Характеристики топлива ПХН – 2М

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Состав | Окислитель | перхлорат нитрония, % | 30 |
| Горючее | порошкообразный алюминий, % | 60 |
| ГСВ | поливинилхлорид, % | 10 |
| Условная химическая формула | | |  |
| Энтальпия образования , | | |  |
| Закон горения | | |  |
| Плотность топлива , | | | 2430 |
| Теплопроводность, | | |  |
| Коэффициент теплопроводности λ, | | | 4,5 |
| Коэффициент линейного расширения, | | |  |
| Минимальное давление устойчивого горения, кПа | | | 0,7 |
| Эксплуатационный интервал температур | | | [240;293] |

Таблица 3.2 – Характеристики топлива ПХА – 4М

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Состав | Окислитель | перхлорат аммония, % | 35 |
| Горючее | порошкообразный алюминий, % | 20 |
| ГСВ | нитразол, % | 45 |
| Условная химическая формула | | |  |
| Энтальпия образования , | | |  |
| Закон горения | | |  |
| Плотность топлива , | | | 1800 |
| Теплопроводность, | | |  |
| Коэффициент теплопроводности λ, | | | 0,94 |
| Коэффициент линейного расширения, | | |  |
| Минимальное давление устойчивого горения, кПа | | | 30 |
| Эксплуатационный интервал температур | | | [220;320] |

Рассматриваемый состав, как и другие высокоэнергетические СТРТ крупногабаритных зарядов представляют собой высоконаполненную гетерогенную композицию, содержащую до 90% твердого наполнителя различной химической природы, в том числе высокочувствительное взрывчатое вещество. В этой связи смешение топливной массы с целью обеспечения безопасности, необходимой воспроизводительности состава и свойств по всему объему заряда проводят в несколько приемов, предварительно получая частные смеси из нескольких компонентов.

Условно принципиальная схема изготовления заряда СТРТ представлена на рисунке Рисунок 3.2.

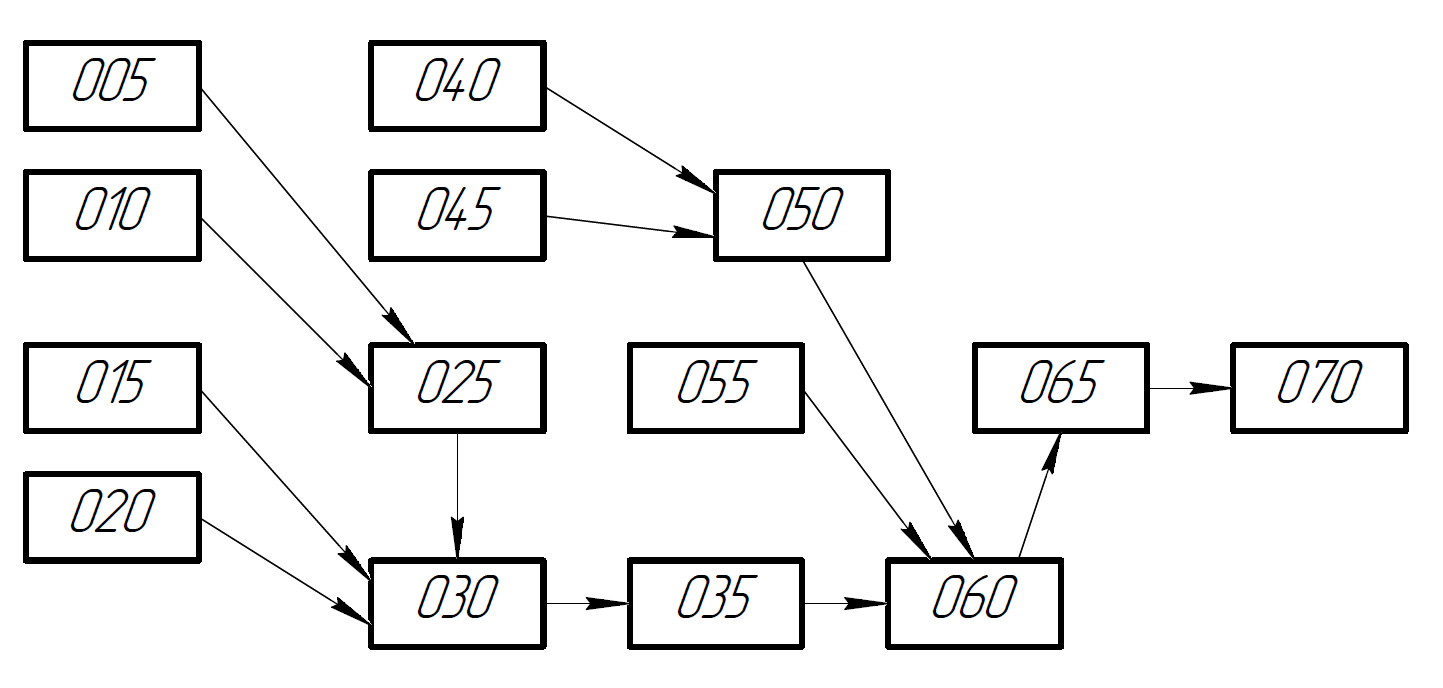


Рисунок 3.2 – Схема изготовления зарядов СТРТ

Основные технологические операции изготовления заряда из СТРТ представлены в таблице Таблица 3.3.

Таблица 3.3 – Основные технологические операции

|  |  |
| --- | --- |
| № | Наименование операции |
| 005 | Приготовление РСПК для «ведомого» топлива |
| 010 | Приготовление ССД для «ведомого» топлива |
| 015 | Подготовка корпуса двигателя |
| 020 | Подготовка технологической оснастки |
| 025 | Смешение топливной массы «ведомого» заряда |
| 030 | Заполнение корпуса двигателя |
| 035 | Отверждение и распрессовка заряда |
| 040 | Приготовление РСПК для «ведущего» топлива |
| 045 | Приготовление ССД для «ведущего» топлива |
| 050 | Смешение топливной массы «ведущего» заряда |
| 055 | Подготовка технологической оснастки |
| 060 | Заполнение корпуса двигателя |
| 065 | Отверждение и распрессовка заряда |
| 070 | Контроль качества и укупорка |

## Разработка операционного технологического процесса

Таблица 3.4 – Операционная карта изготовления заряда СТРТ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Содержание операции | Оборудование |
| Операция 005. Приготовление РСПК для «ведомого» топлива | | |
| 1 | Измельчение крупной фракции ПХА | Дробильно-протирочный аппарат |
| 2 | Сушка ПХА | Сушилка с «кипящим слоем» |
| 3 | Измельчение крупной фракции ПХА | Струйно-вихревая мельница |
| 4 | Дозирование мелкой фракции ПХА | Накопитель мелкой фракции |
| 5 | Загрузка мелкой фракции ПХА в смеситель | Смеситель С-5 |
| Операция 010. Приготовление ССД для «ведомого» топлива | | |
| 1 | Дозирование пластификатора | Дозатор |
| 2 | Смешение связующего с пластификатором | Планетарный смеситель |
| 3 | Загрузка порошкообразного алюминия | Вибро-шнековый дозатор |
| 4 | Перемешивание массы | Планетарный смеситель |
| 5 | Отбор массы для анализа | — |
| Операция 015. Подготовка корпуса двигателя | | |
| 1 | Входной контроль | — |
| 2 | Нанесение раствора на основе синтетического каучука | Штанга распыления ЗКС |
| 3 | Отверждение | Кабина термостатирования |
| Операция 020. Подготовка технологической оснастки | | |
| 1 | Входной контроль | — |
| 2 | Установка корпуса на стапель | Кран-балка |
| 3 | Обработка иглы обезжиривающим раствором | — |
| 4 | Установка иглы на корпусе | Кран-балка |
| 5 | Проверка герметичности | Компрессор, датчик давления |
| Операция 025. Смешение топливной массы «ведомого» заряда | | |
| 1 | Загрузка РСПК из контейнера смесителя | Смеситель непрерывного действия |
| 2 | Загрузка ССД | Смеситель непрерывного действия |
| 3 | Перемешивание | Смеситель непрерывного действия |
| 4 | Перемешивание всей  композиции в вакууме | Вакуумный смеситель |
| Операция 030. Заполнение корпуса двигателя | | |
| 1 | Проверка температуры и влажности в помещении | Термометр, гигрометр |
| 2 | Проверка герметичности ситемы | Датчик давления |
| 3 | Подача топливной массы в корпус | Напорная труба |
| 4 | Отсоединение смесителя и экструдера от сборки | — |
| Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда | | |
| 1 | Подготовка  полимеризационной кабины | Термометр, гигрометр |
| 2 | Помещение корпуса в полимеризационную кабину | Кран-балка |
| 3 | Установка датчиков | — |
| 4 | Термостатирование заряда | Полимеризационная кабина |
| 5 | Ступенчатое охлаждение изделия | Полимеризационная кабина |
| 6 | Установка корпуса на стапель | Кран-балка |
| 7 | Извлечение иглы | Кран-балка |
| Операция 040. Приготовление РСПК для «ведущего» топлива | | |
| 1 | Измельчение крупной фракции ПХН | Дробильно-протирочный аппарат |
| 2 | Сушка ПХН | Сушилка с «кипящим слоем» |
| 3 | Измельчение крупной фракции ПХН | Струйно-вихревая мельница |
| 4 | Дозирование мелкой фракции ПХН | Накопитель мелкой фракции |
| 5 | Загрузка мелкой фракции ПХН в смеситель | Смеситель С-5 |
| Операция 045. Приготовление ССД для «ведущего» топлива | | |
| 1 | Дозирование пластификатора | Дозатор |
| 2 | Смешение связующего с пластификатором | Планетарный смеситель |
| 3 | Загрузка порошкообразного алюминия | Вибро-шнековый дозатор |
| 4 | Перемешивание массы | Планетарный смеситель |
| 5 | Отбор массы для анализа | — |
| Операция 050. Смешение топливной массы «ведущего» заряда | | |
| 1 | Загрузка РСПК из контейнера смесителя | Смеситель непрерывного действия |
| 2 | Загрузка ССД | Смеситель непрерывного действия |
| 3 | Перемешивание | Смеситель непрерывного действия |
| 4 | Перемешивание всей  композиции в вакууме | Вакуумный смеситель |
| Операция 055. Подготовка технологической оснастки | | |
| 1 | Входной контроль | — |
| 2 | Установка корпуса на стапель | Кран-балка |
| 3 | Обработка иглы обезжиривающим раствором | — |
| 4 | Установка иглы на корпусе | Кран-балка |
| 5 | Проверка герметичности | Компрессор, датчик давления |
| Операция 060. Заполнение корпуса двигателя | | |
| 1 | Проверка температуры и влажности в помещении | Термометр, гигрометр |
| 2 | Проверка герметичности ситемы | Датчик давления |
| 3 | Подача топливной массы в корпус | Напорная труба |
| 4 | Отсоединение смесителя и экструдера от сборки | — |
| Операция 065. Отверждение и распрессовка заряда | | |
| 1 | Подготовка  полимеризационной кабины | Термометр, гигрометр |
| 2 | Помещение корпуса в полимеризационную кабину | Кран-балка |
| 3 | Установка датчиков | — |
| 4 | Термостатирование заряда | Полимеризационная кабина |
| 5 | Ступенчатое охлаждение изделия | Полимеризационная кабина |
| 6 | Установка корпуса на стапель | Кран-балка |
| 7 | Извлечение иглы | Кран-балка |
| Операция 070. Контроль качества и укупорка | | |
| 1 | Выходной контроль размеров | — |
| 2 | Установка снаряженного корпуса на дефектоскоп | 𝛾-дефектоскоп |
| 3 | Проведение дефектоскопии | 𝛾-дефектоскоп |
| 4 | Контрольное взвешивание | Весы |
| 5 | Укупорка | — |

## 

## Описание операций

Операция 005. Приготовление рабочей смеси порошкообразных компонентов (РСПК)

Применительно к рассматриваемому составу в РСПК входят различные фракции перхлората аммония и перхлората нитрония, отличающиеся средним диаметром частиц и удельной поверхностью.

В общем случае применение полифракционного наполнителя по сравнению с монофракционным позволяет улучшить реологические характеристики топливной массы при постоянной объемной доле наполнителя или увеличить объемную долю наполнителя при сохранении уровня реологических характеристик.

Крупный ПХА поступает на производство зарядов готовым, а мелкий – получают непосредственно на производстве путем измельчения крупного до требуемой величины удельной поверхности перед началом изготовления топливной массы.

Из дробильно-протирочного аппарата ПХА системой транспортеров подается в сушильный агрегат. Используют сушилку с псевдоожиженным («кипящим») слоем. Она имеет корытообразный поддон, разделенный вертикальными перегородками на несколько секций. В нижней части расположена воздухораспределительная решетка, на которой находится слой ПХА, под решетку (в каждую секцию индивидуально) подается горячий (100-130 ℃) воздух. Скорость подачи воздуха такова, что он не уносит частицы ПХА, а переводит продукт во взвешенное состояние. Сушка в стационарном «кипящем» слое является одним из эффективных средств интенсификации этого процесса, так как каждая частица имеет тесный контакт с теплоносителем. Вертикальные перегородки имеют зазоры у противоположных стенок рабочей камеры, поэтому ПХА перемещается к загрузочной зоне зигзагообразно.

Рабочая фракция с кондиционными размерами частиц направляется реверсивным шнеком и системой транспортеров в накопительную емкость. Частицы поступают в струйно-вентиляционную установку («мельницу») для измельчения.

В струйной мельнице измельчение достигается за счет взаимного соударения частиц, разгоняемых до 100-200 м/с. К достоинствам этих устройств следует отнести возможность тонкого и сверхтонкого сухого помола, отсутствие вращающихся деталей, незначительное загрязнение продуктов измельчения. Вместе с тем струйные мельницы отличаются большими удельными энергозатратами, а также требуют установки после себя громоздкой системы пылеулавливания.

Степень дисперсности регулируется углом поворота лопаток и определенной высотой отбойного конуса. Настройка установки на нужную производительность осуществляется изменением числа оборотов шнека.

Воздух с мелкими частицами выходит из сепаратора через верхний патрубок и направляется в четыре циклона. В них ПХА отделяется от воздуха и поступает в приемный бункер, где выгружается с помощью шлюзового затвора и системой транспортеров в накопитель мелкой рабочей фракции.

Воздух из циклона проходит фильтрацию и воздуходувкой возвращается в разгонные устройства. Таким образом, струйная мельница имеет замкнутый цикл по воздуху.

Набранные в заданных соотношениях навески фракций загружаются в передвижной контейнер-смеситель, в него же дозируются негорючие порошкообразные компоненты, далее производится смешение всех указанных компонентов и их транспортировка в здание получения топливной массы.

Смешение осуществляется при вращении контейнера, который представляет собой аппарат периодического действия типа «пьяной» бочки. При периодическом ведении процесса смешения, во-первых, можно получить точное соотношение между компонентами смеси (при их загрузке в смеситель по массе), а, во-вторых, при относительно большом числе компонентов их дозирование в смеситель затруднено.

Операция 010. Приготовление смеси связующего с добавками (ССД)

Назначение этой технологической фазы производства СТРТ заключается в смешении связующего с пластификатором, порошкообразным алюминием, отверждающими добавками; при этом осуществляется вакуумирование смеси для удаления воздуха и летучих веществ.

Поскольку порошкообразный алюминий активен по отношению к воде, предварительно проводится процесс его пассивации и гидрофобизации в смесительных реакторах. Процесс пассивации порошкообразного алюминия заключается в создании на поверхности частиц защитного слоя из молекул пассивирующего вещества с целью компенсации химической активности поверхности. Процесс гидрофобизации порошкообразного алюминия заключается в образовании на поверхности частиц пленки гидрофобизирующего вещества, которая не смачивается водой.

Операция 015. Подготовка корпуса двигателя

Данная стадия технологического процесса производства заключается в нанесении защитно-крепящего слоя (ЗКС) на основе синтетических каучуков (СКН, СКЭПТ и др.) на внутреннюю поверхность корпуса РДТТ для обеспечения адгезии с зарядом СТРТ, теплозащиты и эрозионной стойкости материала ТЗП. Крепящий состав через насос подается в штангу распыления ЗКС. При нанесении корпус приводят во вращение вокруг своей оси. Отверждение ЗКС происходит при повышенных температурах путем термостатирования в специальных кабинах при температуре 50-60 °С.

Регламентируется срок и условия хранения подготовленного корпуса до заполнения топливной массой (~ 10-15 суток).

Операция 020. Подготовка технологической оснастки

В технологическую (формующую) оснастку входят следующие основные элементы: формующая игла, узел силового крепления иглы, узел ввода, система поддавливания и отсечки топливной массы после заполнения. Сущность подготовки заключается в том, что элементы, соприкасающиеся с топливной массой после заполнения корпуса, покрывают антиадгезионным слоем с тем, чтобы после отверждения заряда эти формующие элементы можно было безопасно извлечь (распрессовать заряд). Как правило, для покрытия используют кремнийорганические (силиконовые) каучуки в виде раствора.

Операция 025. Смешение топливной массы

Цель смешения – равномерное распределение компонентов по объему, получение однородной по химическому составу массы, достижение стабильности ее характеристик.

Для получения и переработки топливных масс методом литья под давлением используют смеситель непрерывного действия (СНД). СНД состоит из предварительного смесителя с бункером, имеющий загрузочный люк для подачи компонентов или предварительно подготовленной топливной композиции. В нижней части корпуса находится продольное окно, соединяющееся с цилиндрическим каналом, в котором располагается шнек предварительного смесителя; в нем топливная масса подвергается интенсивной дополнительной механической обработке. При этом топливная масса передвигается вдоль оси шнека, а затем через решетку, установленную в конце канала, подается в вакуумную камеру и вакуумный смеситель. В них создается разрежение, благодаря чему из топливной массы удаляется воздух и другие газообразные вещества. Напорный экструдер аналогичен предварительному смесителю, но отличается размерами. Патрубок экструдера заканчивается напорной трубой, к которой подсоединяется корпус двигателя.

Таким образом, в аппарате СНД совмещаются операции смешения компонентов и ее нагнетания в корпус двигателя.

Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда

Отверждение определяет эффективность всего технологического процесса, так как составляет около 80% общего времени изготовления зарядов СТРТ.

На стадии отверждения (полимеризации) топливной массы завершается формирование структуры и физико-механических свойств зарядов в результате протекания химических реакций и различных физико-химических процессов.

При полимеризации происходят различные химические превращения и физико-химические процессы при повышенной температуре, в результате которых осуществляется «сшивка» молекулярных цепей связующего и образуется единый пространственный каркас сплошной полимерной матрицы, содержащей высококонцентрированную дисперсную фазу наполнителей.

Отверждение заряда происходит в специальных кабинах, которые представляет собой бетонированный колодец круглого сечения, в котором регулируют и контролируют температуру воздуха при термостатировании.

После окончания процесса отверждения изделие охлаждают в тех же кабинах подачей воздуха определенной температуры. Процесс охлаждения крупных изделий продолжается в течении нескольких суток.

На фазе распрессовки удаляется формирующая технологическая оснастка из заряда. При распрессовке выполняются следующие операции: разборка соединительных элементов, снятие крышки, извлечение технологической иглы.

Для распрессовки зарядов применяют следующее оборудование: гидравлические пресс-станции, подъемно-перегрузочные устройства.

Операция 070. Контроль качества и укупорка

Контроль качества зарядов включает проверку химического состава топлива, его механические характеристики и скорости горения, прочности скрепления топлива со стенками корпуса двигателя и сплошности этого скрепления, монолитности заряда, его геометрических и весовых характеристик.

Контроль для обнаружения дефектов в виде посторонних включений, трещин, разноплотности и других дефектов осуществляют методом теневой ультразвуковой дефектоскопии.

Метод основан на особенностях распространения ультразвуковых упругих колебаний (УЗК) с частотами 18-22 кГц в твердых средах и на границе раздела сред.

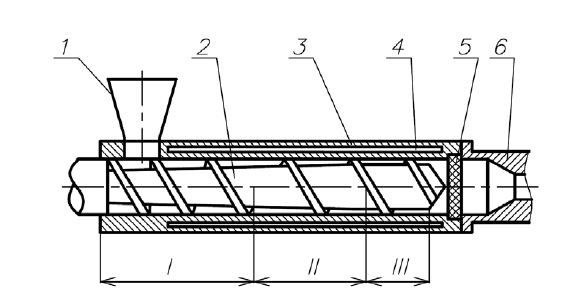
Генератор подает электрические колебания на пьезоэлемент излучающего преобразователя, который генерирует ультразвуковые колебания. Последние проходят через изделие и попадают на пьезоэлемент приемного преобразователя, откуда электрические колебания поступают в приемник. Здесь поступающие электрические сигналы усиливаются и преобразуются в ток регистрирующего устройства. В случае, если луч УЗК частично или полностью перекрывается дефектом, интенсивность колебаний в той или иной степени ослабевает, и регистрирующее устройство на дефектограмме дает отметку о наличии дефекта в объеме изделия.

После операции контроля качества производится укупорка корпуса.

## Расчет шнекового экструдера

На данном этапе необходимо произвести расчет и разработать чертеж общего вида.

Схема одношнекового экструдера представлена на рисунке Рисунок 3.3 [1]. Топливная масса из бункера 1 поступает в корпус 3, где захватывается вращающимся шнеком 2 и транспортируется к головке 6. При этом рабочее тело экструдера в зоне I (зона питания) уплотняется, в зоне II (зона сжатия) происходит его сжатие, а в зоне III (зона дозирования) рабочее тело гомогенизируется, после чего выдавливается в головку 6 через формирующую решетку 5. Для обеспечения требуемого теплового режима и условий транспортирования в корпусе могут быть предусмотрены каналы теплоносителя 4.

Рисунок 3.3 – Шнековый экструдер

На рисунке Рисунок 3.4 показана схема шнека с переменной глубиной нарезки и указаны основные геометрические параметры.

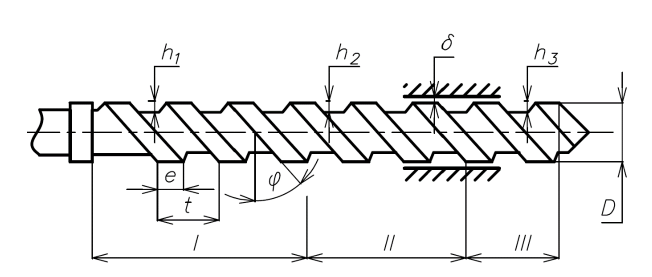


Рисунок 3.4 – Схема шнека с переменной глубиной нарезки

Основные геометрические параметры:

1. диаметр *D*;
2. длина *L*;
3. шаг винтовой нарезки *t*;
4. глубина канала по зонам (глубина нарезки) *h*;
5. ширина ребра *e*;
6. величина зазора между ребром шнека и корпусом *δ*;
7. угол подъема винтовой линии нарезки шнека *φ*;
8. число заходов нарезки шнека обычно принимается *λ* = 1.

В качестве исходного параметра для расчета экструдера принимается его производительность.



Для известной производительности экструдера можно определить диаметр шнека:



где *Q* – объемная производительность, *D* – диаметр шнека, *k*п=0,15 – коэффициент, учитывающий утечки и осевые перетечки рабочего тела.

Округляем до ближайшего значения диаметра в большую сторону в соответствии с ГОСТ – 14773.

Тогда принимаем значение *D*ш=450 мм=0,45 м.

Угол наклона винтовой поверхности:



Средние глубины винтового канала шнека в каждой из зон:

* в зоне питания

,

* в зоне дозирования

,

,

* в зоне сжатия

.

Ширина ребра и величина радиального зазора:

,

.

Критическая частота вращения шнека:

,

Рабочая частота вращения шнека:

.

Для течения в экструдере средняя угловая скорость сдвига:

,

.

Коэффициент динамической вязкости для неньютоновской жидкости:



Длина шнека:

,

.

Длина каждой зоны:

* зона питания ;
* зона сжатия 
* зона дозирования .

Экструдер установлен в корпусе с помощью двух подшипников шариковых радиальных однорядных (ГОСТ 8338-75) и одного подшипника упорного шарикового (ГОСТ 7872-89).

Максимальное осевое усилие ** на шнек определяется по следующей формуле:

.

Принимаем, что осевое усилие на упорном подшипнике *F*о равно *P*o.

Усилие поперечного нагружения:

.

Поперечное усилие сосредоточено в области бункера, где осуществляется загрузка топливной массы. Из соотношения моментов сил и суммы сил на ось *OX* определяются поперечные нагрузки на каждый из радиальных подшипников *Fy.*

,

,

.

Выбор подшипников осуществляется из предположения, что максимальная осевая (для упорного подшипника) и поперечная (для радиального подшипника) нагрузки *F*о и *Fy* соответственно не должны превышать 50…70 % статической грузоподъемности подшипников *С*0 [6].

Тогда, выбираем следующие подшипники в соответствии с ГОСТ 8338-75 и ГОСТ 7872-89:

*d*1=460 мм, *Fy*1=42,411 кН, *Cr*1=300 кН, обозначение подшипника 1000892;

*d*2=380 мм, *Fy*2=10,603 кН, *Cr*2=247 кН, обозначение подшипника 1000876;

*d*3=500 мм, *F0*=795,216 кН, *Cr*3=1020 кН, обозначение подшипника 82/500Н;

Ресурс работы подшипников до наступления момента, когда вероятность отказа становится более 10 %:







где *Cr* – динамическая грузоподъемность подшипника, *X* – коэффициент осевой динамической нагрузки, *Y* – коэффициент радиальной динамической нагрузки, *KV* – коэффициент вращения, *K*Б – коэффициент динамичности нагрузки, *K*T – температурный коэффициент.

Принимаем:

* для радиальных подшипников *Y* = 1; *X* = 0; *KV* = 1;
* для упорных подшипников *Y* = 0; *X* = 1.

Учитывая кратковременные перегрузки при работе экструдера до 300 % рекомендовано принимать *K*Б = 2,5…3. Температурный коэффициент выбирается с учетом допустимого нагрева корпуса подшипника при его работе согласно таблице Таблица 3.5.

Таблица 3.5 – Значения температурного коэффициента

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Рабочая температура, °C | *K*T | Рабочая температура, °C | *K*T |
| <100 | 1 | 175…200 | 1,25 |
| 100…125 | 1,05 | 200…225 | 1,35 |
| 125…150 | 1,10 | 225…250 | 1,40 |

# Охрана труда и экология

## Введение

В данном разделе дипломного проекта рассмотрены вопросы безопасности и охраны окружающей среды и персонала при проведении огневых стендовых испытаний проектируемого двигателя. Испытания могут проводиться как для образца в целом, так и для отдельных узлов и агрегатов. С точки зрения безопасности и экологии наибольший интерес представляют огневые стендовые испытания.

Работы, выполняемые в процессе подготовки и проведения огневых стендовых испытаний РДТТ, являются огне- и взрывоопасными, поэтому на производственных участках испытательных баз необходимо осуществлять специальный режим техники безопасности, а также режим повышенной требовательности и тщательного исполнения положений и норм соответствующих нормативных документов. Кроме того, для возможного проведения комплекса работ с использованием зарядов твёрдого топлива и средств пироавтоматики, представляющих собой высокоэнергетические конденсированные системы, необходимы специально аттестованные помещения, а также лицензии и разрешения соответствующих органов.

Огневые стендовые испытания предполагается проводить на горизонтальном стенде, который размещается в закрытом боксе. Отсеки стенда представляют собой отделенные друг от друга монолитными железобетонными перегородками помещения, вход в которые производится через бронедвери. При этом предусмотрены системы, предотвращающие прохождение команд на включение двигателя при наличии открытых бронедверей, также предусмотрена световая и звуковая сигнализация при превышении предельно допустимой концентрации вредных веществ в отсеках стенда. С целью уменьшения разрушений стендового корпуса при аномальных огневых испытаниях потолки отсеков выполнены легкосбросными.



## Анализ вредных и опасных факторов

Стадия огневых стендовых испытаний РДТТ содержит в себе этапы, сопровождающиеся влиянием вредных и опасных факторов на человека и окружающую среду.

Вредный фактор может стать опасным в зависимости от уровня и продолжительности воздействия на человека.

Применительно к огневым стендовым испытаниям РДТТ можно выделить основные:

* + 1. Опасные факторы:
* взрывоопасность;
* пожароопасность.
  + 1. Вредные факторы:
* шум реактивной струи истекающих из сопла ПС;
* токсичность топлив и ПС.

Смесевое ракетное топливо обладает повышенной взрыво- и пожароопасностью. В соответствии с [1] производство, связанное с ракетными топливами, можно отнести к категории А – взрывоопасные.

Вибрации возникают непосредственно при проведении эксперимента. Источником их является объект испытаний. Виброколебания при испытаниях крупногабаритных РДТТ не влияют на обслуживающий персонал, поскольку он должен быть удалён со стенда в специальный защитный пультовой бокс.

В рассматриваемом помещении применено искусственное освещение, которое осуществляется люминесцентными лампами дневного света установленных на открытых светильниках. По конструктивному исполнению освещение является общим – светильники располагаются равномерно по потолку.

Возможным источником поражения электрическим током являются провода осветительной системы. В помещении поставлены металлические полы, существует высокая вероятность соприкосновения с металлическими предметами. Таким образом, помещение относится к разряду помещений с повышенной опасностью поражения электрическим током. Исходя из этого, в соответствии с [3] приняты следующие меры:

* электропровода проходят в местах наименьшей вероятности их повреждения и контакта с металлическими предметами и человеком;
* испытательный стенд и пульт заземлены.

## Оценка выбросов при огневых стендовых испытаниях

При огневых стендовых испытаниях двигателей основной проблемой с точки зрения охраны окружающей среды является выброс в окружающую среду вредных веществ, содержащихся в продуктах сгорания ракетного топлива.

Состав продуктов сгорания получен с помощью программы «TERRA» и приведен в приложении Б.

В программе «TERRA» содержание компонентов в продуктах сгорания имеет размерность [моль/кг] (количество вещества на 1 кг продуктов сгорания). Умножая эту величину на молярную массу вещества, можно получить массовое содержание . Зная массу стартового заряда, можно определить, сколько килограммов каждого вещества выделилось в процессе работы РДТТ.

Результаты представлены в таблице Таблица 4.1.

Таблица 4.1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вещество |  |  |  |  |
| 1 | H2 | 2,1375 | 2,016 | 0,431 | 1,865 |
| 2 | HCl | 2,5207 | 36,461 | 9,191 | 39,787 |
| 3 | CO | 3,3809 | 28,010 | 9,470 | 40,995 |
| 4 | Al2O3 (к) | 3,9018 | 101,960 | 39,783 | 172,220 |
| 5 | N2 | 3,8553 | 28,014 | 10,800 | 46,754 |
| 6 | CO2 | 2,0946 | 44,009 | 9,218 | 39,905 |
| 7 | H2O | 8,9243 | 18,015 | 16,077 | 69,598 |
| 8 | AlCl | 0,0022 | 62,435 | 0,014 | 0,059 |

По гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» ПДК веществ, входящих в состав ПС рассмотренного топлива, принимают значения, представленные в таблице Таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Предельно допустимые концентрации

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Вещество |  |
| 1 | H2 | не норм. |
| 2 | HCl | 0,2 |
| 3 | CO | 3 |
| 4 | Al2O3 (к) | 6 |
| 5 | N2 | не норм. |
| 6 | CO2 | 27000 |
| 7 | H2O | не норм. |
| 8 | AlCl | не норм. |

Из таблицы Таблица 4.2 видно, что при работе РДТТ наиболее вредными являются следующие компоненты HCl, CO, Al2O3 (к), CO2. Рассмотрим влияние этих веществ на здоровье человека и окружающую среду.

Оксид углерода крайне опасен для здоровья. СО вдыхается вместе с воздухом и поступает в кровь, где конкурирует с кислородом за молекулы гемоглобина. Оксид углерода, имея двойную химическую связь, соединяется с гемоглобином более прочно, чем молекула кислорода. Нарушается способность крови доставлять кислород к тканям и органам, в результате чего возможна потеря сознания и смерть. Опасность усугубляется отсутствием у оксида углерода цвета и запаха. Относится к веществам II класса опасности.

Хлороводород также очень опасен. Он оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки и дыхательные пути. Относится к веществам II класса опасности.

Оксид алюминия пожаро- и взрывобезопасен, по степени воздействия на организм человека относится к веществам III класса опасности. Но следует учитывать, что в составе ПС оксид алюминия присутствует в вид мелкодисперсных частиц, которые могут нанести вред здоровью человека. Поэтому следует принять меры по очистке воздуха от твёрдых частиц.

Диоксид углерода относится к IV классу опасности. Диоксид углерода не является токсичным веществом, поэтому считается безвредным для организма человека. Но является ускорителем процесса всасывания веществ в слизистую желудка.

Требуемое состояние рабочей зоны может быть обеспечено следующими мероприятиями:

* дистанционное управление процессами испытаний;
* применение средств индивидуальной защиты;
* использование автоматической системы сигнализации о превышении уровня ПДК вредных веществ.

Для оценки воздействия вредных веществ на окружающую среду определим объем воздуха  и радиус рассеивания  , необходимые для достижения нормативного уровня ПДК атмосферного воздуха.

Потребный объем воздуха определяется по формуле:

,

Радиус рассеивания ПС:

.

Таблица 4.3 – Потребные характеристики

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Вещество |  |  |
| 1 | H2 | — | — |
| 2 | HCl |  | 456,3 |
| 3 | CO |  | 186,861 |
| 4 | Al2O3 (к) |  | 239,308 |
| 5 | N2 | — | — |
| 6 | CO2 |  | 8,903 |
| 7 | H2O | — | — |
| 8 | AlCl | — | — |

Из данных таблицы Таблица 4.3 видно, что санитарно-защитная зона полигона должна составлять не менее 250 м. При таком расстоянии концентрация вредных веществ достигает достаточного уровня ПДК атмосферного воздуха.

## Расчет звукоизоляции кабины для персонала

РДТТ является источником мощных акустических шумов.

Шум – это сочетание звуков различных по силе и частоте, способное оказывать воздействие на организм. Шум создаёт значительную нагрузку на органы слуха человека, а также угнетает центральную нервную систему, оказывая негативное воздействие. Для реактивных двигателей характерны высокие уровни шума (свыше 140 дБ), опасные для здоровья человека. Следовательно, необходимо рассчитать безопасное расстояние, на котором следует организовать пульт управления и наблюдения при испытаниях двигателя.

Исходные данные для расчета:

* диаметр среза сопла , ;
* скорость истечения газа ;
* плотность струи газа .

При проведении испытаний главным источником шума является высокоскоростная выхлопная струя.

Общий уровень звуковой мощности выхлопной струи двигателя [4]:



где  величина, зависящая от температуры струи газ, .

Октавные уровни звуковой мощности струи:

,

где  разность между общим уровнем звуковой мощности и октавным уровнем звуковой мощности со среднегеометрической частотой , значение которой находят в зависимости от безразмерного параметра – числа Струхаля, определяемого для каждой третьоктавной частоты [5]:

.

Соответствующие значения представлены в таблице Таблица 4.4.

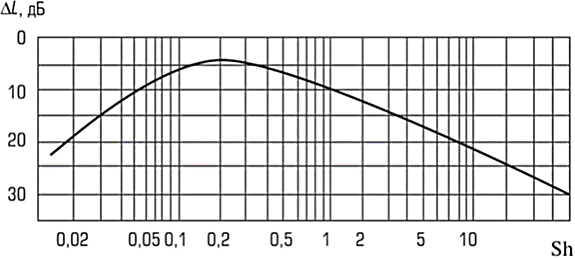


Рисунок 4.1 – Зависимость относительного спектра звуковой мощности струи от числа Струхаля

Таблица 4.4 - Зависимость разности уровня звуковой мощности от числа Струхаля

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 31,5 | 0,003625 | 25 | 169,161 |
| 63 | 0,007249 | 23 | 171,161 |
| 125 | 0,014384 | 21 | 173,161 |
| 500 | 0,057536 | 9 | 185,161 |
| 1000 | 0,115071 | 5 | 189,161 |
| 2000 | 0,230143 | 4,5 | 189,661 |
| 4000 | 0,460286 | 6 | 188,161 |
| 6000 | 0,690429 | 7 | 187,161 |
| 8000 | 0,920571 | 9 | 185,161 |

Нормативные значения  устанавливаем по ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности», полагая, что помещение относится к помещениям с речевой связью по телефону.

Таблица 4.5 – Допустимые уровни шума на рабочих местах для соответствующих среднегеометрических частот

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|  | 96 | 83 | 74 | 68 | 63 | 60 | 57 | 55 | 54 |

Для дальнейшего расчета потребуется задаться расстоянием от источника шума до пункта управления, а также материалом, из которого он построен, пусть стена будет выполнена из железобетонных плит толщиной 500 мм.

Уровень снижения шума будет определяться по следующей формуле:

,

где  расстояние от источника шума до расчетной точки, ;  расстояние замера уровня шума от источника, ;  поверхностная плотность железобетонной плиты, ; постоянная, зависящая от размеров и формы звукоизолирующей перегородки, .

Фактическое значение уровня шума от источника:

.

Таблица 4.6 – Уровень снижение шума и нормативные значения

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|  | 169,2 | 171,2 | 173,2 | 185,2 | 189,2 | 189,7 | 188,2 | 187,2 | 185,2 |
|  | 99,5 | 105,5 | 111,5 | 123,5 | 129,5 | 135,6 | 141,6 | 145,1 | 147,6 |
|  | 69,7 | 65,6 | 61,7 | 61,6 | 59,6 | 54,1 | 46,6 | 42,1 | 37,6 |
|  | 96 | 83 | 74 | 68 | 63 | 60 | 57 | 55 | 54 |

Рисунок 4.2 – Уровень звуковой мощности выхлопной струи

На всех среднегеометрических частотах уровень звуковой мощности меньше допустимых значений для данного типа выполняемых работ.

Следовательно, можно сделать вывод, что выбранное местоположение и материал звукоизоляции позволяют снизить уровень шумового воздействия до нормативных значений.

# Организационно-экономическая часть

## Введение

В выпускной квалификационной работе рассматривается разработка маршевого РДТТ третьей ступени ракеты-носителя.

При проведении мероприятий по разработке маршевого ракетного двигателя на первом этапе его создания рассматривают несколько конструктивных вариантов, наиболее полно удовлетворяющих требованиям ТЗ.

Выбрав конструктивное исполнение, систему измерения, методику расчета, дают технико-экономическую оценку изделия в целом и отдельных его элементов.

В данной работе определяются затраты на проектирование РДТТ третьей ступени, изготовление опытных образцов и их испытания.



## Основные этапы НИиОКР

Таблица 5.1 – Основные этапы НИиОКР

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этап | Содержание | Срок выполнения, мес. |
|  | Исследование | |
| 1 | Проведение научно-исследовательской работы | 1 |
| 2 | Разработка технического предложения | 1 |
| 3 | Разработка и согласование технического задания | 1 |
|  | Разработка | |
| 4 | Разработка эскизного проекта | 1 |
| 5 | Разработка технического проекта | 3 |
| 6 | Разработка расчетно-конструкторской документации | 2 |
| 7 | Подготовка стендового оборудования и технологической оснастки | 3 |
| 8 | Изготовление опытных образцов | 3 |
| 9 | Проведение испытаний опытных образцов | 4 |
| 10 | Корректировка документации | 4 |

Таблица 5.2 – План проектных работ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование этапа | Месяцы | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| НИР |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Техническое предложение |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Техническое задание |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Эскизное проектирование |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Техническое проектирование |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Разработка РКД |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Подготовка стенда |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изготовление опытных образцов |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Проведение испытаний опытных образцов |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Корректировка РКД |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

## Затраты на проектирование, изготовление и испытание

Затраты на разработку двигательной установки:

,

где затраты на проектирование, затраты на изготовление и испытание двигателей.



### Расчет заработной платы при проектировании и изготовлении

Затраты на проектирование и изготовление:

,

где прямые затраты, ; косвенные затраты, 

,

где основная заработная плата; дополнительная заработная плата, ; социальные отчисления, .

,

где трудоемкость работы, тарифная ставка за час работы.

,

где норм времени, количество рабочих, занятых на этапе.

Таблица 5.3 – Время занятости при конструкторской подготовке производства

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Виды работ | Труд-ть | | Ведущий инженер-конструктор | Инженер-конструктор 1 категории | Инженер-конструктор 2 категории | Инженер-конструктор 3 категории |
| ч | % |
| Тех. предложение | 170 | 16,1 | 1×50 | 2×60 |  |  |
| Тех. задание | 60 | 5,7 | 1×40 | 1×20 |  |  |
| Эскизный проект | 160 | 15,1 | 1×80 | 1×40 | 1×40 |  |
| Тех. проект | 430 | 40,5 | 1×70 | 1×120 | 1×120 | 1×120 |
| Разработка документации | 240 | 22,6 | 1×30 | 1×70 | 1×70 | 1×70 |
| Итого | 1060 | 100 | 270 | 370 | 230 | 190 |

Таблица 5.4 – Время занятости при технологической подготовке производства

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Виды работ | Трудоемкость | | Инженер-технолог 1 категории | Инженер-технолог 2 категории |
| ч | % |
| Технологические процессы | 40 | 8,7 |  | 1×40 |
| Проектирование оснастки | 40 | 8,7 |  | 1×40 |
| Выбор и размещение оборудования | 380 | 82,6 | 1×140 | 1×240 |
| Итого | 460 | 100 | 140 | 320 |

Таблица 5.5 – Время занятости при изготовлении деталей и узлов установки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Виды работ | Трудоемкость | | Рабочий |
| ч | % |
| Итого | 210 | 100 | 3×70 |

Таблица 5.6 – Время занятости при сборке и испытаниях

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Виды работ | Труд-ть | | Ведущий инженер-конструктор | Инженер-конструктор 1 категории | Инженер-конструктор 2 категории | Рабочий |
| ч | % |
| Сборка ДУ | 290 | 28,2 | 1×50 |  | 1×120 | 1×120 |
| Подготовка, проведение испытаний | 740 | 71,8 | 1×120 | 1×180 | 1×200 | 2×120 |
| Итого | 1030 | 100 | 170 | 180 | 320 | 360 |

Исходя и составленного плана определяем время, затрачиваемое каждым исполнителем при проведении проектных работ и изготовлении.

Таблица 5.7 – Время занятости исполнителей

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Категория работника | Количество |  |
| Ведущий инженер-конструктор | 1 | 440 |
| Инженер-конструктор 1 категории | 2 | 550 |
| Инженер-конструктор 2 категории | 1 | 550 |
| Инженер-конструктор 3 категории | 1 | 190 |
| Инженер-технолог 1 категории | 1 | 140 |
| Инженер-технолог 2 категории | 1 | 320 |
| Рабочий | 3 | 570 |

Таблица 5.8 – Основная заработная плата при проведении проектных работ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Категория работника | Количество, R |  |  |
| Ведущий инженер-конструктор | 1 | 270 | 50000 |
| Инженер-конструктор 1 категории | 2 | 370 | 30000 |
| Инженер-конструктор 2 категории | 1 | 230 | 28000 |
| Инженер-конструктор 3 категории | 1 | 190 | 26000 |

Часовая тарифная ставка ведущего инженера-конструктора:

.

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 1 категории:

.

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 2 категории:

.

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 3 категории:

.

Основная заработная плата:



Дополнительная заработная плата:

.

Социальные отчисления:

.

Накладные затраты при проектировании образца:

,

.

Суммарная заработная плата при проектировании образца:



Таблица 5.9 – Основная заработная плата при изготовлении опытного образца

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Категория работника | Количество, R |  |  |
| Ведущий инженер-конструктор | 1 | 170 | 50000 |
| Инженер-конструктор 1 категории | 2 | 180 | 30000 |
| Инженер-конструктор 2 категории | 1 | 320 | 28000 |
| Инженер-технолог 1 категории | 1 | 140 | 27000 |
| Инженер-технолог 2 категории | 1 | 320 | 26000 |
| Рабочий | 3 | 570 | 22000 |

Часовая тарифная ставка ведущего инженера-конструктора:

.

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 1 категории:

.

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 2 категории:

.

Часовая тарифная ставка инженера-технолога 1 категории:

.

Часовая тарифная ставка инженера-технолога 2 категории:

.

Часовая тарифная ставка рабочего:

.

Основная заработная плата:



Дополнительная заработная плата:

.

Социальные отчисления:

.

Накладные затраты при изготовлении образца:

,

.

Суммарная заработная плата при изготовлении образца:



Таблица 5.10 – Затраты на проектирование и изготовление

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Статья затрат | | Затраты, руб. |
| Основная заработная плата | Проектирование | 239859 |
| Изготовление | 316680 |
| Дополнительная заработная плата | Проектирование | 47971 |
| Изготовление | 63336 |
| Социальные отчисления | Проектирование | 86349 |
| Изготовление | 114004 |
| Накладные затраты | Проектирование | 179893 |
| Изготовление | 237510 |
| Итого | Проектирование | 554072 |
| Изготовление | 731530 |

### Затраты на оборудование

Для работы инженерам понадобится специальное оборудование: персональные компьютеры, принтер и плоттер стоимостью.

Таблица 5.11 – Стоимость оборудования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Оборудование | Количество | Стоимость, руб |
| Компьютер | 7 | 130000 |
| МФУ | 4 | 15000 |
| Плоттер | 1 | 280000 |

Общая сумма затрат на оборудование:

.

### Затраты на вспомогательное ПО

Таблица 5.12 – Стоимость программного обеспечения

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование | Стоимость, руб |
| Microsoft Windows 10 Pro | 21999 |
| Microsoft Office 2019 | 19999 |
| Mathcad Professional | 128400 |
| Компас – 3D V20 | 195000 |

Общая сумма затрат на программное обеспечение:

.

### Затраты на материалы

Затраты на основные материалы:

,

где норма расхода основного материала данного вида, оптовая цена основного материала.

Норма расхода основного материала:

,

где масса детали, коэффициент использования материала.

Таблица 5.13 – Стоимость материалов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование материала | Количество материала, кг | КИМ | Цена материала, руб/кг | Затраты, руб |
| СТРТ топливо | 440 | 0,95 | 500 | 220000 |
| Титан | 30 | 0,8 | 1700 | 51000 |
| Органопластик | 25 | 0,9 | 2000 | 50000 |
| ТЗП | 20 | 0,95 | 1200 | 24000 |
| Карбид вольфрама | 0,5 | 0,9 | 1500 | 750 |
| Прочее |  | | | 15000 |
| Итого |  | | | 360750 |

Затраты на основные материалы:

.

### Суммарные затраты на проектирование

Суммарные затраты на проектирование определяются по следующим статьям расходов:

* основная заработная плата;
* дополнительная заработная плата;
* отчисления на социальные нужды;
* накладные затраты;
* затраты на вспомогательное ПО;
* затраты на оборудование.

Таблица 5.14 – Суммарные затраты на проектирование

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Статьи | Затраты, руб | Доля, % |
| Основная заработная плата | 239859 | 11 |
| Дополнительная заработная плата | 47971 | 2 |
| Отчисления на социальные нужды | 86349 | 4 |
| Накладные затраты | 179893 | 8 |
| Затраты на вспомогательное ПО | 365398 | 17 |
| Затраты на оборудование | 1 250 000 | 58 |
| Итого | 2 170 010 | 100 |

### Затраты на испытания

Себестоимость изделия может быть определена по следующим статьям расходов:

* затраты на основные материалы;
* основная заработная плата;
* дополнительная заработная плата;
* отчисления на социальные нужды;
* накладные затраты.

Таблица 5.15 – Себестоимость изделия

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Статьи | Затраты, руб | Доля, % |
| Затраты на основные материалы | 360750 | 33 |
| Основная заработная плата | 316680 | 29 |
| Дополнительная заработная плата | 63336 | 6 |
| Отчисления на социальные нужды | 114004 | 10 |
| Накладные затраты | 237510 | 22 |
| Итого | 1 092 280 | 100 |

Затраты на материальную часть испытаний РДТТ определяются по формуле:

,

где необходимое для испытаний количество двигательных установок.

Затраты на топливо в процессе испытаний не учитываются, поскольку топливо входит в состав двигателей.

Ориентировочная стоимость проведения предварительных испытаний составляет 15 950 тыс. руб.

Ориентировочная стоимость корректировки РКД составляет 2 536 тыс. руб.

Суммарные затраты на испытания составляют:

.

### Полные затраты

Затраты на проектирование, как было определено ранее:

.

Полные затраты составляют:

.

# Заключение

# Список литературы

1. Фахрутдинов И.Х. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива / И.Х. Фахрутдинов, А.В. Котельников. – Рипол Классик, 1987. – 328 с.
2. Шишков А.А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник / А.А. Шишков, С.Д. Панин, Б.В. Румянцев. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
3. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты производства твердого ракетного топлива: учеб. пособие. – М.: Ун-т машиностроения, 2013. – 232 с.
4. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование: Учебник / А.А. Дорофеев. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 571 с.
5. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
6. Александренков В.П., Ягодников Д.А. Расчет коэффициентов тепломассообмена в сопле Лаваля РДТТ. Методические указания к домашнему заданию по курсу «Теплозащита и прочность конструкций РДТТ». – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 19 с.
7. Ягодников Д.А., Андреев Е.А. Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе. Методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 112с.
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 592 с.
9. Основы теории и расчета ракетных двигателей / Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др.; под ред. Кудрявцева В.М. – 4 изд. – М.: Высшая школа, 1993

# Приложение А. Характеристики ТРТ

**Топливо ARCADENE – 253A.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ARCIT – 373D.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо RD – 2435.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ТР – Н – 3062.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ПХА − 3М.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ПХА−4М.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ПХА−5М.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ПХК−1М.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

**Топливо ПХН−2М.**

Условная химическая формула:



Закон горения:

, .

Плотность топлива:

.

# Приложение Б. Термодинамический расчет

Исходный состав:

(C5.213H24.948O28.408N7.428Cl2.979Al7.413[-2034] - 0.998) +

(C5.268H4.800O12.375N2.062Cl3.663Al22.237[-64.39] - 0.002)

Состав, моль/кг: C 5.4755 H 26.1645 O 29.8067 N 7.7914 Cl3.1303 Al7.8151

1-й параметр: p(кам) =5

2-й параметр: I = -2030.061

Расширение: p(a), МПа =0.03 (равновесное)

Равновесные параметры при p(кам)=5 МПа, p=5 МПа (камера, СИ):

p=5 T=3906.2 v=0.183784 S=8.87345 I=-2030.06

U=-2878.85 M=31.9669 Cp=1.81663 k=1.14876 Cp'=6.49239

k'=1.18683 Ap=0.0005576 Bv=0.0005198 Gt=0.218428e-6 MMg=22.1076

Rg=376.087 Cpg=1.94772 kg=1.2393 Cp'g=7.84797 k'g=1.2147

Mu=0.0001035 Lt=0.355691 Lt'=2.19692 Pr=0.566496 Pr'=0.36956

A=1008.29 z=0.374489 Bm=0.140977 n= - w=0

Mach=0 Frel= - F'= - alpha=0.877379 Dens= -

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1763e-4 O = 0.75926 O+ = 0.1903e-10 O- = 0.1925e-5

O2 = 0.66859 O2+ = 0.3311e-8 O2- = 0.2681e-6 O3 = 0.6176e-5

H = 1.7385 H+ = 0.5057e-10 H- = 0.4006e-6 H2 = 2.9299

H2+ = 0.4980e-11 H3+ = 0.2307e-9 OH = 2.2669 OH+ = 0.1011e-8

OH- = 0.6179e-5 HO2 = 0.00369 HO2- = 0.2324e-8 H2O = 6.8972

H2O+ = 0.1836e-7 H2O2 = 0.3782e-3 H3O+ = 0.6359e-6 Cl = 0.8259

Cl+ = 0.4649e-9 Cl- = 0.3415e-3 Cl2 = 0.00121 ClO = 0.00636

ClO2 = 0.1040e-5 Cl2O = 0.1411e-6 HCl = 2.1448 HOCl = 0.00166

N = 0.0018 N2 = 3.6807 N2+ = 0.1407e-11 N3 = 0.9000e-8

NO = 0.42609 NO+ = 0.1801e-5 NO2 = 0.3703e-3 NO2+ = 0.7581e-10

NO2- = 0.1265e-7 NO3- = 0.7657e-11 N2O = 0.7474e-4 N2O3 = 0.2847e-9

NH = 0.5990e-3 NH2 = 0.2041e-3 NH3 = 0.7342e-4 NH4+ = 0.1076e-9

N2H2 = 0.4018e-7 N2H4 = 0.4661e-11 HN = 0.2700e-8 HNO = 0.5472e-3 ClNO = 0.6171e-4 ClNO2 = 0.4729e-8 C = 0.1988e-6 C2 = 0.2852e-11

CO = 4.3293 CO+ = 0.1414e-9 CO2 = 1.1454 CO2+ = 0.3645e-9 C2O = 0.1326e-7 C3O2 = 0.3724e-11 CH = 0.6470e-7 CH2 = 0.4623e-7

CH3 = 0.4132e-7 CH4 = 0.6017e-8 C2H = 0.1785e-10 C2H2 = 0.1249e-9

HCO = 0.4915e-3 HCO+ = 0.3964e-7 COOH = 0.2144e-3 H2CO = 0.9655e-5

CH2OH = 0.2178e-7 CCl = 0.1051e-6 CCl2 = 0.6990e-9 ClCO = 0.6937e-4

Cl2CO = 0.3928e-7 CHCl = 0.8576e-8 CH2Cl = 0.5135e-8 CH3Cl = 0.2316e-9

CN = 0.2395e-5 CN- = 0.4361e-8 NCN = 0.6690e-9 CNN = 0.1243e-10

ClCN = 0.2148e-6 Al = 0.00585 Al+ = 0.3873e-3 Al2 = 0.1606e-6 AlO = 0.05109 AlO- = 0.2132e-4 AlO2 = 0.00751 AlO2- = 0.6171e-6

Al2O = 0.00201 Al2O2 = 0.00406 Al2O3(c) = 3.6729 Al2O3 = 0.1708e-3

AlH = 0.6295e-3 AlH2 = 0.2841e-5 AlH3 = 0.1001e-6 AlOH = 0.21227

HAlO = 0.4356e-3 HAlO2 = 0.00553 Al(OH)2 = 0.02454 Al(OH)3 = 0.01162

AlCl = 0.0653 AlCl2 = 0.00325 AlCl3 = 0.3629e-3 Al2Cl6 = 0.2360e-11

ClAlO = 0.02986 Cl2AlO = 0.1618e-3 AlHCl = 0.2127e-3 AlH2Cl = 0.3556e-5

AlN = 0.1330e-4 AlC = 0.5165e-9

Равновесные параметры при p(кам)=5 МПа, p=2.9199 МПа (кр. сечение, СИ):

p=2.91985 T=3745.24 v=0.298465 S=8.87345 I=-2511.45

U=-3313.55 M=31.7231 Cp=1.81432 k=1.14712 Cp'=6.40452

k'=1.1794 Ap=0.0005698 Bv=0.0005338 Gt=0.372558e-6 MMg=22.1177

Rg=375.915 Cpg=1.94768 kg=1.23917 Cp'g=8.09876 k'g=1.2064

Mu=0.0001007 Lt=0.344362 Lt'=2.19376 Pr=0.569505 Pr'=0.371725

A=981.214 z=0.381007 Bm=0.141254 n=1.10933 w=981.214

Mach=1 Frel=1 F'=0.0003042 Isp=1869.37 B=1520.9

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1198e-4 O = 0.68983 O+ = 0.6825e-11 O- = 0.9407e-6

O2 = 0.64372 O2+ = 0.1539e-8 O2- = 0.1215e-6 O3 = 0.3381e-5

H = 1.6493 H+ = 0.1896e-10 H- = 0.1866e-6 H2 = 2.8714

H2+ = 0.1499e-11 H3+ = 0.9081e-10 OH = 2.1042 OH+ = 0.4034e-9

OH- = 0.3231e-5 HO2 = 0.00268 HO2- = 0.8699e-9 H2O = 7.1094

H2O+ = 0.8444e-8 H2O2 = 0.2529e-3 H3O+ = 0.3715e-6 Cl = 0.8214

Cl+ = 0.1976e-9 Cl- = 0.2411e-3 Cl2 = 0.9920e-3 ClO = 0.00494

ClO2 = 0.6039e-6 Cl2O = 0.7881e-7 HCl = 2.1899 HOCl = 0.00125

N = 0.00124 N2 = 3.7081 N3 = 0.3840e-8 NO = 0.37263

NH2 = 0.1197e-3 NH3 = 0.4496e-4 NH4+ = 0.4552e-10 N2H2 = 0.1704e-7

C = 0.8503e-7 CO = 4.2618 CO+ = 0.5214e-10 CO2 = 1.2132

CH2 = 0.1798e-7 CH3 = 0.1679e-7 CH4 = 0.2396e-8 C2H = 0.4593e-11

C2H2 = 0.3832e-10 HCO = 0.3005e-3 HCO+ = 0.1924e-7 COOH = 0.1365e-3

CH4O = 0.1566e-9 CH2OH = 0.8171e-8 CCl = 0.4575e-7 CCl2 = 0.2795e-9

ClCO = 0.4176e-4 Cl2CO = 0.2113e-7 CHCl = 0.3349e-8 CH2Cl = 0.1975e-8

HClCO = 0.7862e-6 CN = 0.1144e-5 CN- = 0.1529e-8 NCN = 0.2214e-9

CNN = 0.3469e-11 C2N2 = 0.1526e-11 NCO = 0.1084e-5 HCN = 0.1214e-4

Al2 = 0.5108e-7 AlO = 0.03536 AlO- = 0.1053e-4 AlO2 = 0.00452

AlO2- = 0.2848e-6 Al2O = 0.00113 Al2O2 = 0.00235 Al2O3(c) = 3.7368

Al2O3 = 0.8785e-4 AlH = 0.3503e-3 AlH2 = 0.1167e-5 AlH3 = 0.3747e-7

AlOH = 0.15982 HAlO = 0.2516e-3 HAlO2 = 0.00389 Al(OH)2 = 0.01578

Al(OH)3 = 0.00805 AlCl = 0.05001 AlCl2 = 0.00223 AlCl3 = 0.2671e-3

ClAlO = 0.02361 Cl2AlO = 0.1011e-3 AlHCl = 0.1140e-3 AlH2Cl = 0.1664e-5

AlN = 0.5755e-5 AlC = 0.1402e-9

Равновесные параметры при p(кам)=5 МПа, p=0.03 МПа (вых. сечение, СИ):

p=0.03 T=2689.63 v=19.0665 S=8.87345 I=-5753.08

U=-6261.67 M=29.4801 Cp=1.77501 k=1.13612 Cp'=5.33012

k'=1.12573 Ap=0.0006401 Bv=0.0006205 Gt=0.0000353 MMg=23.5421

Rg=353.17 Cpg=1.89218 kg=1.22948 Cp'g=7.726 k'g=1.14572

Mu=0.0000805 Lt=0.25341 Lt'=1.58326 Pr=0.601173 Pr'=0.392882

A=790.025 z=0.397834 Bm=0.147118 n=1.10213 w=2728.74

Mach=3.454 Frel=22.9709 F'=0.0069873 Isp=2938.36 B= -

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1461e-6 O = 0.17032 O- = 0.4335e-9 O2 = 0.28558

O2- = 0.2806e-10 O3 = 0.1059e-7 H = 0.73826 H- = 0.6554e-10

H2 = 2.1375 OH = 0.77374 OH- = 0.3457e-8 HO2 = 0.1005e-3

H2O = 8.9243 H2O+ = 0.7154e-11 H2O2 = 0.5408e-5 H3O+ = 0.3778e-8

Cl = 0.6041 Cl- = 0.4659e-5 Cl2 = 0.1538e-3 ClO = 0.3514e-3

ClO2 = 0.2843e-8 Cl2O = 0.3155e-9 HCl = 2.5207 HOCl = 0.8604e-4

N = 0.2712e-4 N2 = 3.8553 N3 = 0.1501e-11 NO = 0.08074

NO+ = 0.9966e-8 NO2 = 0.7658e-5 N2O = 0.1088e-5 NH = 0.3493e-5

ClNO2 = 0.3292e-11 C = 0.2405e-10 CO = 3.3809 CO2 = 2.0946

CH = 0.3019e-11 CH2 = 0.3096e-11 CH3 = 0.5552e-11 HCO = 0.3198e-5

HCN = 0.5464e-7 HNC = 0.6481e-8 ClCN = 0.1976e-9 Al = 0.3119e-4

Al+ = 0.4800e-5 AlO = 0.5010e-3 AlO- = 0.3816e-8 AlO2 = 0.1674e-4

AlO2- = 0.5808e-10 Al2O = 0.1515e-5 Al2O2 = 0.4566e-5 Al2O3(c) = 3.9018

Al2O3 = 0.5970e-7 AlH = 0.7250e-6 AlH2 = 0.1623e-9 AlH3 = 0.2730e-11

AlOH = 0.00596 HAlO = 0.7577e-6 HAlO2 = 0.7900e-4 Al(OH)2 = 0.1757e-3

Al(OH)3 = 0.2529e-3 AlCl = 0.0022 AlCl2 = 0.4449e-4 AlCl3 = 0.1410e-4

AlN = 0.1142e-8

# Приложения В. Теплофизические свойства ПС

Исходный состав:

(C5.213H24.948O28.408N7.428Cl2.979Al7.413[-2034]- 0.998) +

(C5.268H4.800O12.375N2.062Cl3.663Al22.237[-64.39] - 0.002)

Состав, моль/кг: C 5.4755 H 26.1645 O 29.8067 N 7.7914 Cl3.1303 Al7.8151

1-й параметр: T =1000-4000-200

2-й параметр: p =5

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=1000 K (единицы СИ):

p=5 T=1000 v=0.039059 S=5.68425 I=-9822.19

U=-9959.26 M=27.3964 Cp=1.42424 k=1.15891 Cp'=2.2324

k'=1.1528 Ap=0.0012731 Bv=0.0012482 Gt=0.213958e-6 MMg=25.6114

Rg=324.635 Cpg=1.55858 kg=1.26309 Cp'g=2.90198 k'g=1.20408

Mu=0.0000384 Lt=0.0994302 Lt'=0.215008 Pr=0.602141 Pr'=0.518473

A=469.812 z=0.398418 Bm=0.154566

Равновесные концентрации (моль/кг):

H = 0.2437e-8 H2 = 2.4564 OH = 0.1872e-10 H2O = 8.5263

Cl = 0.2897e-8 Cl2 = 0.1181e-9 HCl = 3.1303 N2 = 3.891

NH2 = 0.1160e-10 NH3 = 0.00942 CO = 0.87293 CO2 = 4.3424

CH3 = 0.4743e-8 CH4 = 0.26013 C2H2 = 0.1390e-9 C2H4 = 0.3465e-6

CH2OH = 0.1385e-11 C2H6O = 0.2885e-9 C3H6O = 0.1774e-10

CH2Cl = 0.2049e-11 CH3Cl = 0.6992e-5 CH2Cl2 = 0.1105e-9

C2H5Cl = 0.1834e-8 HClCO = 0.1102e-7 HCN = 0.4874e-5

ClCN = 0.8742e-11 Al2O3(c) = 3.9075 Al(OH)3 = 0.2481e-8

ClAl(OH)2 = 0.3547e-8 Cl2AlOH = 0.2466e-7

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=1200 K (единицы СИ):

p=5 T=1200 v=0.047894 S=6.01869 I=-9457.52

U=-9637.5 M=27.9092 Cp=1.47428 k=1.15655 Cp'=1.57386

k'=1.1492 Ap=0.0008451 Bv=0.000844 Gt=0.200867e-6 MMg=25.0642

Rg=331.722 Cpg=1.6227 kg=1.25696 Cp'g=1.78822 k'g=1.23449

Mu=0.0000445 Lt=0.120568 Lt'=0.120568 Pr=0.598488 Pr'=0.659536

A=524.273 z=0.398418 Bm=0.151521

Равновесные концентрации (моль/кг):

H = 0.2254e-6 H2 = 2.7178 OH = 0.5807e-8 H2O = 8.7806

Cl = 0.2255e-6 Cl2 = 0.4727e-8 HCl = 3.1303 HOCl = 0.3322e-10

N2 = 3.8939 NO = 0.2687e-10 NH2 = 0.5209e-9 NH3 = 0.00353

CO = 1.6342 CO2 = 3.8346 CH3 = 0.1110e-7 CH4 = 0.00669

C2H2 = 0.2286e-9 C2H4 = 0.1473e-7 C2H5 = 0.1211e-11 C2H6 = 0.1278e-7

HCO = 0.5503e-8 COOH = 0.3221e-8 H2CO = 0.4635e-5 HCOOH = 0.2272e-4

CH2O2 = 0.2272e-4 CH4O = 0.1882e-6 CH2OH = 0.1588e-10

ClCO = 0.6648e-10 Cl2CO = 0.6926e-10 CH2Cl = 0.1684e-10

CH2Cl2 = 0.8019e-10 C2H3Cl = 0.1797e-10 C2H5Cl = 0.1834e-10

HCN = 0.8984e-5 HNC = 0.3173e-7 ClCN = 0.1089e-9 Al2O3(c) = 3.9075

Al(OH)3 = 0.1166e-6 AlCl3 = 0.1439e-6 AlHCl2 = 0.2222e-11

Cl2AlOH = 0.7474e-6

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=1400 K (единицы СИ):

p=5 T=1400 v=0.0559117 S=6.25943 I=-9145.19

U=-9365.21 M=27.9244 Cp=1.52086 k=1.15114 Cp'=1.56711

k'=1.14623 Ap=0.0007148 Bv=0.0007147 Gt=0.200041e-6 MMg=25.0484

Rg=331.932 Cpg=1.67871 kg=1.24647 Cp'g=1.75554 k'g=1.23351

Mu=0.0000501 Lt=0.138139 Lt'=0.138139 Pr=0.60846 Pr'=0.63631

A=566.048 z=0.398417 Bm=0.151444

Равновесные концентрации (моль/кг):

O2 = 0.1416e-11 H = 0.5214e-5 H2 = 2.3915 OH = 0.3940e-6

H2O = 9.1231 H2O2 = 0.1775e-11 Cl = 0.5626e-5 Cl2 = 0.8134e-7 HCl = 3.1303 HOCl = 0.1728e-8 N2 = 3.8951 NO = 0.4178e-8

NH = 0.1433e-11 NH2 = 0.6474e-8 NH3 = 0.0013 HNO = 0.2637e-11

NH2OH = 0.3081e-11 CO = 1.9896 CO2 = 3.4856 CH3 = 0.9530e-8

CH4 = 0.2106e-3 C2H2 = 0.1072e-9 C2H4 = 0.4199e-9 C2H6 = 0.4126e-10

HCO = 0.5368e-7 COOH = 0.3505e-7 H2CO = 0.4585e-5 HCOOH = 0.2145e-4

CH2O2 = 0.2145e-4 CH4O = 0.3943e-7 CH2OH = 0.5417e-10 ClCO = 0.1329e-8

Cl2CO = 0.3252e-9 CH2Cl = 0.4383e-10 CH3Cl = 0.1292e-6 CH2Cl2 =0.4166e-10

C2H3Cl = 0.1620e-11 HClCO = 0.9286e-7 HCN = 0.7970e-5 HNC = 0.6997e-7

ClCN =0.4672e-9 Al2O3(c) = 3.9075 Al(OH)2 =0.4548e-11 Al(OH)3 =0.1910e-5

AlCl2 =0.1308e-10 AlCl3 =0.1263e-5 AlHCl2 =0.1200e-9 ClAlOH =0.1719e-10

ClAl(OH)2 = 0.2567e-5 Cl2AlOH = 0.8344e-5

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=1600 K (единицы СИ):

p=5 T=1600 v=0.063902 S=6.47043 I=-8829.09

U=-9089.07 M=27.9254 Cp=1.56323 k=1.14645 Cp'=1.59456

k'=1.14321 Ap=0.0006251 Bv=0.0006251 Gt=0.200008e-6 MMg=25.0474

Rg=331.945 Cpg=1.72761 kg=1.23784 Cp'g=1.77946 k'g=1.22942

Mu=0.0000554 Lt=0.15537 Lt'=0.15537 Pr=0.61591 Pr'=0.634395

A=604.366 z=0.398413 Bm=0.151441

Равновесные концентрации (моль/кг):

O = 0.2007e-9 O2 = 0.3993e-9 H = 0.5522e-4 H2 = 2.1464

OH = 0.9398e-5 HO2 = 0.1582e-11 H2O = 9.3697 H2O2 = 0.9806e-10

H3O+ = 0.1166e-11 Cl = 0.6373e-4 Cl- = 0.2168e-11 Cl2 = 0.6993e-6

ClO = 0.3756e-10 HCl = 3.1301 HOCl = 0.3405e-7 N2 = 3.8954

NO = 0.1874e-6 N2O = 0.3611e-10 NH = 0.6368e-10 NH2 = 0.4229e-7

NH3 = 0.6059e-3 NH4+ = 0.1002e-11 N2H2 = 0.2167e-11 HNO = 0.1212e-9

NH2OH = 0.2450e-10 ClNO = 0.2970e-11 CO = 2.2366 CO2 = 3.2388

CH3 = 0.7984e-8 CH4 = 0.1486e-4 C2H2 = 0.5553e-10 C2H4 = 0.2636e-10

HCO = 0.2864e-6 COOH = 0.2084e-6 H2CO = 0.4386e-5 HCOOH = 0.2048e-4

CH2O2 = 0.2048e-4 CH3O = 0.1069e-11 CH4O = 0.1167e-7 CH2OH = 0.1314e-9

ClCO = 0.1235e-7 Cl2CO = 0.1040e-8 CH2Cl = 0.8595e-10 CH3Cl = 0.2679e-7

CH2Cl2 = 0.2482e-10 HClCO = 0.1614e-6 CN = 0.1042e-11 NCO = 0.2105e-11

HCN = 0.6965e-5 HNC = 0.1210e-6 ClCN = 0.1358e-8 Al2O3(c) = 3.9075

AlOH = 0.1975e-9 Al(OH)2 = 0.4936e-9 Al(OH)3 = 0.1563e-4

AlCl2 = 0.8294e-9 AlCl3 = 0.6259e-5 ClAlO = 0.7927e-10

ClAlOH = 0.1430e-8 ClAl(OH)2 = 0.2006e-4 Cl2AlOH = 0.5005e-4

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=1800 K (единицы СИ):

p=5 T=1800 v=0.0718914 S=6.65995 I=-8507.22

U=-8807.14 M=27.9258 Cp=1.60074 k=1.14254 Cp'=1.62457

k'=1.14022 Ap=0.0005557 Bv=0.0005557 Gt=0.200010e-6 MMg=25.0475

Rg=331.944 Cpg=1.76842 kg=1.23108 Cp'g=1.80728 k'g=1.22517

Mu=0.0000605 Lt=0.17219 Lt'=0.17219 Pr=0.621106 Pr'=0.634754

A=640.196 z=0.398397 Bm=0.15144

Равновесные концентрации (моль/кг):

O = 0.1519e-7 O2 = 0.3249e-7 H = 0.3483e-3 H2 = 1.9676

OH = 0.1110e-3 HO2 = 0.1290e-9 H2O = 9.5489 H2O2 = 0.2245e-8

H3O+ = 0.6086e-10 Cl = 0.4239e-3 Cl- = 0.6881e-10 Cl2 = 0.3748e-5

ClO = 0.1864e-8 HCl = 3.1293 HOCl = 0.3476e-6 N = 0.5005e-10

N2 = 3.8955 NO = 0.3631e-5 NO2 = 0.5229e-11 N2O = 0.6742e-9

NH = 0.1217e-8 NH2 = 0.1816e-6 NH3 = 0.3328e-3 NH4+ = 0.7907e-11

N2H2 =0.1139e-10 HNO =0.2406e-8 HNO2 =0.3498e-10 NH2OH =0.1250e-9

ClNO = 0.9867e-10 CO = 2.416 CO2 = 3.0595 CH2 = 0.1344e-11

CH3 = 0.6831e-8 CH4 = 0.1877e-5 C2H2 = 0.3249e-10 C2H4 = 0.2990e-11

HCO = 0.1039e-5 COOH = 0.8331e-6 H2CO = 0.4195e-5 HCOOH = 0.1989e-4

CH2O2 = 0.1989e-4 CH3O = 0.2654e-11 CH4O = 0.4485e-8 CH2OH =0.2605e-9

ClCO = 0.6936e-7 Cl2CO = 0.2577e-8 CH2Cl = 0.1434e-9 CH3Cl = 0.7810e-8

CHCl2 =0.1705e-11 CH2Cl2 = 0.1657e-10 HClCO = 0.2471e-6 CN = 0.1260e-10

NCO = 0.2673e-10 HCN = 0.6193e-5 HNC = 0.1826e-6 ClCN = 0.3094e-8

Al2O3(c) =3.9073 AlOH =0.1170e-7 HAlO2 =0.2537e-10 Al(OH)2 =0.1854e-7

Al(OH)3 = 0.8020e-4 AlCl = 0.7467e-8 AlCl2 = 0.2017e-7 AlCl3 = 0.2123e-4

ClAlO =0.4730e-8 Cl2AlO =0.5038e-10 AlHCl =0.2314e-11 AlH2Cl =0.1763e-11

AlHCl2=0.2213e-7 ClAlOH=0.4327e-7 ClAl(OH)2=0.9849e-4 Cl2AlOH=0.1984e-3

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=2000 K (единицы СИ):

p=5 T=2000 v=0.0798839 S=6.83283 I=-8178.99

U=-8518.87 M=27.9268 Cp=1.63457 k=1.13918 Cp'=1.65883

k'=1.13716 Ap=0.0005005 Bv=0.0005005 Gt=0.200039e-6 MMg=25.0479

Rg=331.938 Cpg=1.80311 kg=1.22563 Cp'g=1.84142 k'g=1.22055

Mu=0.0000654 Lt=0.188626 Lt'=0.188626 Pr=0.624758 Pr'=0.638033

A=673.926 z=0.398352 Bm=0.151438

Равновесные концентрации (моль/кг):

O = 0.4861e-6 O2 = 0.1101e-5 H = 0.00153 H2 = 1.8345

OH = 0.7997e-3 HO2 = 0.4378e-8 H2O = 9.6819 H2O2 = 0.2762e-7

H3O+ = 0.6690e-9 Cl = 0.00194 Cl- = 0.6892e-9 Cl2 = 0.1437e-4

ClO = 0.4251e-7 HCl = 3.1266 HOCl = 0.2231e-5 N = 0.1234e-8

N2 = 3.8956 NO = 0.3895e-4 NO2 = 0.2247e-9 N2O = 0.7080e-8

NH = 0.1289e-7 NH2 = 0.5833e-6 NH3 = 0.2064e-3 NH4+ = 0.1923e-10

N2H2 = 0.4366e-10 HNO = 0.2651e-7 HNO2 = 0.6899e-9 NH2OH = 0.4677e-9

ClNO = 0.1638e-8 CO = 2.5499 CO2 = 2.9256 CH2 = 0.6295e-11

CH3 = 0.6000e-8 CH4 = 0.3611e-6 C2H2 = 0.2106e-10 HCO = 0.2896e-5

COOH = 0.2527e-5 H2CO = 0.4041e-5 HCOOH = 0.1961e-4 CH2O2 = 0.1961e-4

CH3O = 0.5509e-11 CH4O = 0.2092e-8 CH2OH = 0.4520e-9 ClCO = 0.2744e-6

Cl2CO = 0.5339e-8 CHCl = 0.1508e-11 CH2Cl = 0.2156e-9 CH3Cl = 0.2918e-8

CHCl2 = 0.4065e-11 CH2Cl2 = 0.1204e-10 HClCO = 0.3476e-6 CN = 0.9186e-10

NCO = 0.2042e-9 HCN = 0.5623e-5 HNC = 0.2530e-6 ClCN = 0.5978e-8

Al = 0.1539e-11 AlO = 0.3590e-10 Al2O3(c) = 3.9069 AlH = 0.1587e-11

AlOH = 0.2984e-6 HAlO = 0.1780e-11 HAlO2 = 0.1268e-8 Al(OH)2 = 0.3320e-6

Al(OH)3 = 0.2964e-3 AlCl = 0.1675e-6 AlCl2 = 0.2517e-6 AlCl3 = 0.5520e-4

ClAlO =0.1218e-6 Cl2AlO =0.1326e-8 AlHCl =0.7541e-10 AlH2Cl =0.2614e-10

AlHCl2=0.1329e-6 ClAlOH=0.6470e-6 ClAl(OH)2=0.3489e-3 Cl2AlOH=0.5883e-3

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=2200 K (единицы СИ):

p=5 T=2200 v=0.0878906 S=6.99294 I=-7842.94

U=-8222.84 M=27.9307 Cp=1.66564 k=1.13627 Cp'=1.70453

k'=1.13381 Ap=0.0004563 Bv=0.0004562 Gt=0.200138e-6 MMg=25.0472

Rg=331.948 Cpg=1.83316 kg=1.22112 Cp'g=1.89344 k'g=1.21475

Mu=0.0000701 Lt=0.204717 Lt'=0.204717 Pr=0.627314 Pr'=0.647944

A=705.8 z=0.398245 Bm=0.151427

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1367e-11 O = 0.8298e-5 O2 = 0.1964e-4 H = 0.00514

H2 = 1.7338 OH = 0.00402 HO2 = 0.7829e-7 H2O = 9.781

H2O2 = 0.2157e-6 H3O+ = 0.4619e-8 Cl = 0.00672 Cl- = 0.4685e-8

Cl2 = 0.4306e-4 ClO = 0.5483e-6 Cl2O = 0.4337e-11 HCl = 3.1193

HOCl = 0.1019e-4 N = 0.1705e-7 N2 = 3.8955 NO = 0.2713e-3

NO+ = 0.1716e-11 NO2 = 0.4884e-8 N2O = 0.4879e-7 NH = 0.8897e-7

NH2 = 0.1519e-5 NH3 = 0.1402e-3 NH4+ = 0.3888e-10 N2H2 = 0.1332e-9

HN3 = 0.1855e-11 HNO = 0.1901e-6 HNO2 = 0.7953e-8 NH2OH = 0.1395e-8

ClNO = 0.1634e-7 CO = 2.6532 CO2 = 2.8223 C2O = 0.2793e-11

CH2 = 0.2224e-10 CH3 = 0.5409e-8 CH4 = 0.9509e-7 C2H2 = 0.1485e-10

HCO = 0.6681e-5 HCO+ = 0.1087e-10 COOH = 0.6273e-5 H2CO = 0.3926e-5

HCOOH =0.1954e-4 CH2O2 = 0.1954e-4 CH3O = 0.1008e-10 CH4O = 0.1129e-8

CH2OH = 0.7147e-9 CCl = 0.3943e-11 ClCO = 0.8415e-6 Cl2CO =0.9692e-8

CHCl =0.6161e-11 CH2Cl =0.3012e-9 CH3Cl = 0.1312e-8 CHCl2 = 0.8281e-11

CH2Cl2 = 0.9327e-11 HClCO = 0.4598e-6 CN = 0.4658e-9 NCO = 0.1080e-8

HCN = 0.5208e-5 HNC = 0.3309e-6 ClCN = 0.1027e-7 Al = 0.9046e-10

Al+ = 0.1633e-10 AlO = 0.2130e-8 AlO2 = 0.2131e-10 Al2O2 = 0.2866e-11

Al2O3(c) = 3.9058 AlH = 0.5758e-10 AlOH = 0.4138e-5 HAlO = 0.7283e-10

HAlO2 = 0.3049e-7 Al(OH)2 = 0.3468e-5 Al(OH)3 = 0.8611e-3 AlCl = 0.2082e-5

AlCl2 = 0.1932e-5 AlCl3 = 0.1180e-3 Al2Cl6 = 0.2200e-11 ClAlO = 0.1702e-5

Cl2AlO =0.1885e-7 AlHCl = 0.1274e-8 AlH2Cl=0.2333e-9 AlHCl2=0.5652e-6

ClAlOH = 0.5795e-5 ClAl(OH)2 = 0.9728e-3 Cl2AlOH = 0.00141

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=2400 K (единицы СИ):

p=5 T=2400 v=0.0959424 S=7.33289 I=-7056.01

U=-7476.13 M=27.9444 Cp=1.7553 k=1.12851 Cp'=1.83496

k'=1.12543 Ap=0.0004219 Bv=0.0004216 Gt=0.200408e-6 MMg=25.0386

Rg=332.062 Cpg=1.85955 kg=1.21739 Cp'g=1.98833 k'g=1.2065

Mu=0.0000746 Lt=0.220519 Lt'=0.23317 Pr=0.628959 Pr'=0.636027

A=734.546 z=0.398065 Bm=0.151395

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1503e-10 O = 0.8819e-4 O2 = 0.2155e-3 O3 = 0.1240e-11

H = 0.01422 H2 = 1.6584 OH = 0.01539 OH- = 0.4326e-11

HO2 = 0.8621e-6 H2O = 9.8509 H2O2 = 0.1194e-5 H3O+ = 0.2268e-7

Cl = 0.01893 Cl- = 0.2356e-7 Cl2 = 0.1066e-3 ClO = 0.4588e-5

ClO2 = 0.1324e-10 Cl2O = 0.5156e-10 HCl = 3.1031 HOCl = 0.3586e-4

N = 0.1524e-6 N2 = 3.895 N3 = 0.1832e-11 NO = 0.00136

NO+ = 0.5654e-10 NO2 = 0.6330e-7 N2O = 0.2443e-6 NH = 0.4459e-6

NH2 = 0.3388e-5 NH3 = 0.1022e-3 NH4+ = 0.6918e-10 N2H2 = 0.3425e-9

HN3 = 0.7119e-11 HNO = 0.9871e-6 HNO2 = 0.6096e-7 NH2OH = 0.3505e-8

ClNO = 0.1108e-6 CO = 2.7374 CO2 = 2.7381 C2O = 0.9967e-11

CH = 0.1666e-11 CH2 = 0.6400e-10 CH3 = 0.5006e-8 CH4 = 0.3195e-7

C2H2 = 0.1128e-10 HCO = 0.1342e-4 HCO+ = 0.8640e-10 COOH = 0.1340e-4

H2CO =0.3853e-5 HCOOH =0.1963e-4 CH2O2 =0.1963e-4 CH3O =0.1685e-10

CH4O = 0.6827e-9 CH2OH = 0.1058e-8 CCl = 0.2412e-10 CCl2 = 0.3067e-11

ClCO = 0.2131e-5 Cl2CO = 0.1586e-7 CHCl = 0.1996e-10 CH2Cl = 0.3999e-9

CH3Cl =0.6802e-9 CHCl2=0.1498e-10 CH2Cl2=0.7572e-11 HClCO=0.5808e-6

CN = 0.1809e-8 NCO = 0.4344e-8 HCN = 0.4923e-5 HNC = 0.4165e-6

ClCN = 0.1615e-7 Al = 0.2432e-8 Al+ = 0.6869e-9 AlO = 0.5783e-7 AlO2 = 0.1217e-8 Al2O = 0.4638e-10 Al2O2 = 0.1894e-9 Al2O3(c) = 3.9041

Al2O3 = 0.1827e-11 AlH = 0.1037e-8 AlH2 = 0.2374e-11 AlH3 = 0.1003e-11

AlOH = 0.3336e-4 HAlO = 0.1450e-8 HAlO2 = 0.3882e-6 Al(OH)2 = 0.2216e-4

Al(OH)3 = 0.00191 AlCl = 0.1524e-4 AlCl2 = 0.9432e-5 AlCl3 = 0.1987e-3

Al2Cl6 = 0.4058e-11 ClAlO = 0.1374e-4 Cl2AlO = 0.1541e-6 AlHCl = 0.1208e-7

AlH2Cl=0.1308e-8 AlHCl2 = 0.1698e-5 ClAlOH =0.3236e-4 ClAl(OH)2 = 0.00207 Cl2AlOH = 0.00262

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=2600 K (единицы СИ):

p=5 T=2600 v=0.104116 S=7.48371 I=-6679.01

U=-7139.9 M=27.9836 Cp=1.76946 k=1.12759 Cp'=1.94757

k'=1.12265 Ap=0.0003975 Bv=0.0003969 Gt=0.200999e-6 MMg=25.0045

Rg=332.514 Cpg=1.88297 kg=1.21446 Cp'g=2.17363 k'g=1.19468

Mu=0.000079 Lt=0.23614 Lt'=0.283504 Pr=0.629645 Pr'=0.605408

A=763.881 z=0.397851 Bm=0.151309

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1231e-9 O = 0.6476e-3 O2 = 0.00161 O3 = 0.4649e-10

H = 0.03381 H2 = 1.6078 OH = 0.04766 OH- = 0.4538e-10

HO2 = 0.6483e-5 H2O = 9.8869 H2O+ = 0.7461e-11 H2O2 = 0.5037e-5

H3O+ = 0.8253e-7 Cl = 0.04517 Cl- = 0.9718e-7 Cl2 = 0.2259e-3

ClO = 0.2725e-4 ClO2 = 0.2187e-9 Cl2O = 0.4085e-9 HCl = 3.0726

HOCl = 0.1025e-3 N = 0.9749e-6 N2 = 3.893 N3 = 0.1019e-10

NO = 0.00529 NO+ = 0.1019e-8 NO2 = 0.5451e-6 N2O = 0.9509e-6

NH = 0.1750e-5 NH2 = 0.6729e-5 NH3 = 0.7916e-4 NH4+ = 0.1082e-9

N2H2 = 0.7746e-9 HN3 = 0.2237e-10 HNO = 0.3981e-5 HNO2 = 0.3380e-6

HNO3 = 0.6241e-11 NH2OH =0.7713e-8 ClNO =0.5522e-6 ClNO2 =0.3846e-11

C = 0.5507e-11 CO = 2.8148 CO2 = 2.6607 C2O = 0.2978e-10

CH = 0.9653e-11 CH2 = 0.1592e-9 CH3 = 0.4793e-8 CH4 = 0.1314e-7

C2H2 = 0.9247e-11 HCO = 0.2432e-4 HCO+ = 0.4751e-9 COOH = 0.2546e-4

H2CO =0.3833e-5 HCOOH =0.1984e-4 CH2O2 =0.1984e-4 CH3O =0.2647e-10

CH4O = 0.4551e-9 CH2OH = 0.1500e-8 CCl = 0.1119e-9 CCl2 = 0.9138e-11

ClCO = 0.4645e-5 Cl2CO = 0.2378e-7 CHCl = 0.5440e-10 CH2Cl = 0.5138e-9

CH3Cl =0.3967e-9 CHCl2 =0.2473e-10 CH2Cl2 =0.6384e-11 HClCO =0.7075e-6

CN = 0.5769e-8 NCO = 0.1417e-7 HCN = 0.4772e-5 HNC = 0.5140e-6

ClCN = 0.2384e-7 Al = 0.3392e-7 Al+ = 0.1322e-7 AlO = 0.8108e-6

AlO- = 0.1704e-11 AlO2 = 0.3164e-7 Al2O = 0.1098e-8 Al2O2 = 0.4804e-8

Al2O3(c) = 3.902 Al2O3 = 0.7664e-10 AlH = 0.1034e-7 AlH2 = 0.2568e-10

AlH3 = 0.6190e-11 AlOH = 0.1672e-3 HAlO = 0.1563e-7 HAlO2 =0.2841e-5

Al(OH)2 = 0.9113e-4 Al(OH)3 = 0.0032 AlCl = 0.7001e-4 AlCl2 = 0.3048e-4

AlCl3 = 0.2597e-3 Al2Cl6 = 0.4874e-11 ClAlO =0.6824e-4 Cl2AlO = 0.7671e-6

AlHCl =0.6932e-7 AlH2Cl = 0.4845e-8 AlHCl2 = 0.3665e-5 ClAlOH = 0.1179e-3

ClAl(OH)2 = 0.00334 Cl2AlOH = 0.00376 AlN = 0.1391e-10

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=2800 K (единицы СИ):

p=5 T=2800 v=0.112569 S=7.63515 I=-6270.06

U=-6772.98 M=28.076 Cp=1.78206 k=1.12714 Cp'=2.16467

k'=1.11989 Ap=0.0003855 Bv=0.0003841 Gt=0.202149e-6 MMg=24.9183

Rg=333.664 Cpg=1.90374 kg=1.21252 Cp'g=2.53078 k'g=1.17991

Mu=0.0000832 Lt=0.251773 Lt'=0.373485 Pr=0.629003 Pr'=0.563685

A=792.437 z=0.39755 Bm=0.15106

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.8779e-9 O = 0.00352 O- = 0.6683e-11 O2 = 0.00869

O3 = 0.9995e-9 H = 0.07183 H- = 0.5374e-11 H2 = 1.59

H3+ = 0.1240e-11 OH = 0.12408 OH- = 0.3890e-9 HO2 = 0.3543e-4

H2O = 9.8691 H2O+ = 0.7076e-10 H2O2 = 0.1689e-4 H3O+ = 0.2164e-6

Cl = 0.09382 Cl- = 0.3733e-6 Cl2 = 0.4160e-3 ClO = 0.1211e-3

ClO2 = 0.2290e-8 Cl2O = 0.2282e-8 HCl = 3.0185 HOCl = 0.2447e-3

N = 0.4795e-5 N2 = 3.8874 N3 = 0.4437e-10 NO = 0.01661

NO+ = 0.1029e-7 NO2 = 0.3322e-5 N2O = 0.2996e-5 NH = 0.5696e-5

NH2 = 0.1231e-4 NH3 = 0.6505e-4 NH4+ = 0.1416e-9 N2H2 = 0.1594e-8

HN3 = 0.6017e-10 HNO = 0.1306e-4 HNO2 = 0.1424e-5 HNO3 = 0.5206e-10

NH2OH=0.1528e-7 ClNO=0.2116e-5 ClNO2=0.3057e-10 C=0.3907e-10

CO = 2.9039 CO2 = 2.5714 C2O = 0.7921e-10 CH = 0.4518e-10

CH2 = 0.3627e-9 CH3 = 0.4857e-8 CH4 = 0.6563e-8 C2H2 = 0.8402e-11

HCO = 0.4111e-4 HCO+ = 0.1800e-8 COOH = 0.4400e-4 H2CO = 0.3910e-5

HCOOH=0.2017e-4 CH2O2=0.2017e-4 CH3O=0.4031e-10 CH4O = 0.3346e-9

CH2OH = 0.2092e-8 CCl = 0.4215e-9 CCl2 = 0.2315e-10 ClCO = 0.8970e-5

Cl2CO = 0.3285e-7 CHCl = 0.1312e-9 CH2Cl = 0.6542e-9 CH3Cl = 0.2590e-9

CHCl2 = 0.3811e-10 CH2Cl2 = 0.5581e-11 HClCO = 0.8376e-6 CN = 0.1604e-7

NCN = 0.1868e-11 NCO = 0.3942e-7 HCN = 0.4819e-5 HNC = 0.6380e-6

ClCN = 0.3369e-7 Al = 0.3286e-6 Al+ = 0.1459e-6 AlO = 0.7767e-5

AlO- = 0.3084e-10 AlO2 = 0.5027e-6 Al2O = 0.1659e-7 Al2O2 = 0.7566e-7

Al2O3(c) = 3.899 Al2O3 = 0.1826e-8 AlH = 0.7563e-7 AlH2 = 0.2027e-9

AlH3 = 0.3051e-10 AlOH = 0.6648e-3 HAlO = 0.1200e-6 HAlO2 = 0.1533e-4

Al(OH)2 = 0.3029e-3 Al(OH)3 = 0.00491 AlCl = 0.2570e-3 AlCl2 = 0.8127e-4

AlCl3 = 0.3141e-3 Al2Cl6 = 0.5318e-11 ClAlO = 0.2630e-3 Cl2AlO = 0.2912e-5

AlHCl =0.3102e-6 AlH2Cl = 0.1504e-7 AlHCl2 = 0.6987e-5 ClAlOH = 0.3509e-3

ClAl(OH)2 = 0.0049 Cl2AlOH = 0.00495 AlN = 0.1967e-9

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=3000 K (единицы СИ):

p=5 T=3000 v=0.121606 S=7.79648 I=-5801.93

U=-6349.53 M=28.2713 Cp=1.79312 k=1.12743 Cp'=2.54861

k'=1.11915 Ap=0.0003896 Bv=0.0003864 Gt=0.204035e-6 MMg=24.7329

Rg=336.167 Cpg=1.92185 kg=1.212 Cp'g=3.15966 k'g=1.16684

Mu=0.0000873 Lt=0.267786 Lt'=0.521001 Pr=0.626257 Pr'=0.529204

A=821.514 z=0.397095 Bm=0.150408

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.6083e-8 O = 0.01468 O- = 0.1076e-9 O2 = 0.03457

O2+ = 0.4482e-11 O2- = 0.1566e-10 O3 = 0.1287e-7 H = 0.14083

H- = 0.4948e-10 H2 = 1.6277 H3+ = 0.5075e-11 OH = 0.27739

OH+ = 0.1455e-11 OH- = 0.3032e-8 HO2 = 0.1444e-3 H2O = 9.7558

H2O+ = 0.3967e-9 H2O2 = 0.4576e-4 H3O+ = 0.4039e-6 Cl = 0.17221

Cl+ = 0.1092e-11 Cl- = 0.1449e-5 Cl2 = 0.6663e-3 ClO = 0.4113e-3

ClO2 = 0.1567e-7 Cl2O = 0.9146e-8 HCl = 2.9331 HOCl = 0.4915e-3

N = 0.1912e-4 N2 = 3.8742 N3 = 0.1585e-9 NO = 0.0429

NO+ = 0.5897e-7 NO2 = 0.1465e-4 NO2- = 0.3363e-11 N2O = 0.7772e-5

N2O3 = 0.1583e-11 NH = 0.1609e-4 NH2 = 0.2145e-4 NH3 = 0.5746e-4

NH4+ = 0.1532e-9 N2H2 = 0.3085e-8 HN3 = 0.1436e-9 HNO = 0.3577e-4

HNO2 = 0.4623e-5 HNO3 = 0.2932e-9 NH2OH = 0.2785e-7 ClNO = 0.6321e-5

ClNO2 = 0.1646e-9 C = 0.2272e-9 CO = 3.0352 CO2 = 2.4401

CO2+ = 0.4021e-11 C2O = 0.2001e-9 CH = 0.1860e-9 CH2 = 0.8100e-9

CH3 = 0.5460e-8 CH4 = 0.4088e-8 C2H2 = 0.9000e-11 HCO = 0.6690e-4

HCO+ =0.4757e-8 COOH =0.7009e-4 H2CO =0.4174e-5 HCOOH =0.2064e-4

CH2O2 =0.2064e-4 CH3O = 0.6194e-10 CH4O = 0.2775e-9 CH2OH = 0.2978e-8

CCl = 0.1370e-8 CCl2 = 0.5175e-10 ClCO = 0.1565e-4 Cl2CO = 0.4163e-7

CHCl = 0.2949e-9 CH2Cl = 0.8562e-9 CH3Cl = 0.1933e-9 CHCl2 = 0.5621e-10

CH2Cl2 = 0.5123e-11 HClCO = 0.9722e-6 CN = 0.4133e-7 CN- = 0.1897e-11

NCN = 0.6018e-11 NCO = 0.9730e-7 HCN = 0.5236e-5 HNC = 0.8283e-6

ClCN = 0.4681e-7 Al = 0.2476e-5 Al+ = 0.9907e-6 AlO = 0.5575e-4

AlO- = 0.4744e-9 AlO2 = 0.5343e-5 AlO2- = 0.1542e-10 Al2O = 0.1844e-6

Al2O2 = 0.8379e-6 Al2O3(c) = 3.8946 Al2O3 = 0.2783e-7 AlH = 0.4535e-6

AlH2 = 0.1316e-8 AlH3 = 0.1339e-9 AlOH = 0.00225 HAlO = 0.7190e-6

HAlO2 = 0.6481e-4 Al(OH)2 = 0.8559e-3 Al(OH)3 = 0.00693 AlCl = 0.8080e-3

AlCl2 = 0.1876e-3 AlCl3 = 0.3551e-3 Al2Cl6 = 0.5297e-11 ClAlO = 0.8279e-3

Cl2AlO = 0.8774e-5 AlHCl =0.1176e-5 AlH2Cl = 0.4220e-7 AlHCl2 = 0.1227e-4

ClAlOH=0.8956e-3 ClAl(OH)2=0.00663 Cl2AlOH =0.00605 AlN =0.2055e-8

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=3200 K (единицы СИ):

p=5 T=3200 v=0.131693 S=7.97823 I=-5238.1

U=-5835.22 M=28.6357 Cp=1.80251 k=1.12887 Cp'=3.11696

k'=1.12341 Ap=0.0004096 Bv=0.0004031 Gt=0.206505e-6 MMg=24.3927

Rg=340.855 Cpg=1.93699 kg=1.21355 Cp'g=4.07662 k'g=1.16222

Mu=0.0000912 Lt=0.28476 Lt'=0.765239 Pr=0.620268 Pr'=0.485774

A=853.257 z=0.39631 Bm=0.149029

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.4095e-7 O = 0.04808 O- = 0.1395e-8 O2 = 0.10088

O2+ = 0.4269e-10 O2- = 0.2331e-9 O3 = 0.9980e-7 H = 0.26219

H- = 0.4331e-9 H2 = 1.7547 H3+ = 0.1550e-10 OH = 0.53781

OH+ = 0.1139e-10 OH- = 0.2130e-7 HO2 = 0.4411e-3 HO2- = 0.2541e-11H2O = 9.4875 H2O+ = 0.1451e-8 H2O2 = 0.1001e-3 H3O+ = 0.5776e-6

Cl = 0.28188 Cl+ = 0.7300e-11 Cl- = 0.5550e-5 Cl2 = 0.9234e-3

ClO = 0.00107 ClO2 = 0.7016e-7 Cl2O = 0.2627e-7 HCl = 2.8138

HOCl = 0.8271e-3 N = 0.6438e-4 N2 = 3.8497 N3 = 0.4797e-9

NO = 0.0917 NO+ = 0.2083e-6 NO2 = 0.4657e-4 NO2+ = 0.3546e-11

NO2- = 0.3384e-10 N2O = 0.1664e-4 N2O3 = 0.1006e-10 NH = 0.4100e-4

NH2 = 0.3668e-4 NH3 = 0.5555e-4 NH4+ = 0.1491e-9 N2H2 = 0.5787e-8

N2H4 = 0.1111e-11 HN3 = 0.3131e-9 HNO = 0.8278e-4 HNO2 = 0.1152e-4

HNO3 = 0.1101e-8 NH2OH = 0.4733e-7 ClNO = 0.1470e-4 ClNO2 = 0.5958e-9

C = 0.1174e-8 CO = 3.2418 CO+ = 0.2476e-11 CO2 = 2.2334

CO2+ = 0.1856e-10 C2O = 0.5103e-9 CH = 0.7273e-9 CH2 = 0.1896e-8

CH3 = 0.7188e-8 CH4 = 0.3314e-8 C2H2 = 0.1222e-10 HCO = 0.1078e-3

HCO+=0.9659e-8 COOH =0.1033e-3 H2CO =0.4772e-5 HCOOH =0.2120e-4

CH2O2 = 0.2120e-4 CH3O = 0.9989e-10 CH4O =0.2670e-9 CH2OH =0.4494e-8

CCl = 0.4054e-8 CCl2 = 0.1054e-9 ClCO = 0.2496e-4 Cl2CO = 0.4802e-7

CHCl =0.6489e-9 CH2Cl =0.1200e-8 CH3Cl =0.1699e-9 CHCl2 = 0.8151e-10

CH2Cl2 = 0.5031e-11 HClCO = 0.1114e-5 CN = 0.1042e-6 CN- = 0.1061e-10

NCN = 0.1837e-10 NCO = 0.2198e-6 HCN = 0.6354e-5 HNC = 0.1174e-5

ClCN = 0.6564e-7 Al = 0.1604e-4 Al+ = 0.4824e-5 Al2 = 0.4158e-11

AlO = 0.3230e-3 AlO- = 0.6474e-8 AlO2 = 0.4049e-4 AlO2- = 0.2361e-9

Al2O = 0.1714e-5 Al2O2 = 0.7238e-5 Al2O3(c) = 3.8869 Al2O3 = 0.2963e-6

AlH = 0.2465e-5 AlH2 = 0.7845e-8 AlH3 = 0.5811e-9 AlOH = 0.0069

HAlO = 0.3633e-5 HAlO2 = 0.2243e-3 Al(OH)2 = 0.00214 Al(OH)3 = 0.00901

AlCl = 0.00232 AlCl2 = 0.3924e-3 AlCl3 = 0.3801e-3 Al2Cl6 = 0.4882e-11

ClAlO = 0.00222 Cl2AlO = 0.2159e-4 AlHCl = 0.4074e-5 AlH2Cl = 0.1153e-6

AlHCl2=0.2074e-4 ClAlOH=0.00204 ClAl(OH)2=0.00831 Cl2AlOH= 0.00695

AlN = 0.1767e-7

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=3400 K (единицы СИ):

p=5 T=3400 v=0.14335 S=8.18762 I=-4546.61

U=-5200.51 M=29.2261 Cp=1.8101 k=1.13182 Cp'=3.81518

k'=1.13381 Ap=0.0004397 Bv=0.0004281 Gt=0.209243e-6 MMg=23.8724

Rg=348.283 Cpg=1.94863 kg=1.21763 Cp'g=5.14888 k'g=1.16816

Mu=0.000095 Lt=0.303286 Lt'=1.0843 Pr=0.610092 Pr'=0.450901

A=889.536 z=0.39472 Bm=0.146827

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.2585e-6 O = 0.12686 O- = 0.1426e-7 O2 = 0.22007

O2+ = 0.2296e-9 O2- = 0.2464e-8 O3 = 0.4820e-6 H = 0.4708

H+ = 0.1445e-11 H- = 0.3507e-8 H2 = 1.9935 H3+ = 0.3931e-10

OH = 0.91526 OH+ = 0.5772e-10 OH- = 0.1299e-6 HO2 = 0.00103

HO2- = 0.2471e-10 H2O = 9.0152 H2O+ = 0.3859e-8 H2O2 = 0.1782e-3

H3O+ = 0.6877e-6 Cl = 0.41727 Cl+ = 0.3253e-10 Cl- = 0.2001e-4

Cl2 = 0.00112 ClO = 0.00219 ClO2 = 0.2116e-6 Cl2O = 0.5537e-7

HCl = 2.6638 HOCl = 0.00118 N = 0.1887e-3 N2 = 3.813

N3 = 0.1263e-8 NO = 0.16466 NO+ = 0.5063e-6 NO2 = 0.1089e-3

NO2+ = 0.1265e-10 NO2- = 0.2511e-9 N2O = 0.2980e-4 N2O3 = 0.3943e-10

NH = 0.9635e-4 NH2 = 0.6226e-4 NH3 = 0.5848e-4 NH4+ = 0.1410e-9

N2H2 = 0.1063e-7 N2H4 = 0.1703e-11 HN3 = 0.6335e-9 HNO = 0.1642e-3

HNO2 = 0.2229e-4 HNO3 = 0.2804e-8 NH2OH = 0.7528e-7 ClNO = 0.2704e-4

ClNO2 = 0.1481e-8 C = 0.5619e-8 CO = 3.5281 CO+ = 0.1011e-10

CO2 = 1.947 CO2+ = 0.5862e-10 C2O = 0.1335e-8 C3O2 = 0.1200e-11

CH = 0.2793e-8 CH2 = 0.4741e-8 CH3 = 0.1111e-7 CH4 = 0.3450e-8

C2H2 = 0.2106e-10 HCO = 0.1731e-3 HCO+ = 0.1655e-7 COOH = 0.1406e-3

H2CO =0.5814e-5 HCOOH =0.2156e-4 CH2O2 =0.2156e-4 CH3O =0.1694e-9

CH4O = 0.2945e-9 CH2OH = 0.7187e-8 CCl = 0.1123e-7 CCl2 = 0.1990e-9

ClCO = 0.3668e-4 Cl2CO = 0.5034e-7 CHCl = 0.1424e-8 CH2Cl = 0.1810e-8

CH3Cl =0.1745e-9 CHCl2 =0.1171e-9 CH2Cl2 =0.5266e-11 HClCO=0.1257e-5

CN = 0.2633e-6 CN- = 0.6213e-10 NCN = 0.5455e-10 NCO = 0.4611e-6

HCN = 0.8628e-5 HNC = 0.1827e-5 ClCN = 0.9360e-7 Al = 0.9486e-4

Al+ = 0.1928e-4 Al2 = 0.9928e-10 AlO = 0.00159 AlO- = 0.7779e-7

AlO2 = 0.2309e-3 AlO2- = 0.2880e-8 Al2O = 0.1438e-4 Al2O2 = 0.5224e-4

Al2O3(c) = 3.8713 Al2O3 = 0.2360e-5 AlH = 0.1283e-4 AlH2 = 0.4537e-7

AlH3 = 0.2609e-8 AlOH = 0.01981 HAlO = 0.1623e-4 HAlO2 = 0.6571e-3

Al(OH)2 = 0.00482 Al(OH)3 = 0.01079 AlCl = 0.00635 AlCl2 = 0.7679e-3

AlCl3 = 0.3912e-3 Al2Cl6 = 0.4253e-11 ClAlO = 0.00523 Cl2AlO = 0.4476e-4

AlHCl = 0.1349e-4 AlH2Cl = 0.3181e-6 AlHCl2 = 0.3457e-4 ClAlOH = 0.00429

ClAl(OH)2 = 0.00969 Cl2AlOH = 0.00755 AlN = 0.1335e-6 AlC=0.1446e-11

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=3600 K (единицы СИ):

p=5 T=3600 v=0.157078 S=8.42813 I=-3704.3

U=-4424.64 M=30.0755 Cp=1.81559 k=1.13657 Cp'=4.63435

k'=1.14978 Ap=0.000476 Bv=0.0004572 Gt=0.212260e-6 MMg=23.2043

Rg=358.311 Cpg=1.95558 kg=1.22433 Cp'g=6.2452 k'g=1.18231

Mu=0.0000985 Lt=0.32354 Lt'=1.48926 Pr=0.595562 Pr'=0.413195

A=931.291 z=0.391133 Bm=0.144169

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.1491e-5 O = 0.28161 O+ = 0.2027e-11 O- = 0.1157e-6

O2 = 0.38152 O2+ = 0.8080e-9 O2- = 0.1905e-7 O3 = 0.1596e-5

H = 0.81538 H+ = 0.6826e-11 H- = 0.2543e-7 H2 = 2.3325

H3+ = 0.8687e-10 OH = 1.3961 OH+ = 0.2117e-9 OH- = 0.6761e-6

HO2 = 0.00192 HO2- = 0.1800e-9 H2O = 8.3248 H2O+ = 0.8112e-8

H2O2 = 0.2661e-3 H3O+ = 0.7182e-6 Cl = 0.57079 Cl+ = 0.1080e-9

Cl- = 0.6626e-4 Cl2 = 0.00122 ClO = 0.00369 ClO2 = 0.4663e-6

Cl2O = 0.9123e-7 HCl = 2.4851 HOCl = 0.00146 N = 0.4937e-3

N2 = 3.7663 N3 = 0.2958e-8 NO = 0.25729 NO+ = 0.9432e-6

NO2 = 0.1995e-3 NO2+ = 0.3074e-10 NO2- = 0.1406e-8 N2O = 0.4621e-4

N2O3 = 0.1049e-9 NH = 0.2102e-3 NH2 = 0.1034e-3 NH3 = 0.6451e-4

NH4+ = 0.1309e-9 N2H2 = 0.1886e-7 N2H4 = 0.2648e-11 HN3 = 0.1192e-8

HNO = 0.2859e-3 HNO2 = 0.3502e-4 HNO3 = 0.5204e-8 NH2OH = 0.1111e-6

ClNO = 0.4128e-4 ClNO2 = 0.2731e-8 C = 0.2482e-7 CO = 3.8559

CO+ = 0.3262e-10 CO2 = 1.6191 CO2+ = 0.1394e-9 C2O = 0.3460e-8 C3O2 = 0.1914e-11 CH = 0.1031e-7 CH2 = 0.1211e-7 CH3 = 0.1880e-7

CH4 = 0.4208e-8 C2H = 0.2663e-11 C2H2 = 0.4206e-10 HCO = 0.2716e-3

HCO+ = 0.2509e-7 COOH = 0.1763e-3 H2CO = 0.7259e-5 HCOOH = 0.2124e-4

CH2O2 = 0.2124e-4 CH3O =0.2887e-9 CH4O =0.3478e-9 CH2OH =0.1162e-7

CCl = 0.2902e-7 CCl2 = 0.3491e-9 ClCO = 0.4990e-4 Cl2CO = 0.4839e-7

CHCl = 0.3046e-8 CH2Cl = 0.2815e-8 CH3Cl = 0.1962e-9 CHCl2 = 0.1636e-9

CH2Cl2 = 0.5647e-11 C2HCl = 0.1670e-11 HClCO = 0.1374e-5 CN = 0.6539e-6

CN- = 0.3569e-9 NCN = 0.1552e-9 CNN = 0.2058e-11 C2N2 = 0.1849e-11

NCO = 0.8976e-6 HCN = 0.1254e-4 HNC = 0.2994e-5 ClCN = 0.1332e-6

Al = 0.5182e-3 Al+ = 0.6773e-4 Al2 = 0.2081e-8 AlO = 0.00685

AlO- = 0.8091e-6 AlO2 = 0.00104 AlO2- = 0.2812e-7 Al2O = 0.1101e-3

Al2O2 = 0.3243e-3 Al2O3(c) = 3.8361 Al2O3 = 0.1482e-4 AlH = 0.6360e-4

AlH2 = 0.2506e-6 AlH3 = 0.1170e-7 AlOH = 0.05347 HAlO = 0.6493e-4

HAlO2 = 0.00167 Al(OH)2 = 0.00989 Al(OH)3 = 0.01187 AlCl = 0.01665

AlCl2 = 0.00142 AlCl3 = 0.3907e-3 Al2Cl6 = 0.3543e-11 ClAlO = 0.01112

Cl2AlO =0.8088e-4 AlHCl =0.4256e-4 AlH2Cl =0.8675e-6 AlHCl2 = 0.5651e-4

ClAlOH = 0.00836 ClAl(OH)2 = 0.01054 Cl2AlOH = 0.00781 AlN = 0.9013e-6

AlC = 0.1624e-10

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=3800 K (единицы СИ):

p=5 T=3800 v=0.173543 S=8.7058 I=-2676.2

U=-3475.84 M=31.2182 Cp=1.81786 k=1.14366 Cp'=5.70991

k'=1.17175 Ap=0.0005235 Bv=0.0004939 Gt=0.215947e-6 MMg=22.4738

Rg=369.957 Cpg=1.95441 kg=1.23349 Cp'g=7.31205 k'g=1.20227

Mu=0.0001018 Lt=0.344775 Lt'=1.94687 Pr=0.577314 Pr'=0.382504

A=979.453 z=0.382777 Bm=0.141781

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.7718e-5 O = 0.55136 O+ = 0.9239e-11 O- = 0.7633e-6

O2 = 0.56554 O2+ = 0.2135e-8 O2- = 0.1135e-6 O3 = 0.4055e-5

H = 1.3537 H+ = 0.2635e-10 H- = 0.1605e-6 H2 = 2.725

H2+ = 0.2630e-11 H3+ = 0.1697e-9 OH = 1.9523 OH+ = 0.6152e-9

OH- = 0.2994e-5 HO2 = 0.00304 HO2- = 0.1016e-8 H2O = 7.4357

H2O+ = 0.1433e-7 H2O2 = 0.3452e-3 H3O+ = 0.6783e-6 Cl = 0.73596

Cl+ = 0.2917e-9 Cl- = 0.1990e-3 Cl2 = 0.00123 ClO = 0.00541

ClO2 = 0.8219e-6 Cl2O = 0.1258e-6 HCl = 2.2737 HOCl = 0.00162

N = 0.00118 N2 = 3.7121 N3 = 0.6265e-8 NO = 0.3643

NO+ = 0.1480e-5 NO2 = 0.3082e-3 NO2+ = 0.5789e-10 NO2- = 0.6225e-8

NO3- = 0.3824e-11 N2O = 0.6454e-4 N2O3 = 0.2121e-9 NH = 0.4252e-3

NH2 = 0.1641e-3 NH3 = 0.7098e-4 NH4+ = 0.1170e-9 N2H2 = 0.3157e-7

N2H4 = 0.3929e-11 HN3 = 0.2078e-8 HNO = 0.4474e-3 HNO2 = 0.4714e-4

HNO3 = 0.7684e-8 NH2OH = 0.1501e-6 ClNO = 0.5512e-4 ClNO2 = 0.4071e-8

C = 0.9940e-7 C2 = 0.1244e-11 CO = 4.1754 CO+ = 0.8812e-10

CO2 = 1.2994 CO2+ = 0.2711e-9 C2O = 0.8498e-8 C3O2 = 0.3003e-11

CH = 0.3517e-7 CH2 = 0.2972e-7 CH3 = 0.3195e-7 CH4 = 0.5368e-8

C2H = 0.9452e-11 C2H2 = 0.8671e-10 HCO = 0.4067e-3 HCO+ = 0.3454e-7

COOH = 0.2043e-3 H2CO =0.8869e-5 HCOOH =0.1988e-4 CH2O2 = 0.1988e-4

CH3O = 0.4667e-9 CH4O = 0.4050e-9 CH2OH = 0.1794e-7 CCl = 0.6898e-7

CCl2 = 0.5635e-9 ClCO = 0.6307e-4 Cl2CO = 0.4307e-7 CHCl = 0.6133e-8

CH2Cl=0.4253e-8 CH3Cl=0.2220e-9 CHCl2=0.2154e-9 CH2Cl2=0.5878e-11

C2HCl = 0.3118e-11 HClCO = 0.1431e-5 CN = 0.1553e-5 CN- = 0.1890e-8

NCN = 0.4123e-9 CNN = 0.6856e-11 C2N2 = 0.3808e-11 NCO = 0.1617e-5

HCN = 0.1842e-4 HNC = 0.4897e-5 ClCN = 0.1844e-6 Al = 0.00259

Al+ = 0.2159e-3 Al2 = 0.3728e-7 AlO = 0.02618 AlO- = 0.7168e-5

AlO2 = 0.00394 AlO2- = 0.2227e-6 Al2O = 0.7579e-3 Al2O2 = 0.00175

Al2O3(c) = 3.7541 Al2O3 = 0.7648e-4 AlH = 0.2918e-3 AlH2 = 0.1265e-5

AlH3 = 0.4904e-7 AlOH = 0.13438 HAlO = 0.2321e-3 HAlO2 = 0.00376

Al(OH)2 = 0.01839 Al(OH)3 = 0.01199 AlCl = 0.04136 AlCl2 = 0.00249

AlCl3 = 0.3772e-3 Al2Cl6 = 0.2786e-11 ClAlO = 0.02166 Cl2AlO = 0.1307e-3

AlHCl = 0.1249e-3 AlH2Cl = 0.2236e-5 AlHCl2 = 0.8839e-4 ClAlOH = 0.01506

ClAl(OH)2 = 0.01069 Cl2AlOH = 0.00768 AlN = 0.5403e-5 AlC = 0.1618e-9

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=4000 K (единицы СИ):

p=5 T=4000 v=0.193991 S=9.0377 I=-1380.62

U=-2278.28 M=32.729 Cp=1.81331 k=1.15437 Cp'=7.39638

k'=1.20311 Ap=0.0005965 Bv=0.0005489 Gt=0.221118e-6 MMg=21.828

Rg=380.903 Cpg=1.9364 kg=1.24488 Cp'g=8.28697 k'g=1.2265

Mu=0.0001048 Lt=0.364513 Lt'=2.44236 Pr=0.556535 Pr'=0.355464

A=1036.22 z=0.363385 Bm=0.14077

Равновесные концентрации (моль/кг):

e- = 0.3554e-4 O = 0.99184 O+ = 0.3479e-10 O- = 0.4185e-5

O2 = 0.76336 O2+ = 0.4739e-8 O2- = 0.5476e-6 O3 = 0.8693e-5

H = 2.1437 H+ = 0.8723e-10 H- = 0.8640e-6 H2 = 3.0938

H2+ = 0.8447e-11 H3+ = 0.2944e-9 OH = 2.5512 OH+ = 0.1520e-8

OH- = 0.1128e-4 HO2 = 0.00428 HO2- = 0.4593e-8 H2O = 6.3921

H2O+ = 0.2229e-7 H2O2 = 0.4003e-3 H3O+ = 0.5903e-6 Cl = 0.905

Cl+ = 0.6830e-9 Cl- = 0.5352e-3 Cl2 = 0.00117 ClO = 0.00719

ClO2 = 0.1244e-5 Cl2O = 0.1518e-6 HCl = 2.0194 HOCl = 0.00165

N = 0.00259 N2 = 3.6513 N2+ = 0.2259e-11 N3 = 0.1215e-7

NO = 0.48376 NO+ = 0.2110e-5 NO2 = 0.4274e-3 NO2+ = 0.9392e-10

NO2- = 0.2272e-7 NO3- = 0.1349e-10 N2O = 0.8393e-4 N2O3 = 0.3572e-9

NH = 0.7957e-3 NH2 = 0.2430e-3 NH3 = 0.7440e-4 NH4+ = 0.9802e-10

N2H2 = 0.4863e-7 N2H4 = 0.5253e-11 HN3 = 0.3331e-8 HNO = 0.6417e-3

HNO2 = 0.5679e-4 HNO3 = 0.9703e-8 NH2OH = 0.1827e-6

ClNO = 0.6687e-4 ClNO2 = 0.5248e-8 C = 0.3575e-6 C2 = 0.5745e-11

CO = 4.4529 CO+ = 0.2094e-9 CO2 = 1.0216 CO2+ = 0.4626e-9

C2O = 0.1922e-7 C3O2 = 0.4417e-11 CH = 0.1078e-6 CH2 = 0.6650e-7

CH3 = 0.5061e-7 CH4 = 0.6509e-8 C2H = 0.3038e-10 C2H2 = 0.1684e-9

HCO = 0.5716e-3 HCO+ = 0.4408e-7 COOH = 0.2200e-3 H2CO = 0.1023e-4

HCOOH = 0.1740e-4 CH2O2 = 0.1740e-4 CH3O = 0.6822e-9

CH2OH = 0.2514e-7 C2H2O = 0.1010e-11 CCl = 0.1487e-6

ClCO = 0.7419e-4 Cl2CO = 0.3551e-7 CHCl = 0.1123e-7 CH2Cl = 0.5909e-8

CH3Cl=0.2344e-9 CHCl2=0.2579e-9 CH2Cl2 = 0.5613e-11 C2HCl = 0.5392e-11

HClCO = 0.1394e-5 CN = 0.3453e-5 CN- = 0.8822e-8 NCN = 0.1003e-8

CNN = 0.2045e-10 C2N2 = 0.7464e-11 NCO = 0.2702e-5 HCN = 0.2615e-4

HNC = 0.7654e-5 ClCN = 0.2420e-6 Al = 0.01176 Al+ = 0.6399e-3

Al2 = 0.5581e-6 AlO = 0.09016 AlO- = 0.5361e-4 AlO2 = 0.0129

AlO2- = 0.1453e-5 Al2O = 0.00463 Al2O2 = 0.00829 Al2O3(c) = 3.5639

Al2O3 = 0.3358e-3 AlH = 0.00121 AlH2 = 0.5610e-5 AlH3 = 0.1813e-6

AlOH = 0.31171 HAlO = 0.7393e-3 HAlO2 = 0.00761 Al(OH)2 = 0.0309

Al(OH)3 = 0.01106 AlCl = 0.09602 AlCl2 = 0.00403 AlCl3 = 0.3447e-3

Al2Cl6 = 0.1969e-11 ClAlO = 0.03894 Cl2AlO = 0.1907e-3

AlH2Cl = 0.5202e-5 AlHCl2 = 0.1279e-3 ClAlOH = 0.02484

Cl2AlOH = 0.00706 AlN = 0.2861e-4 AlC = 0.1386e-8