



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  
(Группа)

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Е.И. Гаврилова  
(И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

В.В. Козичев  
(И.О.Фамилия)

Консультант по технологической части

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

М.А. Комков  
(И.О.Фамилия)

Консультант по охране труда и экологии

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

А.А. Аграфонова  
(И.О.Фамилия)

Консультант по  
организационно-экономической части

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Э.Б. Мазурин  
(И.О.Фамилия)

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Е.И. Бардакова  
(И.О.Фамилия)

## РЕФЕРАТ

Работа выполнена в следующем объеме:

- графические работы на 10 листах формата А1;
- расчетно-пояснительная записка на 187 листах формата А4, 25 рисунков, 56 таблиц, 14 источников.

Объектом разработки является маршевый ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя.

В конструкторской части дипломного проекта разработан сам РДТТ, заряд, сопловой блок, воспламенительное устройство, получены основные зависимости.

В исследовательской части был определен качественный характер зависимости параметров двигателя от параметров используемых топлив.

Технологическая часть посвящена разработке технологического процесса изготовления заряда из смесового твердого ракетного топлива.

В части экологии и охраны труда проведен общий анализ влияния вредных и опасных факторов как на человека, так и на окружающую среду. Проведен расчет и анализ шумового воздействия на кабину персонала во время испытаний.

В организационно-экономической части определены затраты на проектирование РДТТ третьей ступени, изготовление опытных образцов и их испытания.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ .....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Конструкторская часть .....	8
1.1. Задание на проектирование .....	9
1.2. Проектирование заряда твердого топлива .....	10
1.2.1. Выбор формы заряда .....	10
1.2.2. Выбор твердого ракетного топлива .....	12
1.2.3. Термодинамический расчет характеристик .....	16
1.2.4. Расчет внутрибаллистических характеристик .....	16
1.2.5. Расчет отклонений внутрибаллистических параметров .....	21
1.3. Расчет тепловых потоков и толщины слоя теплозащитного покрытия в КС .....	24
1.4. Расчет и проектирование корпуса РДТТ .....	35
1.4.1. Расчет толщины силовой оболочки корпуса .....	36
1.4.2. Расчет соединений корпусных деталей .....	39
1.5. Расчет и проектирование соплового блока .....	40
1.5.1. Профилирование сужающейся части сопла.....	41
1.5.2. Профилирование трансзвуковой части сопла.....	42
1.5.3. Профилирование сверхзвуковой части сопла.....	42
1.5.4. Особенности проектирования соплового блока .....	43
1.6. Расчет тепловых потоков в сопле РДТТ.....	43
1.6.1. Расчет конвективного теплового потока по длине сопла.....	43
1.6.2. Расчет радиационного теплового потока по длине сопла .....	55
1.7. Расчет потерь удельного импульса .....	58

1.8.	Расчет воспламенительного устройства .....	59
1.8.1.	Расчет заряда основного воспламенителя.....	60
1.8.2.	Расчет толщины бронирующего покрытия основного воспламенителя .....	63
1.8.3.	Расчет толщины теплозащитного покрытия.....	64
1.8.4.	Расчет толщины стенки корпуса воспламенителя .....	66
1.8.5.	Расчет предвоспламенителя.....	67
1.9.	Расчет и проектирование сопловой заглушки .....	68
2.	Исследовательская часть .....	70
	Введение.....	71
2.1.	Массоприход с поверхности горения .....	72
2.2.	Влияние свойств топлив на РДТТ .....	72
2.3.	Обоснование выбора топливной пары.....	75
3.	Технологическая часть .....	77
	Введение.....	78
3.1.	Схема технологического процесса изготовления заряда.....	79
3.2.	Разработка операционного технологического процесса.....	84
3.3.	Описание операций.....	88
3.4.	Расчет шнекового экструдера.....	94
4.	Охрана труда и экология .....	100
	Введение.....	101
4.1.	Анализ вредных и опасных факторов.....	102
4.2.	Оценка выбросов при огневых стендовых испытаниях .....	103
4.3.	Расчет звукоизоляции кабины для персонала.....	106

5. Организационно-экономическая часть .....	111
Введение.....	112
5.1. Основные этапы НИиОКР .....	113
5.2. Затраты на проектирование, изготовление и испытание.....	115
5.2.1. Расчет заработной платы.....	115
5.2.2. Затраты на оборудование .....	122
5.2.3. Затраты на вспомогательное ПО .....	123
5.2.4. Затраты на материалы .....	123
5.2.5. Суммарные затраты на проектирование .....	124
5.2.6. Затраты на испытания .....	125
5.2.7. Полные затраты.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	129
Приложение А. Характеристики ТРТ .....	131
Приложение Б. Термодинамический расчет .....	135
Приложения В. Теплофизические свойства ПС .....	139
Приложение Г. Зависимость расхода и угла наклона конуса поверхности горения в широком диапазоне давлений .....	157
Приложение Д. Результаты расчета расхода для топливных пар в зависимости от давления .....	159
Приложение Е. Результаты расчета угла наклона конуса для топливных пар в зависимости от давления .....	165
Приложение Ж. Графическая часть дипломного проекта .....	171

## 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 качестве 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 жидкостным ракетным двигателем (ЖРД):

1. относительная 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. Малая численность персонала для обслуживания и подготовки к пуску;
3. значительные гарантийные сроки хранения РДТТ в снаряженном состоянии на стартовых позициях;
4. высокая надежность, возможность прямого контроля большинства составных частей в процессе производства;

Для достижения главной цели дипломного проекта определены 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 смесового твердого ракетного топлива.

В части посвященной экологии 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.

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

## **1. Конструкторская часть**



## 1.1. 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 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Импульс тяги РДТТ $J_t$ , кН·с	1500
Время работы двигателя $\tau_p$ , с	$45 \pm 5$
Среднее давление в камере сгорания $p_k$ , МПа	5
Диаметр «ведомого» заряда $D$ , м	0,5
Диаметр «ведущего» заряда $d$ , м	0,02

## **1.2. Проектирование заряда твердого топлива**

### **1.2.1. 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 1.1 представлен общий вид заряда с внутренней конической поверхностью горения и осевым ускорительным зарядом.

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

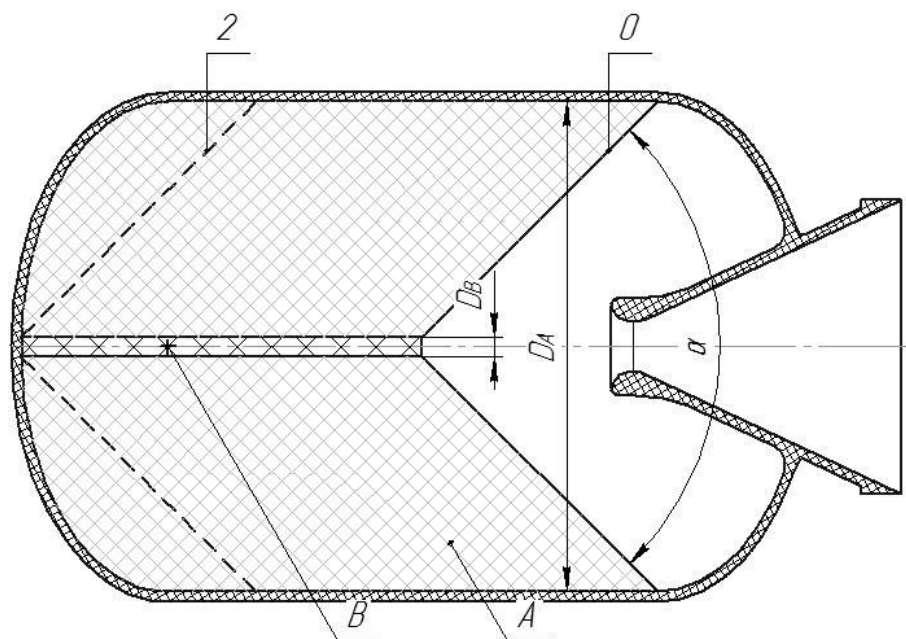


Рисунок 1.1 – Общий вид заряда с внутренней конической поверхностью горения и осевым ускорительным зарядом. А – заряд основного топлива, В – центральный заряд быстрогорящего («ведущего») топлива, 0 – исходная поверхность горения, 2 – поверхность горения, соответствующая началу догорания остаточной части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

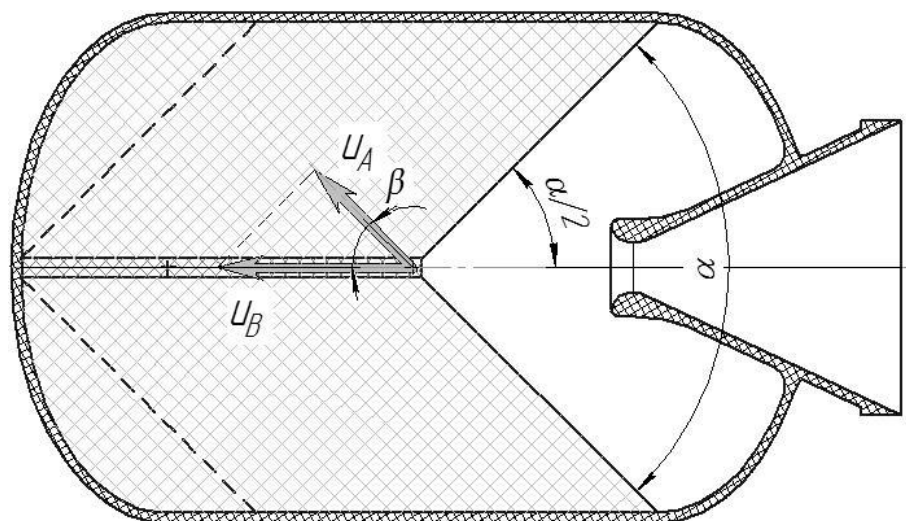


Рисунок 1.2 – Параметры горения составного заряда с коническим углублением.

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.

### **1.2.2. 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]:

$$\dot{m} = \rho_t \cdot u_1 \cdot p_k^{\nu} \cdot F_r,$$

где  $\rho_t$  – плотность топлива,  $u_1$  – единичная скорость горения,  $\nu$  – показатель в законе горения,  $p_k$  – давление в камере сгорания,  $F_r$  – площадь горения.

Тогда массоприход с поверхности горения для рассматриваемой конфигурации:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \rho_{t1} \cdot u_{r1} \cdot F_{r1} + \rho_{t2} \cdot u_{r2} \cdot F_{r2},$$

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

Угол наклона конуса горячей поверхности определяется следующей зависимостью:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{u_{r1}}{u_{r2}} = \frac{u_{11} \cdot p_k^{v_1}}{u_{12} \cdot p_k^{v_2}} = \frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_k^{v_1 - v_2}.$$

Тогда площадь горения «ведомого»:

$$F_{r1} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2 - d^2}{\frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_k^{v_1 - v_2}},$$

где  $D$  – внешний диаметр «ведомого»,  $d$  – внутренний диаметр «ведомого».

Получаем итоговую зависимость:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \rho_{r1} \cdot u_{12} \cdot p_k^{v_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) + \rho_{r2} \cdot u_{12} \cdot p_k^{v_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

В результате расчета, учитывая полученные значения расхода топлива при заданном диаметре заряда и угол наклона конуса горячей 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 1.2 и таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Характеристики топлива ПХН – 2М

Состав	Окислитель	перхлорат нитрония, %	30
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	60
	ГСВ	поливинилхлорид, %	10
Условная химическая формула			$C_{5,268}H_{4,800}O_{12,375}N_{2,062}Cl_{3,663}Al_{22,237}$
Энтальпия образования $H_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			-64,39
Закон горения			$U = 14,5 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0.19}$
Плотность топлива $\rho_t$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			2430
Теплопроводность $c$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$0,932 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			4,5
Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $\frac{1}{\text{К}}$			$2 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения $p$ , кПа			0,7
Эксплуатационный интервал температур $T, \text{К}$			[240;293]

Таблица 1.3 – Характеристики топлива ПХА – 4М

Состав	Окислитель	перхлорат аммония, %	35
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	20
	ГСВ	нитразол, %	45
Условная химическая формула			$C_{5,213}H_{24,948}O_{28,408}N_{7,428}Cl_{2,979}Al_{7,413}$
Энтальпия образования $H_{\Pi}$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			–2034
Закон горения			$U = 6,49 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0.24}$
Плотность топлива $\rho_t$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			1800
Теплопроводность $c$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$1,084 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			0,94
Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $\frac{1}{\text{К}}$			$3,4 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения $p$ , кПа			30
Эксплуатационный интервал температур $T, \text{К}$			[220;320]

### 1.2.3. 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.

### 1.2.4. 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  $T_k = 3906,2$  К, показателя адиабаты  $k = 1,19$ , удельного импульса  $J_y = 2938,36 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ .

Приведенная скорость потока продуктов сгорания в выходном сечении сопла:

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{1,19+1}{1,19-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,03 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,19-1}{1,19}} \right]} = 2,544.$$

Газодинамические функции:

$$\begin{aligned} f(\lambda_a) &= \left( 1 + \lambda_a^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_a^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= \left( 1 + 2,544^2 \right) \cdot \left( 1 - \frac{1,19-1}{1,19+1} \cdot 2,544^2 \right)^{\frac{1}{1,19-1}} = 0,1003, \end{aligned}$$



$$q(\lambda_a) = \lambda_a \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_a^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} =$$

$$= 2,951 \cdot \left(1 - \frac{1,19-1}{1,19+1} \cdot 2,544^2\right)^{\frac{1}{1,19-1}} \cdot \left(\frac{1,19+1}{2}\right)^{\frac{1}{1,19-1}} = 0,055.$$

Комплекс:

$$A(k) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1}} = \left(\frac{2}{1,19+1}\right)^{\frac{1}{1,19-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,19}{1,19+1}} = 0,646.$$

Расход:

$$\dot{m}_T = \rho_{T1} \cdot u_{12} \cdot p_K^{\nu_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) + \rho_{T2} \cdot u_{12} \cdot p_K^{\nu_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 10,823 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Площадь критического сечения:

$$F_{\text{кр}} = \frac{\dot{m}_T \cdot \sqrt{\chi \cdot R \cdot T_K}}{\varphi_c \cdot A(k) \cdot p_K} =$$

$$= \frac{10,823 \cdot \sqrt{0,95 \cdot 376,087 \cdot 3906,2}}{0,93 \cdot 0,646 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,00426 \text{ м}^2,$$

где  $\chi = 0,95$  – коэффициент, учитывающий потери энергии на нагрев стенок камеры сгорания и на неполноту сгорания твердого топлива,  $\varphi_c = 0,93$  – коэффициент потерь в сопле.

Диаметр критического сечения:

$$d_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{кр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00426}{\pi}} = 73,6 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла:

$$F_a = \frac{F_{\text{кр}}}{q(\lambda_a)} = \frac{0,00426}{0,055} = 0,077 \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения сопла:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot F_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,077}{\pi}} = 314 \text{ мм}.$$

Площадь горения:

$$F_r = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(D^2 - d^2)}{\frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot (p_k)^{v_1 - v_2}} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} =$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(0,5^2 - 0,02^2)}{\frac{6,49}{14,5} \cdot \left(\frac{5 \cdot 10^6}{98066,5}\right)^{0,24 - 0,19}} + \frac{\pi \cdot 0,023^2}{4} = 0,36 \text{ м}^2.$$

Скорость горения:

$$u = u_{11} \cdot \left(\frac{p_k}{98066,5}\right)^v = 6,49 \cdot \left(\frac{5 \cdot 10^6}{98066,5}\right)^{0,24} = 16,674 \frac{\text{мм}}{\text{с}},$$

где  $u_{11}$  – единичная скорость горения «ведомого» топлива;  $v$  – показатель в законе горения.

Для расчёта изменения поверхности горения применяется геометрический метод, в основе которого лежит допущение о равномерности поля скорости горения топлива. Из этого допущения следует, что скорость горения всегда нормальна к поверхности горения, и процесс выгорания происходит параллельными 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:

$$p_{ki} = \left[ \frac{F_{gi} \cdot \rho_T \cdot \left(\frac{u_1}{98066,5^v}\right) \cdot \sqrt{\chi \cdot R \cdot T_k}}{\varphi_c \cdot F_{кр} \cdot A(k)} \right]^{\frac{1}{1-v}}.$$

Скорость горения:

$$u_i = u_1 \cdot \left(\frac{p_{ki}}{98066,5}\right)^v.$$

Время работы:

$$t_{pi} = t_{pi-1} + \frac{e_i - e_{i-1}}{u_{\Gamma i-1}}.$$

Тяга:

$$P_i = \varphi_c \cdot p_{ki} \cdot F_{кр} \cdot \frac{f(\lambda_a)}{q(\lambda_a)}.$$

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

№	$t_p$ , с	$e$ , м	$F_{\Gamma}$ , м <sup>3</sup>	$p_k$ , МПа	$u$ , $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$P$ , Н
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

№	$t_p, \text{ c}$	$e, \text{ м}$	$F_r, \text{ м}^3$	$p_k, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$P, \text{ Н}$
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:

$$J_T = \int_{\tau_0}^{\tau_1} P(\tau) d\tau = 1549,069 \text{ кН} \cdot \text{с}.$$

### 1.2.5. 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 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  $\delta u_{1\text{сл}} = \pm 8 \%$ .

Тогда:

$$\delta p_{\text{к сл min}} = \left( \overline{u_{1\text{сл min}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = (0,92)^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = -0,104,$$

$$\delta p_{\text{к сл max}} = \left( \overline{u_{1\text{сл max}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = (1,08)^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = 0,107.$$

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

Отклонения из-за изменения начальной температуры заряда:

$$\overline{u_{1\text{ T min}}} = 1 + u_1 (T_{\text{min}} - 293) = 1 + 0,006 \cdot (223 - 293) = 0,546,$$

$$\overline{u_{1\text{ T max}}} = 1 + u_1 (T_{\text{max}} - 293) = 1 + 0,006 \cdot (323 - 293) = 1,195.$$

$$\delta u_{1\text{ T min}} = \overline{u_{1\text{ T min}}} - 1 = 0,546 - 1 = -0,454,$$

$$\delta u_{1\text{ T max}} = \overline{u_{1\text{ T max}}} - 1 = 1,195 - 1 = 0,195.$$

$$\delta p_{\text{к T min}} = \left( \overline{u_{1\text{ T min}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = (0,546)^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = -0,549,$$

$$\delta p_{\kappa \text{ T max}} = \left( \overline{u_{1 \text{ T max}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = (1,195)^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = 0,264.$$

Отклонения по давлению в камере сгорания:

$$\delta p_{\kappa \text{ min}} = \delta p_{\kappa \text{ сл min}} + \delta p_{\kappa \text{ T min}} = -0,104 - 0,549 = -0,653,$$

$$\delta p_{\kappa \text{ max}} = \delta p_{\kappa \text{ сл max}} + \delta p_{\kappa \text{ T max}} = 0,107 + 0,264 = 0,370.$$

Давление в камере сгорания:

$$p_{\kappa i \text{ min}} = p_{\kappa i} \cdot (1 + \delta p_{\kappa \text{ min}}),$$

$$p_{\kappa i \text{ max}} = p_{\kappa i} \cdot (1 + \delta p_{\kappa \text{ max}}).$$

Скорость горения:

$$u_{\Gamma i \text{ min}} = u_{\Gamma i} \cdot (1 + \delta u_{1 \text{ T min}}),$$

$$u_{\Gamma i \text{ max}} = u_{\Gamma i} \cdot (1 + \delta u_{1 \text{ T max}}).$$

Время работы:

$$t_{\text{pi}} = t_{\text{pi-1}} + \frac{e_i - e_{i-1}}{u_{\Gamma i-1}}.$$

Тяга:

$$P_i = \varphi_c \cdot p_{\kappa i} \cdot F_{\text{кр}} \cdot \frac{f(\lambda_a)}{q(\lambda_a)}.$$

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

$e, \text{ мм}$	$F_{\Gamma}, \text{ м}^3$	MIN				MAX			
		$p_{\kappa}, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$	$p_{\kappa}, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$
0	0,360	1,733	9,098	0	12,50	6,852	19,92	0	49,40
0,022	0,360	1,733	9,098	2,4	12,50	6,852	19,92	1,1	49,40
0,045	0,360	1,733	9,098	4,8	12,50	6,852	19,92	2,2	49,40
0,067	0,360	1,733	9,098	7,3	12,50	6,852	19,92	3,3	49,40
0,089	0,360	1,733	9,098	9,7	12,50	6,852	19,92	4,5	49,40

$e, \text{ мм}$	$F_r, \text{ М}^3$	MIN				MAX			
		$p_k, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$	$p_k, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$
0,111	0,360	1,733	9,098	12,2	12,50	6,852	19,92	5,6	49,40
0,133	0,360	1,733	9,098	14,6	12,50	6,852	19,92	6,7	49,40
0,156	0,360	1,733	9,098	17,1	12,50	6,852	19,92	7,8	49,40
0,178	0,360	1,733	9,098	19,6	12,50	6,852	19,92	8,9	49,40
0,200	0,360	1,733	9,098	21,9	12,50	6,852	19,92	10,1	49,40
0,222	0,360	1,733	9,098	24,4	12,50	6,852	19,92	11,2	49,40
0,245	0,360	1,733	9,098	26,9	12,50	6,852	19,92	12,3	49,40
0,267	0,360	1,733	9,098	29,3	12,50	6,852	19,92	13,4	49,40
0,289	0,360	1,733	9,098	31,8	12,50	6,852	19,92	14,5	49,40
0,311	0,360	1,733	9,098	34,2	12,50	6,852	19,92	15,6	49,40
0,334	0,360	1,733	9,098	36,7	12,50	6,852	19,92	16,7	49,40
0,356	0,360	1,733	9,098	39,1	12,50	6,852	19,92	17,9	49,40
0,378	0,360	1,733	9,098	41,5	12,50	6,852	19,92	18,9	49,40
0,400	0,360	1,733	9,098	43,9	12,50	6,852	19,92	20,1	49,40
0,422	0,360	1,733	9,098	46,4	12,50	6,852	19,92	21,2	49,40
0,445	0,360	1,733	9,098	48,9	12,50	6,852	19,92	22,3	49,40
0,467	0,360	1,733	9,098	51,3	12,50	6,852	19,92	23,4	49,40
0,489	0,360	1,733	9,098	53,8	12,50	6,852	19,92	24,6	49,40
0,511	0,360	1,733	9,098	56,2	12,50	6,852	19,92	25,7	49,40
0,534	0,360	1,733	9,098	58,6	12,50	6,852	19,92	26,8	49,40
0,556	0,360	1,733	9,098	61,1	12,50	6,852	19,92	27,9	49,40
0,578	0,360	1,733	9,098	63,5	12,50	6,852	19,92	29,0	49,40
0,600	0,360	1,733	9,098	65,9	12,50	6,852	19,92	30,1	49,40
0,623	0,360	1,733	9,098	68,4	12,50	6,852	19,92	31,2	49,40
0,645	0,360	1,733	9,098	70,9	12,50	6,852	19,92	32,4	49,40

$e, \text{ мм}$	$F_r, \text{ м}^3$	MIN				MAX			
		$p_k, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$	$p_k, \text{ МПа}$	$u, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_p, \text{ с}$	$P, \text{ кН}$
0,667	0,360	1,733	9,098	73,3	12,50	6,852	19,92	33,5	49,40
0,682	0,356	1,70	9,059	74,9	12,27	6,729	19,83	34,2	48,51
0,697	0,347	1,65	8,99	76,6	11,89	6,518	19,68	34,9	46,99
0,712	0,334	1,57	8,88	78,3	11,28	6,186	19,43	35,7	44,60
0,726	0,314	1,45	8,71	79,9	10,42	5,715	19,07	36,5	41,20
0,741	0,287	1,29	8,47	81,7	9,272	5,082	18,54	37,3	36,64
0,756	0,251	1,075	8,11	83,5	7,748	4,247	17,75	38,1	30,62
0,771	0,193	0,76	7,47	85,4	5,49	3,010	16,35	38,9	21,70
0,786	0	0	0	89,4	0	0	0	40,8	0

### 1.3. 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  $p_k = 5 \text{ МПа}$ ;
2. температура  $T_k = 3906,2 \text{ К}$ ;
3. диаметр критического сечения  $d_{кр} = 0,074 \text{ м}$ ;
4. газовая постоянная  $R = 376,087 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;
5. показатель адиабаты  $k = 1,19$ ;
6. массовая доля конденсированных частиц  $z = 0,374$ ;
7. полная энтальпия ПС  $I_k = 2030,06 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;
8. коэффициент динамической вязкости  $\eta = 1,035 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;
9. теплоёмкость продуктов сгорания  $C_p = 6,492 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Теплозащитное покрытие должно обеспечивать:

1. надёжную защиту стенки КС от воздействия тепловых потоков;
2. надёжную 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-волокнутого наполнителя из керамики.

Данный аблятор обладает следующими характеристиками:

1. плотность материала покрытия  $\rho_{п} = 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;
2. удельная теплоёмкость покрытия  $C_{рп} = 2600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;
3. коэффициент теплопроводности  $\lambda_{п} = 0,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;
4. температура поверхности газового тракта  $T_w = 2500 \text{ К}$ ;

5. полная энтальпия материала покрытия  $I_{\pi} = -4 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;

6. массовое содержание связующего  $\varphi = 0,6$ ;

7. удельная теплота абляции материала  $Q_{\pi} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Исходные данные для расчета цилиндрической части представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры цилиндрической части

№	$t, \text{с}$	$W, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$d_3, \text{мм}$
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 1.7.

Таблица 1.7 – Параметры заднего днища

№	$t, \text{с}$	$W, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$d_3, \text{мм}$
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:

$$M = \frac{W}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_k}},$$

где  $W$  – характерная скорость течения газа.

Статическая температура ПС:

$$T_k^1 = \frac{T_k}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2}.$$

Коэффициент восстановления температуры:

$$r = \sqrt[3]{Pr} = \sqrt[3]{0,37} = 0,718,$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля.

Температура ПС на адиабатической стенке:

$$T_r = T_k^1 \cdot \left[ 1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2 \right].$$

Энтальпия ПС на адиабатической стенке:

$$H_r = C_p \cdot T_r,$$

где  $C_p$  – теплоёмкость продуктов сгорания.

Энтальпия ПС при температуре стенки  $T_w$ :

$$H_w = C_p \cdot T_w = 6,492 \cdot 10^3 \cdot 2500 = 16230,975 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Плотность ПС при температуре стенки  $T_w$ :

$$\rho_w = \frac{p_k}{R \cdot T_w} = \frac{5 \cdot 10^6}{376,087 \cdot 2500_w} = 5,318 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Значение числа Рейнольдса и Прандтля у стенки:

$$\text{Re}_w = \frac{\rho_w \cdot W \cdot d_{\text{э}}}{\eta_w},$$

$$\text{Pr}_w = \frac{\eta_w \cdot C_p}{\lambda_w} = \frac{1,035 \cdot 10^{-4} \cdot 6,492}{0,356} = 1,889,$$

где  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный размер области;  $\eta_w$  – коэффициент динамической вязкости;  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности.

Значение числа Стантона на идеальной стенке:

$$St^* = 0,0296 \cdot \text{Re}_w^{-0,2} \cdot \text{Pr}_w^{-0,6} \cdot \left( \frac{H_w}{H_r} \right)^{0,39} \cdot \left( 1 + r \cdot \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{0,11}.$$

Значение числа Стантона для реальных условий:

$$St = St^* \cdot k_b \cdot k_{\text{ш}} \cdot k_{\text{т}} \cdot k_{\text{р}},$$

где  $k_b$  – коэффициент, учитывающий вдув газа в результате разложения газа,  $k_b = 0,9$ ;  $k_{\text{ш}}$  – коэффициент, учитывающий шероховатость стенки,  $k_{\text{ш}} = 1,095$ ;  $k_{\text{т}}$  – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности пульсаций,  $k_{\text{т}} = 1$ ;

$k_p$  – коэффициент, учитывающий влияние конденсированных частиц ПС,  
 $k_p = 1 + 0,0246 \cdot \text{Re}_w^{-0,3} \cdot z^{2,45} = 1.$

Плотность конвективного теплового потока к стенке камеры сгорания:

$$\alpha = \rho_w \cdot W \cdot St \cdot C_p,$$

$$q_k = \alpha (T_k - T_w),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Далее рассчитывается значение плотности радиационного теплового потока.

Значение степени черноты стенки  $\varepsilon_w = 0,8$ .

Для определения степени черноты продуктов сгорания используется методика, изложенная в [7]. Из результатов термодинамического расчета находятся мольные концентрации молекул воды  $C_{\text{H}_2\text{O}} = 6,897 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{КГ}}$  и углекислого газа  $C_{\text{CO}_2} = 1,145 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{КГ}}$ . Парциальные давление указанных молекул рассчитываются с использованием значения молекулярной массы газообразных продуктов сгорания  $\mu_r = 0,022 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$  по зависимостям:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mu_r \cdot p_k = 6,897 \cdot 0,022 \cdot 5 \cdot 10^6 = 7,624 \text{ бар},$$

$$p_{\text{CO}_2} = C_{\text{CO}_2} \cdot \mu_r \cdot p_k = 1,145 \cdot 0,022 \cdot 5 \cdot 10^6 = 1,266 \text{ бар}.$$

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

$$l = 0,9 \cdot d_z.$$

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

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,24,$$

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,035,$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} - \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,24 + 0,035 - 0,24 \cdot 0,035 = 0,267.$$

Будем считать, что плотность конденсированной фазы составляет

$$\rho_{\text{к.ф.}} = 2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:

$$\begin{aligned} d_{43} &= 10,68 \cdot d_{\text{кр}}^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{-11,28 \cdot z \cdot t_{\text{к}} \cdot \frac{p_{\text{к}}}{10^6}} \right) = \\ &= 10,68 \cdot 0,0736^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{-11,28 \cdot 0,374 \cdot 0,5 \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{10^6}} \right) = 4,972 \text{ мкм}, \end{aligned}$$

где  $t_{\text{к}} = 0,5 \text{ с}$ .

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания:

$$\begin{aligned} d &= 0,042 \cdot \frac{1}{\rho_{\text{к.ф.}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{\text{к}}}{d_{43}^2}} \cdot z = \\ &= 0,042 \cdot \frac{1}{2200} \cdot \sqrt[3]{\frac{3906,2}{(4,972)^2}} \cdot 0,374 = 0,025, \end{aligned}$$

Эффективная излучательная способность продуктов сгорания:

$$\varepsilon_{\text{пс}} = 1 - (1 - \varepsilon_r) \cdot e^{(-d \cdot l)}.$$

Плотность радиационного теплового потока:

$$q_{\text{р}} = \varepsilon_{\text{в}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{к}}^4 - T_{\text{в}}^4),$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ .

Скорость уноса массы материала ТЗП рассчитывается в предположении равенства начальной температуры ТЗП  $T_{\text{п0}} = 293 \text{ К}$ :

$$U_{\text{п}} = \frac{q_{\text{к}} + q_{\text{р}}}{\rho_{\text{п}} \cdot (Q_{\text{п}} + \varphi(I_{\text{к}} - I_{\text{п}}) + C_{\text{рп}}(T_{\text{в}} - T_{\text{п0}}))},$$

где  $I_{\text{к}}$  – полная энтальпия ПС.

Примем, что максимально допустимая температура силовой оболочки под материалом ТЗП равна  $T_m = 500$  К. Тогда с учетом определенных выше значений необходимая толщина слоя абляционного ТЗП рассчитывается по формуле:

$$\delta_{\pi} = \frac{a_{\pi}}{U_{\pi}} \cdot \ln \left( \frac{T_w - T_{\pi 0}}{T_m - T_{\pi 0}} \right) + U_{\pi} \cdot t,$$

где  $a_{\pi}$  – 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 1.8 – 1.11.

Таблица 1.8 – Результаты расчета для цилиндрической части

$M$	$T_{\kappa}^1$ , К	$T_r$ , К	$H_r$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\text{Re}_w \cdot 10^{-6}$	$St^* \cdot 10^3$	$St \cdot 10^3$
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

$\alpha, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$q_{\text{к}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$l, \text{ м}$	$\varepsilon_{\text{пс}}$	$q_{\text{п}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$U_{\text{п}}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$\delta_{\text{п}}, \text{ мм}$
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

$M$	$T_K^1, K$	$T_r, K$	$H_r, \frac{кДж}{кг}$	$Re_w \cdot 10^{-6}$	$St^* \cdot 10^3$	$St \cdot 10^3$
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

$\alpha, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$q_k, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$l, \text{ м}$	$\varepsilon_{\text{ис}}$	$q_p, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$U_{\text{п}}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$\delta_{\text{п}}, \text{ мм}$
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

## **1.4. 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 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 подходящей 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 1.12.

Таблица 1.12 – Основные характеристики материала силовой оболочки корпуса

Прочность волокна, МПа	2500
Модуль упругости, ГПа	97
Плотность, $\frac{\Gamma}{\text{см}^3}$	1,350
Содержание связующего, %	25-30

#### 1.4.1. Расчет толщины силовой оболочки корпуса

Расчет проводится для начальных условий:

1. максимальное давление в камере сгорания  $p_{\text{к max}} = 6,85$  МПа;
2. диаметры переднего и заднего полюсных отверстий  $d_{01} = 0$  м,  
 $d_{02} = 0,340$  м;
3. диаметр корпуса  $d = 0,513$  м;

Допустимое напряжение:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{[\sigma_{\text{в}}]}{k_3} = \frac{2500}{1,2} = 2083,33 \text{ МПа},$$

где  $k_3 = (1,15 \dots 1,30)$  – коэффициент запаса прочности;  $[\sigma_{\text{в}}]$  – предел прочности на разрыв в тангенциальном направлении.

Вычислим значения:

$$\bar{d}_{01} = \frac{d_{01}}{d} = 0,$$

$$\bar{d}_{02} = \frac{d_{02}}{d} = \frac{0,340}{0,513} = 0,663.$$

Допустимые напряжения при спиральной  $\sigma_{\text{в.с}}$  и кольцевой намотке  $\sigma_{\text{в.к}}$ :

$$\sigma_{\text{в.к}} = \sigma_{\text{в}} = 2083,33 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{в.с}} = \sigma_{\text{в.к}} \cdot 0,7 = 2083,33 \cdot 0,7 = 1458,33 \text{ МПа}.$$

Углы намотки волокон у переднего  $\beta_1$  и заднего  $\beta_2$  днищ:

$$\beta_1 = \arccos\left(\sqrt{1 - \bar{d}_{01}^2}\right) = \arccos\left(\sqrt{1 - 0^2}\right) = 0^\circ,$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\sqrt{1 - \bar{d}_{02}^2}\right) = \arccos\left(\sqrt{1 - 0,663^2}\right) \approx 42^\circ.$$

Толщины обечаек спиральной намотки в месте соединения цилиндрической обечайки с передним  $h_{c1}$  и задним  $h_{c2}$  днищами:

$$h_{c1} = \frac{p_{\text{к max}} \cdot d}{2\sigma_{\text{в.с}} \cdot (\cos(\beta_1))^2} = \frac{6,85 \cdot 10^6 \cdot 0,513 \cdot 10^3}{2 \cdot 1458,33 \cdot 10^6 \cdot (\cos(0^\circ))^2} = 1,205 \text{ мм},$$

$$h_{c2} = \frac{p_{\text{к max}} \cdot d}{2\sigma_{\text{в.с}} \cdot (\cos(\beta_2))^2} = \frac{6,85 \cdot 10^6 \cdot 0,513 \cdot 10^3}{2 \cdot 1458,33 \cdot 10^6 \cdot (\cos(42^\circ))^2} = 2,149 \text{ мм}.$$

Угол намотки волокон цилиндрической части оболочки:

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \frac{0^\circ + 42^\circ}{2} = 21^\circ.$$

Так как выполняется условие  $\bar{d}_{01} < \bar{d}_{02}$ , то толщины спиральной и кольцевой намоток в центральной части обечайки:

$$h_c = h_{c2} \cdot \frac{\cos(\beta_1)}{\cos(\beta_2)} = 2,149 \cdot \frac{\cos(0^\circ)}{\cos(42^\circ)} = 2,869 \text{ мм},$$

$$h_k = \alpha \cdot h_c \cdot \left(3 \cdot (\cos(\beta))^2 - 1\right) = 0,7 \cdot 2,869 \cdot \left(3 \cdot (\cos(21^\circ))^2 - 1\right) = 3,26 \text{ мм}.$$

Принимаем  $h_{c1} = 2 \text{ мм}$ ,  $h_{c2} = 3 \text{ мм}$ ,  $h_c = 3 \text{ мм}$ ,  $h_k = 4 \text{ мм}$ .

Толщина центральной части цилиндрической обечайки:

$$\delta_{\text{ц}} = h_c + h_k = 3 + 4 = 7 \text{ мм}.$$

Толщина обечайки в центральной части заднего днища:

$$\delta_2 = \frac{h_{c2}}{d_{02}} = 4,526 \text{ мм}.$$

Для безмоментной оболочки должно выполняться условие  $\bar{\delta}_{\text{ц}} < 0,05$ :

$$\bar{\delta}_{\text{ц}} = \frac{\delta_{\text{ц}}}{R} = \frac{2 \cdot \delta_{\text{ц}}}{d} = \frac{2 \cdot 7}{513} = 0,027,$$

условие выполняется.

Текущая толщина спирального слоя на днищах:

$$h_{r1} = h_{c1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\bar{d}^2}},$$

$$h_{r2} = h_{c2} \cdot \sqrt{\frac{1 - \bar{d}_{02}^2}{\bar{d}^2 - \bar{d}_{02}^2}},$$

где  $\bar{d} = \frac{d_i}{d}$ .

Таблица 1.13 – Результаты расчета толщин переднего и заднего днищ

$d$ , мм	$\bar{d}$	$h_{r1}$ , мм	$h_{r2}$ , мм
40	0,078	7,162	—
85	0,166	4,913	—
130	0,253	3,973	—
180	0,351	3,376	—
245	0,478	2,894	11,476
300	0,585	2,615	5,889
340	0,663	2,457	4,752
390	0,760	2,294	3,965
440	0,858	2,159	3,473
480	0,936	2,068	3,188
512,9	1	2	3

### 1.4.2. Расчет соединений корпусных деталей

Расчет болтового соединения заднего днища с сопловым блоком:

Внутренний диаметр резьбы:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot k_3 \cdot R_y^2 \cdot p_{\text{к max}} \cdot (z + k_n \cdot (1 - \chi))}{[\sigma_b] \cdot z^2}} =$$
$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 1,25 \cdot 0,162^2 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot (50 + 1,1 \cdot (1 - 0,25))}{490 \cdot 10^6 \cdot 50^2}} = 5,217 \text{ мм},$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса прочности болта,  $k_3 = 1,25$ ;  $R_y$  – внутренний радиус уплотнения,  $R_y = 0,162$  м;  $k_n$  – коэффициент запаса нераскрытия стыка,  $k_n = 1,1$ ;  $\chi$  – коэффициент основной нагрузки,  $\chi = 0,25$ ;  $[\sigma_b]$  – предел прочности материала болтов,  $[\sigma_b] = 490$  МПа,  $z$  – число болтов,  $z = 50$ .

Берем болты М8 с наружным диаметром резьбы  $d_0 = 8$  мм и внутренним диаметром резьбы  $d_1 = 6,466$  мм, материал – Сталь45.

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

$$F_p = \frac{\pi \cdot R_y^2 \cdot p_{\text{к max}}}{z} = \frac{\pi \cdot 0,162^2 \cdot 5 \cdot 10^6}{50} = 8244,796 \text{ Н}.$$

Усилие затяжки одного болта:

$$F_{\text{зат}} = F_p \cdot k_n \cdot \frac{(1 - \chi)}{z} = 8244,796 \cdot 1,1 \cdot \frac{(1 - 0,25)}{50} = 136,039 \text{ Н}.$$

Нагрузка, действующая на болт:

$$N = F_{\text{зат}} + F_p = 136,039 + 8244,796 = 8380,835 \text{ Н}.$$

Напряжения, возникающие в болте:

$$\sigma_b = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 8380,835}{\pi \cdot 0,006466^2} = 255,227 \text{ МПа}.$$

Действительный коэффициент запаса прочности болта:

$$k_3^{\text{д}} = \frac{[\sigma_{\text{в}}]}{\sigma_{\text{в}}} = \frac{490}{255,227} = 1,92.$$

## 1.5. 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;
5. конструкционная проработка соплового блока.



Требования, предъявляемые к соплу РДТТ:

1. сопловой блок должен выдерживать все факторы рабочего процесса: давление, температура, воздействие конденсированной фазы, воздействие космического излучения;
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.

### 1.5.1. 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  $a$  и  $b$  относительно оси сопла [7].

Причем:

$$\frac{a}{b} = 2.$$

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

$$\frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{кр}}} > 1,25,$$

$$R_{\text{кр}} = 36,8 \text{ мм} = 0,0368 \text{ м},$$

$$\frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{кр}}} = 1,5.$$

Тогда:

$$R_{\text{вх}} = 1,5 \cdot 36,8 = 55,2 \text{ мм},$$

$$b = R_{\text{вх}} - R_{\text{кр}} = 55,2 - 36,8 = 18,4 \text{ мм},$$

$$a = 2 \cdot b = 2 \cdot 18,4 = 36,8 \text{ мм}.$$

### 1.5.2. 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].

### 1.5.3. Профилирование сверхзвуковой части сопла

Для профилирования сверхзвуковой части сопла можно использовать метод Рао (огibaющих). 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:

$$R_{\text{кр}} = 36,8 \text{ мм} = 0,0368 \text{ м},$$

$$R_a = \frac{d_a}{2} = \frac{0,314}{2} = 0,157 \text{ м} = 157 \text{ мм}.$$

Методика приближенного построения такого профиля включает в себя нахождение углов  $\beta_{\text{вх}}$ ,  $\beta_a$  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:

$$\bar{D}_a = \frac{d_a}{d_{кр}} = 4,26.$$

Принимаем  $\beta_a = 10^\circ$ .

Для рассчитанных  $\bar{D}_a$  и выбранного угла  $\beta_a$  по таблице [9, кн. 1, с. 355...362] определяется относительная длина расширяющейся части сопла  $\bar{X}_a = 11$  и угол входа в сопло  $\beta_{вх} \approx 33^\circ$ .

Длина профилированного участка:

$$L = \bar{X}_a \cdot R_{кр} = 11 \cdot 0,0368 = 0,405 \text{ м.}$$

#### **1.5.4. 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:

$$k_{ут} = \frac{k}{l} = \frac{254,8}{441,8} = 0,58,$$

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

### **1.6. Расчет тепловых потоков в сопле РДТТ**

#### **1.6.1. 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 Лавали, имеющая текущие координаты  $x$  и  $y$  или их

безразмерные значения  $\bar{x} = \frac{x}{R_{кр}}$ ;  $\bar{y} = \frac{y}{R_{кр}}$ , где  $R_{кр}$  – радиус критического сечения.

Начало продольной координаты  $x$  обычно находится в минимальном (критическом) сечении сопла. Расчет тепло-и массопереноса в пограничном слое течения ведется в продольной криволинейной координате  $s$  контура. Поскольку вход в сопло не является «внезапным» и ему предшествует некоторая предыстория развития пограничного слоя, уместно 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 1.14.

Таблица 1.14 – Построение координат контура сопла

№ сечения, $i$	$x$ , мм	$\bar{x}$	$y$ , мм	$\bar{y}$	$s$ , мм
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

№ сечения, $i$	$x$ , мм	$\bar{x}$	$y$ , мм	$\bar{y}$	$s$ , мм
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  $q(\lambda_i)$  характеризует собой текущую относительную плотность потока при постоянстве расхода в сопле

$q(\lambda_i) = \left( \frac{\rho_i U_i}{\rho_{кр} U_{кр}} \right) = \frac{F_{кр}}{F_i} = \frac{1}{\bar{y}^2}$  и определяется зависимостью:

$$q(\lambda_i) = \lambda_i \left[ 1 - \lambda_i^2 \cdot \left( \frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

По значениям ГДФ  $q(\lambda_i)$  в текущих сечениях по этой формуле определяется приведенная скорость  $\lambda_i = f(q_i)$ .

По текущим значениям  $\lambda_i$  определяется ГДФ давления  $\pi(\lambda_i)$ , температуры  $\tau(\lambda_i)$  и плотности  $\varepsilon(\lambda_i)$  в соответствующих сечениях:

$$\pi(\lambda_i) = \frac{p_i}{p_0} = \left[ 1 - \lambda_i^2 \cdot \left( \frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

$$\tau(\lambda_i) = \frac{T_i}{T_0} = \left[ 1 - \lambda_i^2 \cdot \left( \frac{k-1}{k+1} \right) \right],$$

$$\varepsilon(\lambda_i) = \frac{\rho_i}{\rho_0} = \left[ 1 - \lambda_i^2 \cdot \left( \frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{1}{k-1}}.$$

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

$$p_i = \pi(\lambda_i) \cdot p_0,$$

$$T_i = \tau(\lambda_i) \cdot T_0,$$

$$\rho_i = \varepsilon(\lambda_i) \cdot \rho_0.$$

Скорость течения ПС рассчитывается по формуле:

$$U = a_{\text{кр}} \cdot \lambda_i,$$

где  $a_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R_0 T_0}$  – скорость ПС в критическом сечении.

Число Маха определяется по формуле:

$$M = \frac{U}{a},$$

где  $a = \sqrt{kRT}$  – местная скорость звука,  $R = R_0$ .

Промежуточные результаты расчета заносятся в таблицу 1.15.

Таблица 1.15 – Результаты термогазодинамического расчета

№	$x$ , мм	$\bar{y}^2$	$q(\lambda)$	$\lambda$	$M$	$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$a$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$U$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$
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

№	$x$ , мм	$\bar{y}^2$	$q(\lambda)$	$\lambda$	$M$	$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$a$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$U$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$
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



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

$$St_w = 0,0326 \cdot Re_{ws}^{-0,2} \cdot Pr_w^{-0,6} \cdot \left( \frac{H_w}{H_r} \right)^{0,39} \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2 \right)^{0,11},$$

$$St_w = \frac{a}{\rho_w U C_{pw}},$$

$$Re_{ws} = \frac{\rho_w U s}{\mu_w},$$

$$Pr = \frac{\mu_w C_{pw}}{\lambda_w},$$

$$\varepsilon_M = \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2 \right)^{0,11},$$

$$\varepsilon_t = \left( \frac{H_w}{H_r} \right)^{0,39},$$

$$r = \sqrt[3]{Pr},$$

$$H_r = C_{pr} \cdot T_r,$$

$$T_r = T \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} r \cdot M \cdot (\lambda)^2 \right)$$

где  $St_w$  – число Стантона (безразмерный коэффициент теплоотдачи);  $Re_{ws}$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандтля;  $\varepsilon_M$  – функциональная поправка на переменность свойств потока по толщине пограничного слоя;  $\varepsilon_t$  – функциональная поправка на сжимаемость потока;  $r$  – коэффициент восстановления температуры на адиабатической стенке;  $H_r$  – энтальпия восстановления на адиабатической стенке;  $T_r$  – температура восстановления на адиабатической стенке.

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

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

$$\rho_w = \rho \frac{T}{T_w}.$$

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

Неизвестная температура стенки на границе контакта с рабочим телом может быть условно оценена величиной температурного фактора:

$$\bar{T}_w = \frac{T_w}{T_r} = 0,85,$$

$$T_w = 0,85 \cdot T_r.$$

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

$$r_i = \sqrt[3]{Pr_i}.$$

Значение числа Стантона для реальных условий:

$$St = St_w \cdot k_b \cdot k_{ш} \cdot k_r \cdot k_p.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется по значению числа Стантона:

$$\alpha = \rho_w \cdot C_{pw} \cdot U \cdot St_w.$$

Плотность конвективного теплового потока:

$$q_k = \alpha (T_r - T_w).$$

Результаты заносятся в таблицу 1.16 и 1.17.

Таблица 1.16 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

$i$	$x$ , мм	$s$ , мм	Pr	$r$	$T_r$ , К	$C_{pr}$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$h_r$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$T_w$ , К	$C_{pw}$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$h_w$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
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

$i$	$x$ , MM	$s$ , MM	Pr	$r$	$T_r$ , K	$C_{pr}$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$h_r$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$T_w$ , K	$C_{pw}$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$h_w$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
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

$i$	$\mu_w \cdot 10^4,$ Па · с	$\rho_w,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\text{Re}_w \cdot 10^{-6}$	$\text{Pr}_w$	$\varepsilon_t$	$\varepsilon_M$	$\varepsilon_{M,t}$	$St_w$ $\cdot 10^3$	$\alpha_w,$ $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$q_k,$ $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$
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

$i$	$\mu_w \cdot 10^4,$ Па · с	$\rho_w,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\text{Re}_w \cdot 10^{-6}$	$\text{Pr}_w$	$\varepsilon_t$	$\varepsilon_M$	$\varepsilon_{M,t}$	$St_w$ $\cdot 10^3$	$\alpha_w,$ $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$q_k,$ $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$
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

## 1.6.2. 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:

$$q_p = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{\text{пс}} \cdot \sigma_0 \cdot (T^4 - T_w^4),$$

где  $\varepsilon_{\text{пс}}$  – эффективная излучательная способность продуктов сгорания, состоящих из конденсированной и газовой фаз;  $\varepsilon_w$  – эффективная степень черноты стенки.

Излучательная способность молекул  $H_2O$  и  $CO_2$  рассчитывается по формулам:

$$\varepsilon_{CO_2} = 1,5306 \cdot (p_{CO_2} \cdot l)^{0,33} \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^{-0,5},$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 4,4425 \cdot p_{H_2O}^{0,8} \cdot l^{0,6} \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^{-1}.$$

Тогда излучательная способность смеси газов  $H_2O$  и  $CO_2$  определяется как:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2}.$$

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

$$l = 0,9 \cdot y.$$

Будем считать, что плотность конденсированной фазы составляет

$$\rho_{\text{к.ф.}} = 2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:

$$d_{43} = 10,68 \cdot d_{\text{кр}}^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{-11,28 \cdot z_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}} \cdot \frac{p_{\text{к}}}{10^6}} \right)$$

Эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания:

$$d = 0,042 \cdot \frac{1}{\rho_{\text{к.ф.}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{\text{к}}}{d_{43}^2}} \cdot z_{\text{к}} \cdot$$

Эффективная излучательная способность продуктов сгорания:

$$\varepsilon_{\text{ис}} = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}}) \cdot e^{(-d \cdot l)}.$$

Суммарный тепловой поток по длине сопла:

$$q_{\text{сум}} = q_{\text{р}} + q_{\text{к}}.$$

Результаты представлены в таблице 1.18.

Таблица 1.18 – Конвективный, радиационный и суммарный тепловые потоки

$q_{\text{к}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$q_{\text{р}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$q_{\text{сум}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$
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



$q_k, \frac{MB_T}{M^2}$	$q_p, \frac{MB_T}{M^2}$	$q_{cym}, \frac{MB_T}{M^2}$
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

## 1.7. Расчет потерь удельного импульса

Потери удельного импульса можно разделить на ряд составляющих:

$$\xi_{\text{сум}} = \xi_{\text{рас}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_s + \xi_{\text{ут}} + \xi_{\text{хн}},$$

где  $\xi_{\text{рас}}$  – потери удельного импульса из-за рассеяния потока;  $\xi_{\text{тр}}$  – потери удельного импульса из-за трения потока;  $\xi_s$  – потери из-за наличия в ПС конденсированной фазы;  $\xi_{\text{ут}}$  – потери из-за утолщенности сопла;  $\xi_{\text{хн}}$  – потери из-за химической неравновесности.

Потери удельного импульса из-за рассеяния потока:

$$\begin{aligned}\xi_{\text{рас}} &= (0,906 - 0,029 \cdot y_{a0}) \cdot \left[ \sin \left( \frac{\beta_{\text{вх}} + 1,1 \cdot \beta_a}{4,1} \right) \right] = \\ &= (0,906 - 0,029 \cdot 4,27) \cdot \left[ \sin \left( \frac{33^\circ + 1,1 \cdot 10^\circ}{4,1} \right) \right] = 0,0271,\end{aligned}$$

где  $y_{a0} = \frac{d_a}{d_{\text{кр}}} = 4,27$ .

Потери удельного импульса из-за трения потока:

$$\begin{aligned}\xi_{\text{тр}} &= 0,00272 \cdot \sqrt{y_{a0} - 1} \cdot \left( \frac{2,62}{k^2 \cdot \bar{T}_{\text{ст}}^{0,33}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{k_s}{d_{\text{кр}}} \right)^{0,3} \right) \cdot \left( \frac{L_a}{d_{\text{кр}}} \right)^{0,1} = \\ &= 0,00272 \cdot \sqrt{4,27 - 1} \cdot \left( \frac{2,62}{1,19^2 \cdot 0,6^{0,33}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{0,0005}{0,0736} \right)^{0,3} \right) \cdot \left( \frac{0,4418}{0,0736} \right)^{0,1} = \\ &= 0,00786,\end{aligned}$$

где  $\bar{T}_{\text{ст}}$  – температурный фактор;  $k_s$  – шероховатость внутренней стенки сопла.

Потери из-за наличия в ПС конденсированной фазы:

$$\begin{aligned}\xi_s &= \xi_{s0} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \\ \xi_{s0} &= z \cdot \frac{d_{43}^{1,5}}{(d_{\text{кр}} \cdot 10^3)^{1,33}} = 0,0269, \\ k_1 &= 1,047 - 0,0013 \cdot \frac{P_{\text{к}}}{10^5} = 0,982,\end{aligned}$$

$$k_2 = 1,112 - 0,037 \cdot y_{a0} = 0,954,$$

$$\xi_s = 0,0269 \cdot 0,982 \cdot 0,954 = 0,0253.$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий абсолютное значение давления в камере сгорания РДТТ и обуславливающий снижение потерь при увеличении давления торможения вследствие ускорения процессов скоростной релаксации потока;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий влияние геометрической степени расширения сопла РДТТ, обуславливающего уменьшение двухфазных потерь за счет снижения градиента скорости потока по длине сопла.

Потери из-за утолщенности сопла:

$$\xi_{yt} = 0,01.$$

Потери из-за химической неравновесности:

$$\xi_{xn} = 0,333 \cdot \left( 1 - \frac{J_{y.3}}{J_y} \right) \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{p_k} = 0,333 \cdot \left( 1 - \frac{2851}{2938,36} \right) \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} = 0,00396.$$

Коэффициент потерь  $\varphi_c$ :

$$\varphi_c = 1 - \xi_{\text{сум}} = 1 - (\xi_{\text{рас}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_s + \xi_{yt} + \xi_{xn}) = 0,93.$$

## 1.8. Расчет воспламенительного устройства

Основным назначением системы воспламенения является зажигание топливного заряда РДТТ за заданное время по определенному закону.

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.

### 1.8.1. Расчет заряда основного воспламенителя

Время работы воспламенителя для некосмического РДТТ:

$$t_p^{H.K} = (0,8...1,5)t_{B.p} = 1,5 \cdot 0,015 = 0,023 \text{ с.}$$

Время работы воспламенителя для РДТТ, запускаемого в космосе:

$$t_p^{Bocnл} = (1,5...2,0)t_p^{H.K} = 0,045 \text{ с.}$$

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:

$$C_p = 977 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$C_v = 905 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = 0,0001 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Полная энтальпия:

$$I_k = -3,14 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Относительная массовая концентрация конденсированной фазы:

$$z_B = 0,562.$$

Газовая постоянная продуктов сгорания воспламенителя:

$$R = C_p - C_v = 977 - 905 = 72 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Температура продуктов сгорания воспламенителя:

$$T_B = 3676 \text{ К}.$$

Давление, которое должен обеспечить воспламенитель:

$$p_B = 2,1 \text{ МПа}.$$

Плотность продуктов сгорания воспламенителя:

$$\rho_B^{\text{пс}} = \frac{p_B}{T_B \cdot R} = \frac{2,1 \cdot 10^6}{3676 \cdot 72} = 7,934 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Свободный объем в камере:

$$W_{\text{св}} = 0,0083 \text{ м}^3.$$

Масса воспламенителя:

$$M_B = W_{\text{св}} \cdot \rho_B^{\text{пс}} = 0,0083 \cdot 7,934 = 65,855 \text{ г}.$$

Масса воспламенителя в расчете на 1 м<sup>2</sup> поверхности горения:

$$M_B = (180 \dots 200) F_r = 180 \cdot 0,36 = 64,768 \text{ г}.$$

Принимаем массу воспламенителя:

$$M_B = 65 \text{ г}.$$

Массовый расход воспламенителя:

$$\dot{m}_B = \frac{M_B}{t_{\text{воспл}}^{\text{р}}} = \frac{0,065}{0,045} = 1,444 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Минимальное давление в критическом сечении сопла воспламенителя:

$$p_{\text{кр в}}^{\text{мин}} = 2,1 \text{ МПа}.$$

Минимальное давление в камере воспламенителя:

$$p_{\text{к в}}^{\text{мин}} = \frac{p_{\text{кр в}}^{\text{мин}}}{\left( \frac{2}{k_B + 1} \right)^{\frac{k_B}{k_B - 1}}} = \frac{2,1}{\left( \frac{2}{1,17 + 1} \right)^{\frac{1,17}{1,17 - 1}}} = 3,682 \text{ МПа},$$

где  $k_B$  — показатель адиабаты продуктов сгорания воспламенителя.

Принимаем давление в камере воспламенителя:

$$p_{кв} = 3,7 \text{ МПа}.$$

Скорость горения воспламенителя:

$$u_{\text{в}} = u_{1\text{в}} \cdot \left( \frac{p_{кв}}{98066,5} \right)^{u_{\text{в}}} = 0,11 \left( \frac{3,7}{98066,5} \right)^{0,37} = 42,147 \frac{\text{мм}}{\text{с}},$$

где  $u_{1\text{в}}$  – единичная скорость горения;  $u_{\text{в}}$  – показатель в законе горения.

Свод горения воспламенителя:

$$e_{\text{в}} = u_{\text{в}} \cdot t_{\text{п}}^{\text{воспл}} = 42,147 \cdot 0,045 = 1,897 \text{ мм}.$$

Плотность воспламенителя:

$$\rho_{\text{в}} = 1750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Площадь горения воспламенителя:

$$F_{\text{г в}} = \frac{\dot{m}_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot u_{\text{в}}} = \frac{1,444}{1750 \cdot 42,147} = 19583,852 \text{ мм}^2.$$

Берем воспламенитель в виде вкладного одноканального заряда с забронированными торцами.

Диаметр внутреннего канала заряда:

$$d_{\text{вн в}} = 15 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр заряда:

$$d_{\text{нар в}} = 4e_{\text{в}} + d_{\text{вн в}} = 22,586 \text{ мм}.$$

Длина заряда:

$$l_{\text{в}} = \frac{F_{\text{г в}}}{\pi(d_{\text{вн в}} + d_{\text{нар в}})} = \frac{19583,852}{\pi(15 + 22,586)} = 165,851 \text{ мм}.$$

Критерий Победоносцева для внутреннего канала:

$$\chi_{\text{в}}^{\text{вн}} = \frac{4 \cdot l_{\text{в}}}{d_{\text{вн в}}} = \frac{4 \cdot 165,851}{15} = 44,227.$$

Внутренний диаметр камеры:

$$d_{\text{к вн}} = 28 \text{ мм}.$$

Критерий Победоносцева для наружного канала:

$$\chi_{\text{в}}^{\text{нар}} = \frac{4 \cdot l_{\text{в}} \cdot d_{\text{нар в}}}{(d_{\text{к в}}^2 - d_{\text{нар в}}^2)} = \frac{4 \cdot 165,851 \cdot 22,586}{(28^2 - 22,586^2)} = 54,715.$$

Температура в камере:

$$T_{\text{к в}} = \frac{T_{\text{в}}}{\left(\frac{p_{\text{в}}}{p_{\text{к в}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{3676}{\left(\frac{2,1}{3,7}\right)^{\frac{1,17-1}{1,17}}} = 3991,32 \text{ К}.$$

Комплекс  $A(k)_{\text{в}}$ :

$$A(k)_{\text{в}} = \sqrt{k} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = \sqrt{1,17} \cdot \left(\frac{2}{1,17+1}\right)^{\frac{1,17+1}{2(1,17-1)}} = 0,643.$$

Площадь критического сечения:

$$F_{\text{кр в}} = \frac{\dot{m}_{\text{в}} \cdot \sqrt{T_{\text{к в}} \cdot R}}{p_{\text{к в}} \cdot A(k)_{\text{в}} \cdot \varphi_{\text{с в}}} = \frac{1,444 \cdot \sqrt{3991,32 \cdot 72}}{3,7 \cdot 0,643 \cdot 0,55} = 0,0005921 \text{ м}^2.$$

где  $\varphi_{\text{с в}} = 0,55$  — коэффициент расхода отверстия.

Количество отверстий в воспламенителе:

$$N_{\text{кр}} = 4.$$

Диаметр одного отверстия:

$$d_{\text{кр}}^1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{кр в}}}{\pi \cdot N_{\text{кр}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0005921}{\pi \cdot 4}} = 13,728 \text{ мм}$$

Принимаем  $d_{\text{кр}}^1 = 12 \text{ мм}$ .

## 1.8.2. Расчет толщины бронирующего покрытия основного воспламенителя

Для бронирующего покрытия АЦ–2:

Удельные теплоемкости:

$$C_{\text{бп}} = 1630 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_{\text{бп}} = 0,296 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Плотность:

$$\rho_{\text{бп}} = 1270 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Температуры:

$$T_{\text{т}} = 293 \text{ К},$$

$$T_{\text{доп}} = 500 \text{ К}.$$

Толщина бронирующего покрытия основного воспламенителя:

$$\delta_{\text{бп}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{\text{бп}} \cdot t_{\text{р}}^{\text{воспл}}}{C_{\text{бп}} \cdot \rho_{\text{бп}} \cdot \ln\left(\frac{T_{\text{кв}} - T_{\text{т}}}{T_{\text{кв}} - T_{\text{доп}}}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,296 \cdot 0,045}{1630 \cdot 1270 \cdot \ln\left(\frac{3991,32 - 293}{3991,32 - 500}\right)}} = 0,473 \text{ мм}$$

### 1.8.3. Расчет толщины теплозащитного покрытия

Плотность материала покрытия:

$$\rho_{\text{п}} = 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Удельная теплоемкость покрытия:

$$C_{\text{п}} = 2600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Температура пиролиза ТЗП:

$$T_{\text{д тзп}} = 2500 \text{ К}.$$

Полная энтальпия материала покрытия:

$$I_{\text{п}} = -4 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Массовое содержание связующего:

$$\varphi = 0,6.$$

Удельная теплота абляции материала:



$$Q_{\pi} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Коэффициент температуропроводности ТЗП:

$$\alpha = 1,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Число Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot C_p}{\lambda} = \frac{0,0001 \cdot 977}{0,2} = 0,489.$$

Температура восстановления газа на адиабатической стенке:

$$T_r = T_{\text{кв}} = 3991,32 \text{ К}.$$

Энтальпия восстановления газа на адиабатической стенке:

Температура стенки:

$$T_w = T_{\text{д тзп}} = 2500 \text{ К}.$$

Примем:

$$C_{pr} = C_{pw} \rightarrow \frac{H_w}{H_r} = \frac{T_w}{T_r} = \frac{2500}{3991,32} = 0,626.$$

Плотность потока при температуре стенки:

$$\rho_w = \frac{p_{\text{к}}}{R \cdot T_w} = \frac{3,7 \cdot 10^6}{72 \cdot 2500} = 20,556 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Скорость:

$$W = 100 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Характерный размер:

$$\delta = 28 \text{ мм}.$$

Число Рейнольдса при температуре стенки:

$$\text{Re}_{ws} = \frac{\rho_w \cdot W \cdot \delta}{\eta} = \frac{20,556 \cdot 100 \cdot 28}{0,0001} = 5,756 \cdot 10^5.$$

Число Стантона:

$$St_w \cong 0,0296 \cdot \text{Re}_{ws}^{-0,2} \cdot \text{Pr}^{-0,6} \cdot \left( \frac{T_w}{T_r} \right)^{0,39} = 0,003.$$

Плотность конвективного теплового потока к стенке:

$$\alpha = \rho_w \cdot C_p \cdot W \cdot St_w = 20,556 \cdot 977 \cdot 100 \cdot 0,003 = 5364,638 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Конвективный тепловой поток:

$$q_k = \alpha (T_r - T_w) = 5364,638 \cdot (3991,32 - 2500) = 8 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Примем радиационный тепловой поток:

$$q_p \approx 0,5 \cdot q_k \approx 4 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Суммарный тепловой поток:

$$q_{\text{сум}} = q_k + q_p = 12 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Скорость выгорания ТЗП:

$$U_{\Pi} = \frac{q_k + q_p}{\rho_{\Pi} \cdot (Q_{\Pi} + \varphi(I_k - I_{\Pi}) + C_{p\Pi}(T_w - T_{\Pi 0}))},$$
$$U_{\Pi} = \frac{12 \cdot 10^6}{1300 \cdot (3 \cdot 10^6 + 0,6(-3,14 + 4) \cdot 10^6 + 2600(2500 - 293))} = 9,975 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Толщина ТЗП:

$$\delta_{\Pi} = \frac{a_{\Pi}}{U_{\Pi}} \cdot \ln \left( \frac{T_w - T_{\Pi 0}}{T_{\text{м}} - T_{\Pi 0}} \right) + U_{\Pi} \cdot t =$$
$$= \frac{1,5 \cdot 10^{-7}}{9,975 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln \left( \frac{2500 - 293}{500 - 293} \right) + 9,975 \cdot 10^{-4} \cdot 0,045 = 0,401 \text{ мм}.$$

Принимаем  $\delta_{\Pi} = 1 \text{ мм}$ .

#### 1.8.4. Расчет толщины стенки корпуса воспламенителя

Корпус выполнен из стали:

$$[\sigma_{\text{в}}] = 1000 \text{ МПа},$$

$$k_3 = 1,5.$$

Наружный диаметр корпуса:

$$d_{\text{к нар}} = d_{\text{к вн}} + 2 \cdot \delta_{\text{п}} = 28 + 2 \cdot 1 = 30 \text{ мм}.$$

Толщина стенки корпуса:

$$\delta = \frac{p_{\text{к в}} \cdot d_{\text{к нар}} \cdot k_3}{2 \cdot [\sigma_{\text{в}}]} = \frac{3,7 \cdot 0,030 \cdot 1,5}{2 \cdot 1000 \cdot 10^6} = 0,083 \text{ мм}.$$

Принимаем  $\delta = 1,5 \text{ мм}$ .

### 1.8.5. Расчет предвоспламенителя

Предвоспламенитель выполнен из дымного ружейного пороха (ДРП).

Относительная массовая концентрация к-фазы:

$$z_{\text{пр в}} = 0,4.$$

Газовая постоянная продуктов сгорания предвоспламенителя:

$$R_{\text{пр в}} = 250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Температура продуктов сгорания предвоспламенителя:

$$T_{\text{пр в}} = 2567 \text{ К}.$$

Давление, которое должен обеспечить предвоспламенитель:

$$p_{\text{пр в}} = (0,3 \dots 0,4) p_{\text{к в}} = 0,35 \cdot 3,7 \cdot 10^6 = 1,295 \text{ МПа}.$$

Плотность продуктов сгорания предвоспламенителя:

$$\rho_{\text{пр в}}^{\text{пс}} = \frac{p_{\text{пр в}}}{T_{\text{пр в}} \cdot R_{\text{пр в}}} = \frac{1,295 \cdot 10^6}{2567 \cdot 250} = 2,018 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Свободный объем в воспламенителе:

$$W_{\text{св в}} = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Масса предвоспламенителя:

$$M_{\text{пр в}} = W_{\text{св в}} \cdot \rho_{\text{пр в}}^{\text{пс}} = 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 2,018 = 0,061 \text{ г}.$$

Принимаем  $M_{\text{пр в}} = 1 \text{ г}$ .

Насыпная плотность предвоспламенителя:

$$\rho_{\text{пр}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Объем предвоспламенителя:

$$V_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр в}}}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1000} = 1000 \text{ мм}^3$$

Выбираем пленочный насыпной предвоспламенитель бескаркасного типа.

### 1.9. 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:

$$p_{\text{выл}} = 2,1 \text{ МПа},$$

$$D_{\text{уст}} = 115 \text{ мм} = 0,115 \text{ м}.$$

Площадь поверхности заглушки, на которую действует усилие:

$$F_{\text{загл}} = \frac{(\pi \cdot D_{\text{уст}}^2)}{4} = \frac{(\pi \cdot 0,115^2)}{4} = 0,0104 \text{ м}^2.$$

Сила, действующая на заглушку со стороны камеры при вылете:

$$P_{\text{выл}} = p_{\text{выл}} \cdot F_{\text{загл}} = 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,0104 = 21,812 \text{ кН}.$$

Потребная сила, необходимая для удержания заглушки:

$$P = \frac{P_{\text{выл}}}{\cos(\beta)} = \frac{21,812 \cdot 10^3}{\cos(25^\circ)} = 24,067 \text{ кН}.$$

Для крепления заглушки к стенке сопла будем использовать карбонильный клей, допускаемое значение на срез которого равно  $\tau = 12,5 \text{ МПа}$ .

Величина боковой поверхности заглушки:

$$F_{\text{бок}} = \frac{P}{\tau} = \frac{24,067 \cdot 10^3}{12,5 \cdot 10^6} = 0,002 \text{ м}^2.$$

Ширина боковой стенки заглушки:

$$h = \frac{F_{\text{бок}}}{D_{\text{уст}}} = \frac{0,002}{0,115} \cong 0,020 \text{ м}.$$

## **2. 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 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.

## 2.1. Массоприход с поверхности горения

Массоприход с поверхности заряда твердого топлива определяется по следующим зависимостям [4]:

$$\dot{m} = \rho_{\tau} \cdot u_1 \cdot p_{\kappa}^{\nu} \cdot F_{\Gamma},$$

где  $\rho_{\tau}$  – плотность топлива,  $u_1$  – единичная скорость горения,  $\nu$  – показатель в законе горения,  $p_{\kappa}$  – давление в камере сгорания,  $F_{\Gamma}$  – площадь горения.

Тогда массоприход с поверхности горения для рассматриваемой конфигурации:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \rho_{\tau 1} \cdot u_{\tau 1} \cdot F_{\Gamma 1} + \rho_{\tau 2} \cdot u_{\tau 2} \cdot F_{\Gamma 2},$$

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

Угол наклона конуса горящей поверхности определяется следующей зависимостью:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{u_{\tau 1}}{u_{\tau 2}} = \frac{u_{11} \cdot p_{\kappa}^{\nu_1}}{u_{12} \cdot p_{\kappa}^{\nu_2}} = \frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_{\kappa}^{\nu_1 - \nu_2}.$$

Тогда площадь горения «ведомого»:

$$F_{\Gamma 1} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2 - d^2}{\frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_{\kappa}^{\nu_1 - \nu_2}},$$

где  $D$  – внешний диаметр «ведомого»,  $d$  – внутренний диаметр «ведомого».

Получаем итоговую зависимость:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \rho_{\tau 1} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{\nu_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) + \rho_{\tau 2} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{\nu_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

## 2.2. Влияние свойств топлив на РДТТ

Одним из параметров, который зависит от соотношения скоростей горения топлив является угол наклона свода «ведомого» заряда  $\frac{\alpha}{2}$ . Угол



определяет количество несгоревших остатков и момент, в который начнется депрессивное горение.

Зависимость относительного расхода от соотношения скоростей горения топлив при  $d = 0$ :

$$\begin{aligned} \bar{m} &= \frac{\rho_{T1} \cdot u_{12} \cdot p_K^{v_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)}{\rho_{T1} \cdot u_{11} \cdot p_K^{v_1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{u_{12} \cdot p_K^{v_2} \cdot (D^2 - d^2)}{u_{11} \cdot p_K^{v_1} \cdot D^2} = \\ &= \frac{1}{\frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_K^{v_1 - v_2}} = \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \end{aligned}$$

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

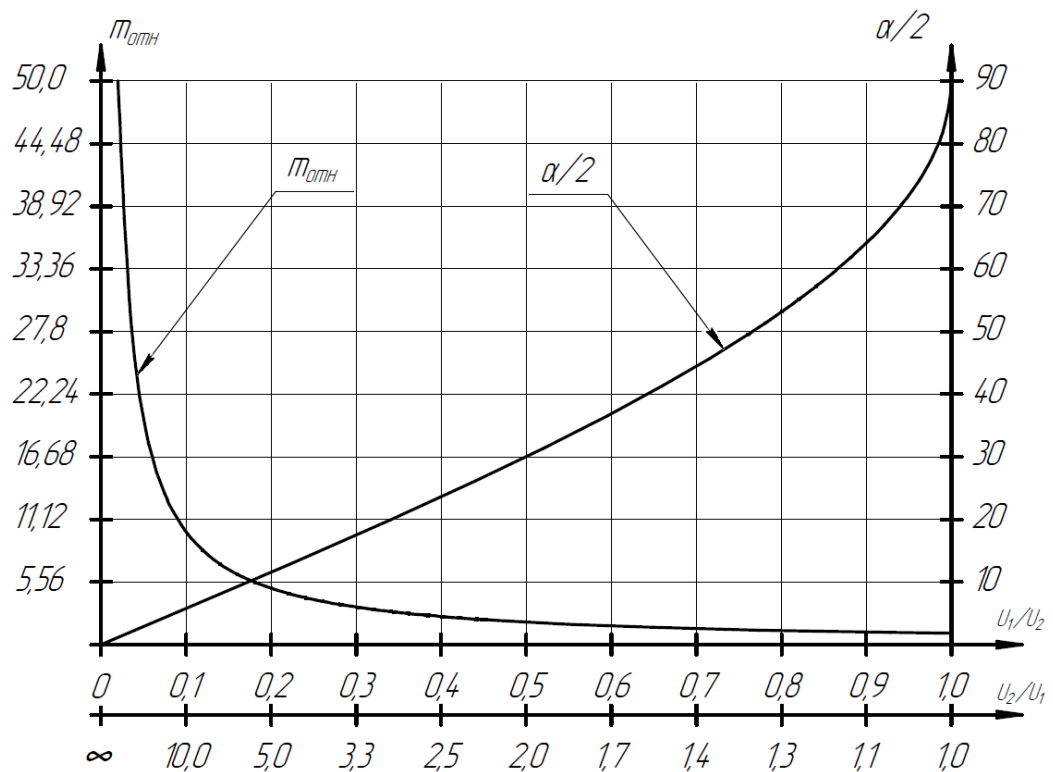


Рисунок 2.1 – Влияние соотношения скоростей на угол наклона конуса и относительный расход основного топлива

Параметр  $(RT)_{\Sigma}$  может быть определен по следующей формуле:

$$R_{cm} = \sum_{i=1}^2 \overline{(RT)}_i \cdot \bar{m}_i,$$

где

$$\overline{(RT)}_i = \frac{(RT)_2}{(RT)_1},$$

$$\overline{m}_1 = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2,$$

$$\overline{m}_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2.$$

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

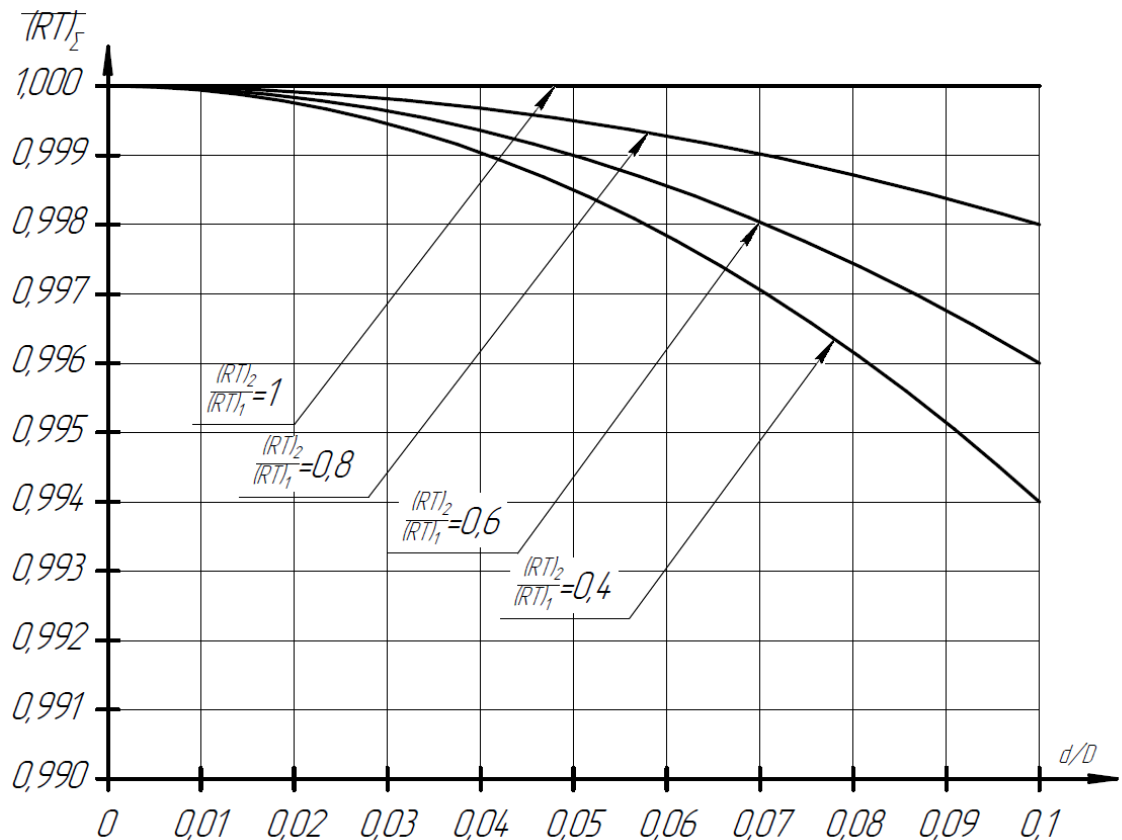


Рисунок 2.2 – Влияние соотношения диаметров и термодинамики топлив на общую термодинамику двигателя

По результатам расчетов можно сделать вывод, что при реальных значениях диаметра ведущего заряда снижение итогового комплекса термодинамических параметров топлива не превышает десятых долей процента, то есть негативным влиянием термодинамических параметров ведущего заряда можно пренебречь.

Относительный расход при  $d = 0$ :

$$\begin{aligned}\bar{\dot{m}} &= \frac{\rho_{\tau 1} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) + \rho_{\tau 2} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\rho_{\tau 1} \cdot u_{11} \cdot p_{\kappa}^{v_1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \\ &= \frac{\rho_{\tau 1} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)}{\rho_{\tau 1} \cdot u_{11} \cdot p_{\kappa}^{v_1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot D^2}{u_{11} \cdot p_{\kappa}^{v_1} \cdot D^2} = \frac{u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2}}{u_{11} \cdot p_{\kappa}^{v_1}}.\end{aligned}$$

Принимаем:

$$n = \frac{u_{12}}{u_{11}},$$

$$m = \frac{v_2}{v_1}.$$

Итоговая зависимость относительного расхода от параметров закона горения при  $d = 0$ :

$$\bar{\dot{m}} = \frac{u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2}}{u_{11} \cdot p_{\kappa}^{v_1}} = n \cdot p_{\kappa}^{v_1(m-1)}.$$

График влияния параметров закона горения на относительный расход в широком диапазоне давлений  $p_{\kappa}$  представлен на графическом листе №5.

### 2.3. Обоснование выбора топливной пары

Для конкретных топливных пар была определена зависимость расхода и угла наклона конуса поверхности горения в широком диапазоне давлений.

С целью автоматизации процесса подбора оптимальной топливной пары разработана программа на языке программирования Python v.3.7 (Приложение Г). Результаты расчета представлены в приложении Д и приложении Е.

В процессе расчета использовались следующие уравнения:  
суммарный расход:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \rho_{\tau 1} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) + \rho_{\tau 2} \cdot u_{12} \cdot p_{\kappa}^{v_2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

угол наклона конуса горячей поверхности:

$$\frac{\alpha}{2} = \arcsin\left(\frac{u_{r1}}{u_{r2}}\right) = \arcsin\left(\frac{u_{11} \cdot p_k^{v_1}}{u_{12} \cdot p_k^{v_2}}\right) = \arcsin\left(\frac{u_{11}}{u_{12}} \cdot p_k^{v_1-v_2}\right).$$

Графики зависимости расхода и угла наклона конуса горячей поверхности в широком диапазоне давлений для характерных топливных пар представлены на графическом листе №5.

По результатам расчета видно, что в допустимые диапазоны расхода и угла наклона конуса, полученные по исходным данным, попадает топливная пара «ПХН – 2М — ПХА – 4М». В качестве «ведущего» выбрано топливо марки ПХН – 2М, для «ведомого» выбрано топливо марки ПХА – 4М.

### **3. Технологическая часть**

## **Введение**

В данной части дипломного проекта рассматривается технологический процесс изготовления заряда из смесового твердого ракетного топлива.

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.

### 3.1. 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 3.1 и таблице 3.2.

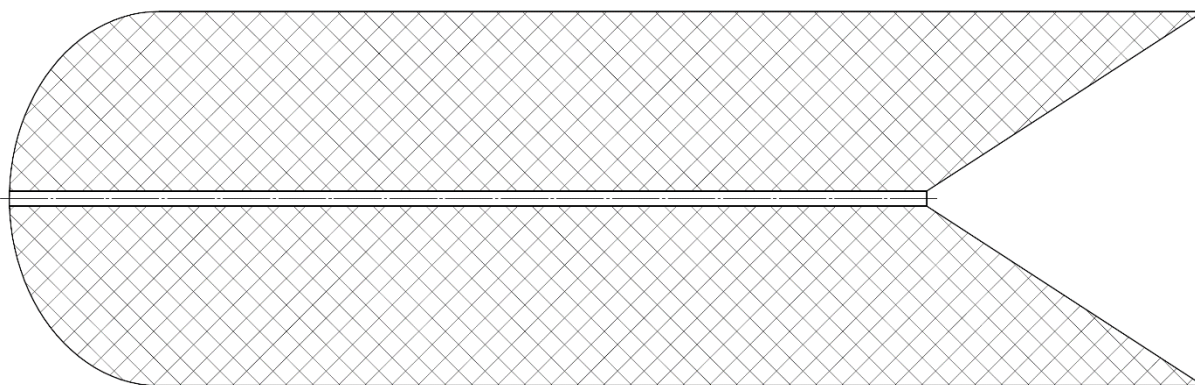


Рисунок 3.1 – Геометрия заряда

Таблица 3.1 – Характеристики топлива ПХН – 2М

Состав	Окислитель	перхлорат нитрона, %	30
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	60
	ГСВ	поливинилхлорид, %	10
Условная химическая формула			$C_{5,268}H_{4,800}O_{12,375}N_{2,062}Cl_{3,663}Al_{22,237}$
Энтальпия образования $H_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			-64,39
Закон горения			$U = 14,5 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0.19}$
Плотность топлива $\rho_t$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			2430
Теплопроводность $c$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$0,932 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			4,5
Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $\frac{1}{K}$			$2 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения $p$ , кПа			0,7
Эксплуатационный интервал температур $T, K$			[240;293]



Таблица 3.2 – Характеристики топлива ПХА – 4М

Состав	Окислитель	перхлорат аммония, %	35
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	20
	ГСВ	нитразол, %	45
Условная химическая формула			$C_{5,213}H_{24,948}O_{28,408}N_{7,428}Cl_{2,979}Al_{7,413}$
Энтальпия образования $H_{\pi}$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			–2034
Закон горения			$U = 6,49 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0.24}$
Плотность топлива $\rho_t$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			1800
Теплопроводность $c$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$1,084 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			0,94
Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $\frac{1}{K}$			$3,4 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения $p$ , кПа			30
Эксплуатационный интервал температур $T, K$			[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 воспроизводимости 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 3.2.

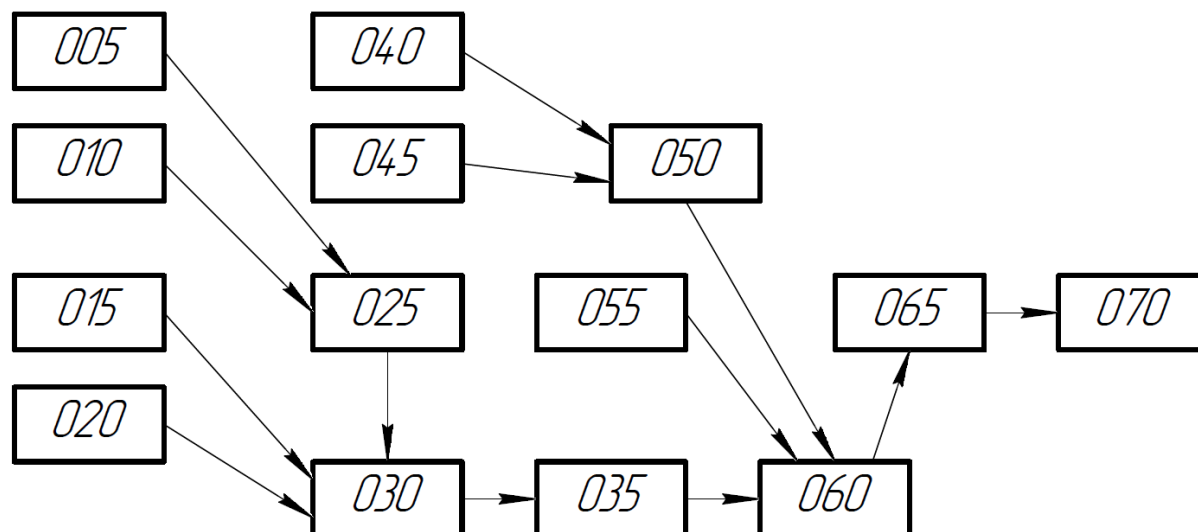


Рисунок 3.2 – Схема изготовления зарядов СТРТ

Основные технологические операции изготовления заряда из СТРТ представлены в таблице 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

### 3.2. 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	—

№	Содержание операции	Оборудование
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 системы	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

№	Содержание операции	Оборудование
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 системы	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

№	Содержание операции	Оборудование
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	$\gamma$ -дефектоскоп
3	Проведение дефектоскопии	$\gamma$ -дефектоскоп
4	Контрольное взвешивание	Весы
5	Укупорка	—

### 3.3. Описание операций

Операция 005. Приготовление рабочей смеси порошкообразных компонентов (РСПК) [8]

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-протирающего 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 °С) 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) [8]

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 [8]

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 [8]

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 [8]

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 [8]

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 [8]

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.

### 3.4. Расчет шнекового экструдера

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

Схема одношнекового экструдера представлена на рисунке 3.3 [9]. 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.

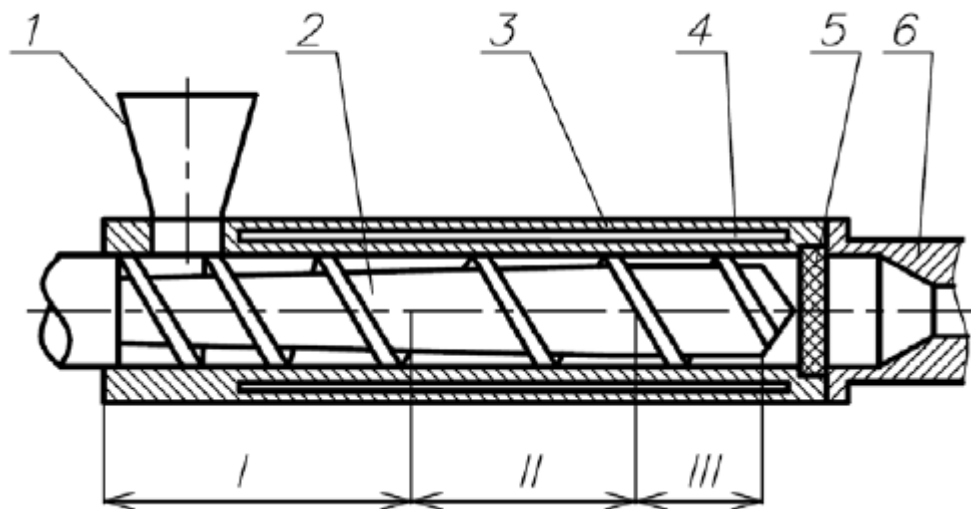


Рисунок 3.3 – Шнековый экструдер

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

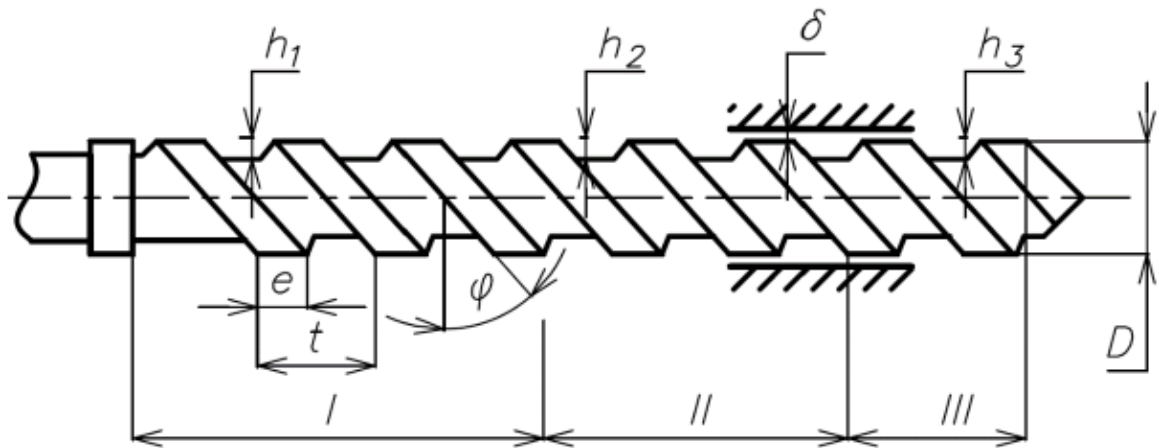


Рисунок 3.4 – Схема шнека с переменной глубиной нарезки

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  $\delta$ ;
7. угол подъема винтовой линии нарезки шнека  $\varphi$ ;
8. число заходов нарезки шнека обычно принимается  $\lambda = 1$ .

В качестве исходного параметра для расчета экструдера принимается его производительность.

$$Q = 9 \text{ м}^3 / \text{ч} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Для известной производительности экструдера можно определить диаметр шнека:

$$D = 4,65 \cdot (1 + k_{\text{п}})^{0,4} \cdot Q^{0,4} = 4,65 \cdot (1 + 0,1)^{0,4} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^{0,4} = 0,44 \text{ м},$$

где  $Q$  – объемная производительность,  $D$  – диаметр шнека,  $k_{\text{п}} = 0,15$  – коэффициент, учитывающий утечки и осевые перетечки рабочего тела.

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

Тогда принимаем значение  $D_{\text{ш}}=450 \text{ мм}=0,45 \text{ м}$ .

Угол наклона винтовой поверхности:

$$\varphi = \text{atg}\left(\frac{t}{\pi \cdot D_{\text{ш}}}\right) = \text{atg}\left(\frac{0,45}{\pi \cdot 0,45}\right) = 0,308 \text{ рад.}$$

Средние глубины винтового канала шнека в каждой из зон:

— в зоне питания

$$h_1 = 0,12 \cdot D_{\text{ш}} = 0,12 \cdot 0,45 = 0,054 \text{ м},$$

— в зоне дозирования

$$h_3 = 0,5 \left[ D_{\text{ш}} - \sqrt{D_{\text{ш}}^2 - \frac{4h_1}{3}(D_{\text{ш}} - h_1)} \right],$$

$$h_3 = 0,5 \cdot [0,45 - \sqrt{0,45^2 - \frac{4 \cdot 0,054}{3}(0,45 - 0,054)}] = 0,016 \text{ м},$$

— в зоне сжатия

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{2} = 0,054 - \frac{0,054 - 0,016}{2} = 0,035 \text{ м}.$$

Ширина ребра и величина радиального зазора:

$$e = 0,08 \cdot D_{\text{ш}} = 0,08 \cdot 0,45 = 0,036 \text{ м},$$

$$\delta = 3 \cdot \frac{D_{\text{ш}}}{1000} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Критическая частота вращения шнека:

$$n_{\text{кр}} = \frac{0,75}{\sqrt{D_{\text{ш}}}} = \frac{0,75}{\sqrt{0,45}} = 1,118 \text{ с}^{-1},$$

Рабочая частота вращения шнека:

$$n_{\text{р}} = 0,5 \cdot n_{\text{кр}} = 0,5 \cdot 1,118 = 0,559 \text{ с}^{-1}.$$

Для течения в экструдере средняя угловая скорость сдвига:



$$\gamma = \frac{\pi \cdot D \cdot n_p}{(0,4 \cdot h_1 + 0,4 \cdot h_2 + 0,2 \cdot h_3)},$$

$$\gamma = \frac{\pi \cdot 0,45 \cdot 0,559}{(0,4 \cdot 0,054 + 0,4 \cdot 0,035 + 0,2 \cdot 0,016)} = 20,276 \text{ рад/с}.$$

Коэффициент динамической вязкости для неньютоновской жидкости:

$$\mu = 10^{a \cdot \lg(\gamma) + b} = 10^{(-0,56) \cdot \lg(20,276) + 4,1} = 2333,926 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Длина шнека:

$$L = \frac{p_m \cdot (0,4 \cdot h_1 + 0,4 \cdot h_2 + 0,2 \cdot h_3)^2 \cdot \text{tg} \varphi}{0,6 \cdot \pi \cdot D \cdot \mu \cdot n_p},$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot (0,4 \cdot 0,054 + 0,4 \cdot 0,035 + 0,2 \cdot 0,016)^2 \cdot \text{tg}(0,308)}{0,6 \cdot \pi \cdot 0,45 \cdot 2,334 \cdot 10^3 \cdot 0,559} = 2,185 \text{ м}.$$

Длина каждой зоны:

- зона питания  $L_1 = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 2,185 = 0,874 \text{ м};$
- зона сжатия  $L_2 = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 2,185 = 0,874 \text{ м}$
- зона дозирования  $L_3 = 0,2 \cdot L = 0,2 \cdot 2,185 = 0,437 \text{ м}.$

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  $P_0$  на шнек определяется по следующей формуле:

$$P_0 = \frac{\pi \cdot p_m \cdot D_{\text{ш}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,45^2}{4} = 795,216 \text{ кН}.$$

Принимаем, что осевое усилие на упорном подшипнике  $F_0$  равно  $P_0$ .

Усилие поперечного нагружения:

$$P_r = (0,04 \dots 0,12) \cdot P_0 = 0,04 \cdot 795,216 = 31,808 \text{ кН}.$$

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  $F_y$ .

$$P_r \cdot l - F_{y2} \cdot 3l = 0,$$

$$F_{y2} = \frac{P_r \cdot l}{3l} = \frac{31,808}{3} = 10,603 \text{ кН},$$

$$F_{y1} = F_{y2} + P_r = 10,603 + 31,808 = 42,411 \text{ кН}.$$

Выбор подшипников осуществляется из предположения, что максимальная осевая (для упорного подшипника) и поперечная (для радиального подшипника) нагрузки  $F_o$  и  $F_y$  соответственно не должны превышать 50...70 % статической грузоподъемности подшипников  $C_0$  [10].

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

$d_1=460$  мм,  $F_{y1}=42,411$  кН,  $C_{r1}=300$  кН, обозначение подшипника 1000892;

$d_2=380$  мм,  $F_{y2}=10,603$  кН,  $C_{r2}=247$  кН, обозначение подшипника 1000876;

$d_3=500$  мм,  $F_o=795,216$  кН,  $C_{r3}=1020$  кН, обозначение подшипника 82/500Н;

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

$$L_{10_1} = \left( \frac{C_{r1}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_{y1}) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left( \frac{300}{(0 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 42,411) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 22,7 \text{ млн.об.},$$

$$L_{10_2} = \left( \frac{C_{r2}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_{y2}) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left( \frac{247}{(0 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 10,603) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 809 \text{ млн.об.},$$

$$L_{10_3} = \left( \frac{C_{r3}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_y) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left( \frac{1020}{(1 \cdot 1 \cdot 795,216 + 1 \cdot 0) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 0,135 \text{ млн.об.}$$

где  $C_r$  – динамическая грузоподъемность подшипника,  $X$  – коэффициент осевой динамической нагрузки,  $Y$  – коэффициент радиальной динамической

нагрузки,  $K_V$  – коэффициент вращения,  $K_B$  – коэффициент динамичности нагрузки,  $K_T$  – температурный коэффициент.

Принимаем:

— для радиальных подшипников  $Y = 1$ ;  $X = 0$ ;  $K_V = 1$ ;

— для упорных подшипников  $Y = 0$ ;  $X = 1$ .

Учитывая кратковременные перегрузки при работе экструдера до 300 % рекомендовано принимать  $K_B = 2,5 \dots 3$ . Температурный коэффициент выбирается с учетом допустимого нагрева корпуса подшипника при его работе согласно таблице 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

#### **4. 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. 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 планируется проводить на горизонтальном стенде, который размещается в закрытом боксе. 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 снижения разрушений стендового корпуса при аномальных огневых испытаниях потолки отсеков сделаны легкобросными.

## **4.1. 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.
2. Вредные факторы:
  - шум реактивной струи истекающих из сопла ПС;
  - токсичность топлив и ПС.

Смесевое ракетное топливо обладает повышенной взрыво- и пожароопасностью. В соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность» производство, связанное с ракетными топливами, можно отнести к категории А – взрывоопасные.

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

В рассматриваемом помещении применено искусственное освещение, которое осуществляется люминесцентными лампами дневного света установленных на открытых светильниках.

Возможным источником поражения электрическим током являются провода осветительной системы. В соответствии с ГОСТ 12.1.019-79 «Система

стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» приняты следующие меры:

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

## **4.2. 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  $m_i$ . Зная массу стартового заряда, можно определить, сколько килограммов каждого вещества выделилось в процессе работы РДТТ.

Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№	Вещество	$C_i, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{КГ}}$	$\mu_i, \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}}$	$m_i = C_i \cdot \frac{\mu_i}{10^3}, 100\%$	$M_i = M_T \cdot m_i, \text{КГ}$
1	H <sub>2</sub>	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	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (к)	3,9018	101,960	39,783	172,220
5	N <sub>2</sub>	3,8553	28,014	10,800	46,754
6	CO <sub>2</sub>	2,0946	44,009	9,218	39,905
7	H <sub>2</sub> O	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 4.2.

Таблица 4.2 – Предельно допустимые концентрации

№	Вещество	ПДК, $\frac{\text{МГ}}{\text{М}^3}$
1	H <sub>2</sub>	не норм.
2	HCl	0,2
3	CO	3
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (к)	6
5	N <sub>2</sub>	не норм.
6	CO <sub>2</sub>	27000
7	H <sub>2</sub> O	не норм.
8	AlCl	не норм.



Из таблицы 4.2 видно, что при работе РДТТ наиболее вредными являются следующие компоненты  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (к),  $\text{CO}_2$ . Рассмотрим влияние этих веществ на здоровье человека и окружающую среду.

Оксид углерода очень опасен для здоровья.  $\text{CO}$  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. Угроза 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 виде 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  $V_{\text{потр}}$  и радиус рассеивания  $R_{\text{рас}}$ , необходимые для достижения нормативного уровня ПДК атмосферного воздуха.

Потребный объем воздуха определяется по формуле:

$$V_{\text{потр}} = \frac{M_i \cdot 10^6}{\text{ПДК}_i},$$

Радиус рассеивания ПС:

$$R_{\text{рас}} = \sqrt[3]{V_{\text{потр}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\pi}}.$$

Таблица 4.3 – Потребные характеристики

№	Вещество	$V_{\text{потр}}, \text{м}^3$	$R_{\text{рас}}, \text{м}$
1	H <sub>2</sub>	—	—
2	HCl	$1,989 \cdot 10^8$	456,3
3	CO	$1,367 \cdot 10^7$	186,861
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (к)	$2,870 \cdot 10^7$	239,308
5	N <sub>2</sub>	—	—
6	CO <sub>2</sub>	$1,478 \cdot 10^3$	8,903
7	H <sub>2</sub> O	—	—
8	AlCl	—	—

Из данных таблицы 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.

### 4.3. Расчет звукоизоляции кабины для персонала

РДТТ является источником сильных акустических шумов.

Шум – это сочетание звуков разных по силе и частоте, способное оказывать воздействие на организм. Шум создаёт внушительную нагрузку на

органы слуха человека, а также подавляет центральную нервную систему, оказывая отрицательное воздействие. Для реактивных двигателей свойственны 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  $D_a = 0,314$  м,  $F_a = 0,77$  м<sup>2</sup>;
- скорость истечения газа  $W_a = 2728,74 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;
- плотность струи газа  $\rho_a = 0,052 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

При проведении испытаний главным источником шума является высокоскоростная выхлопная струя.

Общий уровень звуковой мощности выхлопной струи двигателя [11]:

$$\begin{aligned} L_{\text{р.общ}} &= 80 \cdot \lg(W_a) + 20 \cdot \lg(\rho_a) + 10 \cdot \lg(F_a) - k = \\ &= 80 \cdot \lg(2728,74) + 20 \cdot \lg(0,052) + 10 \cdot \lg(0,077) - 44 = 194,161 \text{ дБ}, \end{aligned}$$

где  $k$  – величина, зависящая от температуры струи газ,  $k = 44$  дБ.

Октавные уровни звуковой мощности струи:

$$L_p = L_{\text{р.общ}} - \Delta L_p,$$

где  $\Delta L_p$  – разность между общим уровнем звуковой мощности и октавным уровнем звуковой мощности со среднегеометрической частотой  $f$ , значение которой находят в зависимости от безразмерного параметра – числа Струхала, определяемого для каждой третьоктавной частоты [12]:

$$Sh = \frac{f \cdot D_a}{W_a}.$$

Соответствующие значения представлены в таблице 4.4.

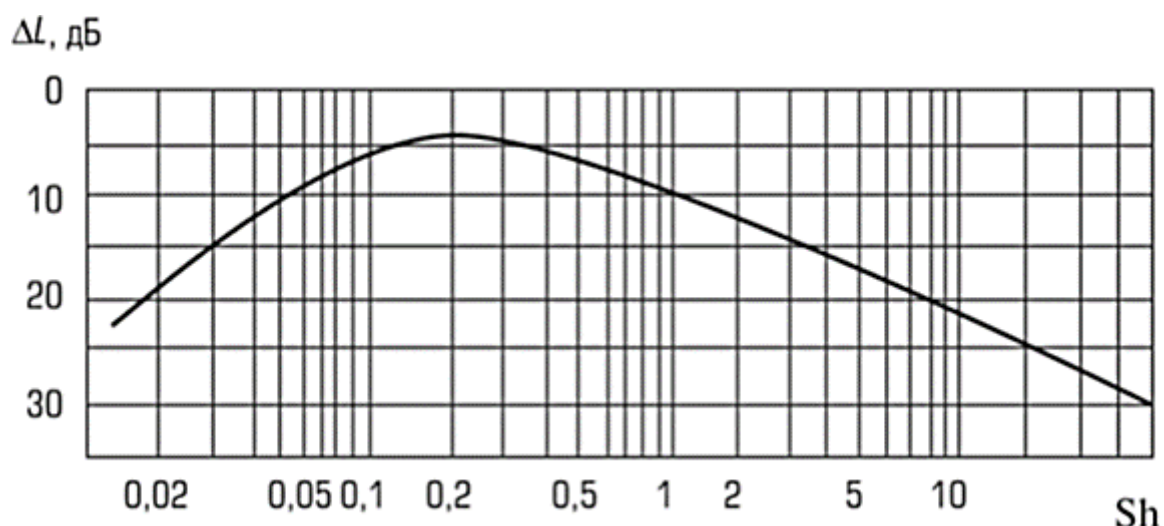


Рисунок 4.1 – Зависимость относительного спектра звуковой мощности струи от числа Струхала

Таблица 4.4 - Зависимость разности уровня звуковой мощности от числа Струхала

$f$ , Гц	$Sh$	$\Delta L_p$ , дБ	$L_p$ , дБ
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  $L_n$  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

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_n$ , дБ	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:

$$L_{\text{сниж}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{R}{R_0} \right) + 20 \cdot \lg(m \cdot f) - C,$$

где  $R$  – расстояние от источника шума до расчетной точки,  $R = 300$  м;  $R_0$  – расстояние замера уровня шума от источника,  $R_0 = 1$ ;  $m$  – поверхностная плотность железобетонной плиты,  $m = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$ ;  $C$  – постоянная, зависящая от размеров и формы звукоизолирующей перегородки,  $C = 40$ .

Фактическое значение уровня шума от источника:

$$L_{\text{факт}} = L_p - L_{\text{сниж}}.$$

Таблица 4.6 – Уровень снижение шума и нормативные значения

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_p$ , дБ	169,2	171,2	173,2	185,2	189,2	189,7	188,2	187,2	185,2
$L_{\text{сниж}}$ , дБ	99,5	105,5	111,5	123,5	129,5	135,6	141,6	145,1	147,6
$L_{\text{факт}}$ , дБ	69,7	65,6	61,7	61,6	59,6	54,1	46,6	42,1	37,6
$L_n$ , дБ	96	83	74	68	63	60	57	55	54

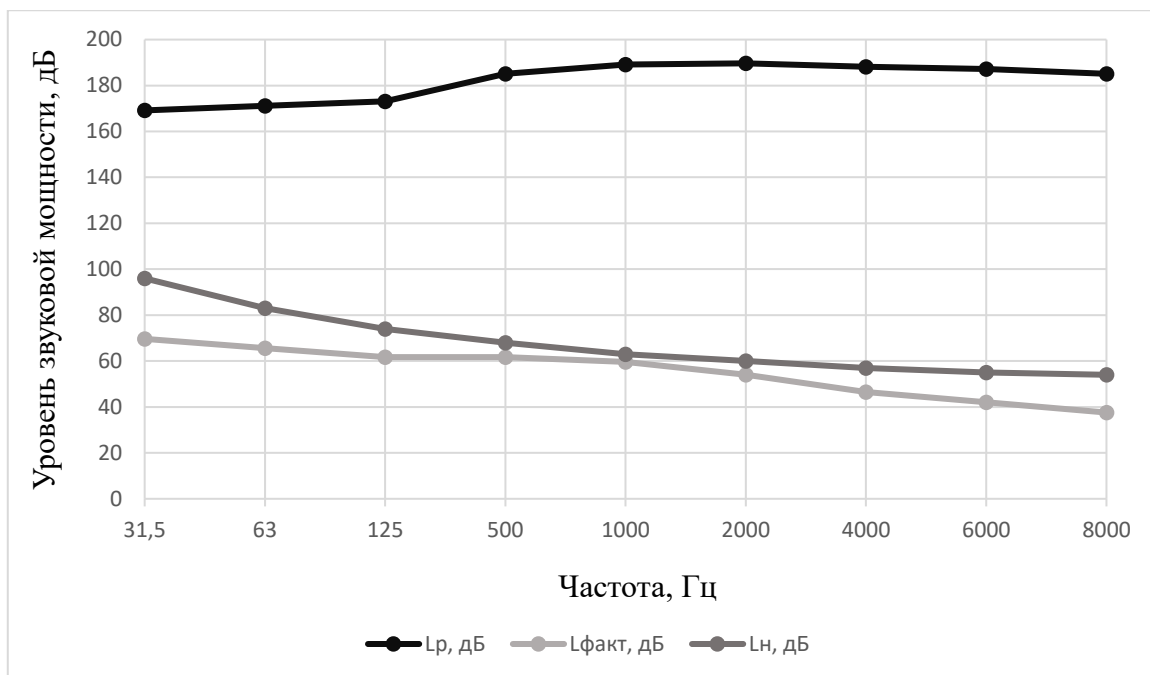


Рисунок 4.2 – Уровень звуковой мощности выхлопной струи

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.

## **5. 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.



## 5.1. 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																		

## 5.2. Затраты на проектирование, изготовление и испытание

Затраты на разработку двигательной установки:

$$C_P = S_{\text{пр}} + C_{\text{и}},$$

где  $S_{\text{пр}}$  – затраты на проектирование,  $C_{\text{и}}$  – затраты на изготовление и испытание двигателей.

### 5.2.1. Расчет заработной платы

Затраты на проектирование и изготовление:

$$S_{\text{пр}} = L_{\text{сум}} + M + K,$$

где  $M$  – прямые затраты,  $M = 0,05 \cdot L_{\text{осн}}$ ;  $K$  – косвенные затраты,  $K = 0,7 \cdot L_{\text{осн}}$ .

$$L_{\text{сум}} = L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}} + L_{\text{с}},$$

где  $L_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $L_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата,

$L_{\text{доп}} = 0,2 \cdot L_{\text{осн}}$ ;  $L_{\text{с}}$  – социальные отчисления,  $L_{\text{с}} = 0,3 \cdot (L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}})$ .

$$L_{\text{осн}} = T \cdot 1,$$

где  $T$  – трудоемкость работы, 1 – тарифная ставка за час работы.

$$T = \frac{t}{R},$$

где  $t$  – норм времени,  $R$  – количество рабочих, занятых на этапе.

Таблица 5.3 – Время занятости при конструкторской подготовке производства

Виды работ	Трудоемкость		Ведущий инженер-конструктор	Инженер-конструктор 1 категории	Инженер-конструктор 2 категории	Инженер-конструктор 3 категории
	ч	%				
Техническое предложение	170	16,1	1×50	2×60		
Техническое задание	60	5,7	1×40	1×20		
Эскизный проект	160	15,1	1×80	1×40	1×40	
Технический 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 из составленного плана определяем время, затрачиваемое каждым исполнителем при проведении проектных работ и изготовлении.

Таблица 5.7 – Время занятости исполнителей

Категория работника	Количество	$T_{\Sigma}$ , ч
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	$T_{\Sigma}$ , ч	$L_{\text{мес}}$ , руб/мес
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:

$$l_1 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{50000}{150} = 333 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 1 категории:

$$l_2 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{30000}{150} = 200 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 2 категории:

$$l_3 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{28000}{150} = 186 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 3 категории:

$$l_4 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{26000}{150} = 173 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата:

$$\begin{aligned} L_{\text{осн}} &= l_1 \cdot T_1 + l_2 \cdot T_2 + l_3 \cdot T_3 + l_4 \cdot T_4 = \\ &= 333 \cdot 270 + 200 \cdot 370 + 186 \cdot 230 + 173 \cdot 190 = 239859 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Дополнительная заработная плата:

$$L_{\text{доп}} = 0,2 \cdot L_{\text{осн}} = 0,2 \cdot 239859 = 47971 \text{ руб.}$$

Социальные отчисления:

$$L_c = 0,3 \cdot (L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (239859 + 47971) = 86349 \text{ руб.}$$

Накладные затраты при проектировании образца:

$$M = 0,05 \cdot L_{\text{осн}} = 0,05 \cdot 239859 = 11992 \text{ руб.},$$

$$K = 0,7 \cdot L_{\text{осн}} = 0,7 \cdot 239859 = 167901 \text{ руб.}$$

Суммарная заработная плата при проектировании образца:

$$\begin{aligned} L_{\text{сум}} &= L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}} + L_c = \\ &= 239859 + 47971 + 86349 = 374179 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Таблица 5.9 – Основная заработная плата при изготовлении опытного образца

Категория работника	Количество, R	$T_{\Sigma}$ , ч	$L_{\text{мес}}$ , руб/мес
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:

$$l_1 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{50000}{150} = 333 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 1 категории:



$$l_2 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{30000}{150} = 200 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-конструктора 2 категории:

$$l_3 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{28000}{150} = 186 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-технолога 1 категории:

$$l_4 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{27000}{150} = 180 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка инженера-технолога 2 категории:

$$l_5 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{26000}{150} = 173 \text{ руб.}$$

Часовая тарифная ставка рабочего:

$$l_6 = \frac{L_{\text{мес}}}{150} = \frac{22000}{150} = 146 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата:

$$\begin{aligned} L_{\text{осн}} &= l_1 \cdot T_1 + l_2 \cdot T_2 + l_3 \cdot T_3 + l_4 \cdot T_4 + l_5 \cdot T_5 + l_6 \cdot T_6 = \\ &= 333 \cdot 170 + 200 \cdot 180 + 186 \cdot 320 + 180 \cdot 140 + 173 \cdot 320 + 146 \cdot 570 = \\ &= 316680 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Дополнительная заработная плата:

$$L_{\text{доп}} = 0,2 \cdot L_{\text{осн}} = 0,2 \cdot 316680 = 63336 \text{ руб.}$$

Социальные отчисления:

$$L_{\text{с}} = 0,3 \cdot (L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (316680 + 63336) = 114004 \text{ руб.}$$

Накладные затраты при изготовлении образца:

$$M = 0,05 \cdot L_{\text{осн}} = 0,05 \cdot 316680 = 15834 \text{ руб.},$$

$$K = 0,7 \cdot L_{\text{осн}} = 0,7 \cdot 316680 = 221676 \text{ руб.}$$

Суммарная заработная плата при изготовлении образца:

$$\begin{aligned} L_{\text{сум}} &= L_{\text{осн}} + L_{\text{доп}} + L_{\text{с}} = \\ &= 316680 + 63336 + 114004 = 494020 \text{ руб.} \end{aligned}$$

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

### 5.2.2. 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:

$$C_{об} = 130000 \cdot 7 + 15000 \cdot 4 + 280000 \cdot 1 = 1250000 \text{ руб.}$$

### 5.2.3. 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:

$$C_{\text{по}} = 21999 + 19999 + 128400 + 195000 = 365398 \text{ руб.}$$

### 5.2.4. Затраты на материалы

Затраты на основные материалы:

$$S_{\text{м}} = \left(1 + \frac{5}{100}\right) \cdot \sum (G_{\text{мп}i} \cdot \text{Ц}_{\text{м}i}),$$

где  $G_{\text{мп}i}$  – норма расхода основного материала данного вида,  $\text{Ц}_{\text{м}i}$  – оптовая цена основного материала.

Норма расхода основного материала:

$$G_{\text{мп}i} = \sum \frac{G_{\text{д}i}}{\text{КИМ}_i},$$

где  $G_{\text{д}i}$  – масса детали,  $\text{КИМ}_i$  – 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:

$$S_m = \left(1 + \frac{5}{100}\right) \cdot \sum (G_{\text{мр } i} \cdot \text{Ц}_{\text{м } i}) = \left(1 + \frac{5}{100}\right) \cdot 360750 = 378787 \text{ руб.}$$

### 5.2.5. 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

### 5.2.6. 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:

$$C_m = S \cdot n_{\Sigma} = 1\,092\,280 \cdot 40 = 43\,691\,200 \text{ руб.},$$

где  $n_{\Sigma}$  – 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:

$$C_{\text{и}} = 43\,691\,200 + 15\,950\,000 + 2\,536\,000 = 62\,177\,200 \text{ руб.}$$

### **5.2.7. Полные затраты**

Затраты на проектирование, как было определено ранее:

$$S_{\text{пр}} = 2\,170\,010 \text{ руб.}$$

Полные затраты составляют:

$$C_p = S_{\text{пр}} + C_{\text{и}} = 2\,170\,010 + 62\,177\,200 = 64\,347\,210 \text{ руб.}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы спроектирован ракетный двигатель твердого топлива третьей ступени ракеты-носителя. Были решены следующие задачи:

### 1. Конструкторская часть:

- Спроектирована форма заряда, удовлетворяющая требованиям ТЗ.
- Подобраны материалы корпуса, проведен тепловой расчет.
- Выбрана и спроектирована конструкция соплового блока, проведен тепловой расчет.
- Проведены прочностные расчеты разъемных соединений.
- Определена конструкция воспламенительного устройства.

### 2. Исследовательская часть:

- Определен качественный характер зависимости параметров двигателя от параметров используемых топлив.
- Обоснован выбор топливной пары.

### 3. Технологическая часть:

- Произведена проработка технологического процесса изготовления заряда из смесового твердого ракетного топлива.

### 4. Охрана труда и экология:

- Проведен анализ вредных и опасных факторов процесса проведения огневых стендовых испытаний.
- Проведен расчет и анализ шумового воздействия на кабину персонала во время испытаний.

### 5. Организационно-экономическая часть:

- Разработан график проведения НИиОКР.

— Проведен расчет затрат на проектирование, изготовление опытных образцов и на их испытания.

Спроектированный двигатель полностью удовлетворяет требованиям, представленным в ТЗ.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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 Лавалья 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. Фиошина М.А., Русин Д.Л. Основы химии и технологии порохов и твердых ракетных топлив: Учеб. пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 2001.
9. Ягодников Д.А., Арфьев К.Ю., Козичев В.В., Федотова К.В., Мелешко В.Ю. Технология производства и свойства твердых топлив. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – с.

10. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Детали машин. Курсовое проектирование: Учебное пособие для машиностр. спец. учреждений среднего профессионального образования. – М.: Машиностроение, 2004. – 560 с.
11. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов, Москва: Логос, 2016. 424 с.
12. Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков А.Ф., Павлихин Г.П. Охрана окружающей среды – Москва: «Высшая школа», 1983 - с.264.
13. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 592 с.
14. 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:

$$C_{9,490}H_{36,776}O_{23,667}N_{6,754}Cl_{5,532}Al_{6,672}$$
$$H_{\pi} = -2123 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

$$U = 1,554 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0,26}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

### Топливо ARCIT – 373D.

Условная химическая формула:

$$C_{9,574}H_{37,389}O_{21,189}N_{5,039}Cl_{6,468}Al_{7,734}$$
$$H_{\pi} = -1934 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

$$U = 3,49 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0,22}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1770 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

### Топливо RD – 2435.

Условная химическая формула:

$$C_{11,035}H_{39,940}O_{25,296}N_{7,637}Cl_{5,362}S_{0,008}Al_{4,447}Na_{0,016}$$
$$H_{\pi} = -1979 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

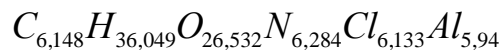
$$U = 0,635 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,693}, \frac{\text{ММ}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1770 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

**Топливо ТР – Н – 3062.**

Условная химическая формула:



$$H_{\Pi} = -2229 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ}}.$$

Закон горения:

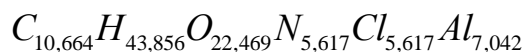
$$U = 5,11 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,22}, \frac{\text{ММ}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1820 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

**Топливо ПХА – 3М.**

Условная химическая формула:



$$H_{\Pi} = -1934 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ}}.$$

Закон горения:

$$U = 3,44 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,26}, \frac{\text{ММ}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1740 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

**Топливо ПХА–4М.**

Условная химическая формула:



$$H_{\Pi} = -2034 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

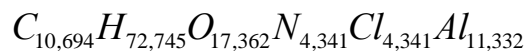
$$U = 6,49 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,24}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

**Топливо ПХА–5М.**

Условная химическая формула:



$$H_{\Pi} = -1685 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

$$U = 3,44 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,26}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 1530 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

**Топливо ПХК–1М.**

Условная химическая формула:



$$H_{\Pi} = -2426 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

$$U = 4,72 \cdot \left( \frac{P}{98066,5} \right)^{0,28}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 2040 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

**Топливо ПХН–2М.**

Условная химическая формула:

$$C_{5,268}H_{4,800}O_{12,375}N_{2,062}Cl_{3,663}Al_{22,237}$$

$$H_{\text{п}} = -64,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Закон горения:

$$U = 14,5 \cdot \left( \frac{p}{98066,5} \right)^{0,19}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Плотность топлива:

$$\rho = 2430 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

## 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:  $p(\text{кам}) = 5$

2-й параметр:  $I = -2030.061$

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

Равновесные параметры при  $p(\text{кам}) = 5$  МПа,  $p = 5$  МПа (камера, СИ):

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

$U = -2878.85$        $M = 31.9669$        $C_p = 1.81663$        $k = 1.14876$        $C_p' = 6.49239$

$k' = 1.18683$        $A_p = 0.0005576$        $B_v = 0.0005198$        $G_t = 0.218428e-6$        $MMg = 22.1076$

$R_g = 376.087$        $C_{p_g} = 1.94772$        $k_g = 1.2393$        $C_{p_g}' = 7.84797$        $k_g' = 1.2147$

$M_u = 0.0001035$        $L_t = 0.355691$        $L_t' = 2.19692$        $Pr = 0.566496$        $Pr' = 0.36956$

$A = 1008.29$        $z = 0.374489$        $B_m = 0.140977$        $n = -$        $w = 0$

$Mach = 0$        $Fre_l = -$        $F' = -$        $\alpha = 0.877379$        $Dens = -$

Равновесные концентрации (моль/кг):

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

$O_2 = 0.66859$        $O_2^+ = 0.3311e-8$        $O_2^- = 0.2681e-6$        $O_3 = 0.6176e-5$

$H = 1.7385$        $H^+ = 0.5057e-10$        $H^- = 0.4006e-6$        $H_2 = 2.9299$

$H_2^+ = 0.4980e-11$        $H_3^+ = 0.2307e-9$        $OH = 2.2669$        $OH^+ = 0.1011e-8$

$OH^- = 0.6179e-5$        $HO_2 = 0.00369$        $HO_2^- = 0.2324e-8$        $H_2O = 6.8972$

$H_2O^+ = 0.1836e-7$        $H_2O_2 = 0.3782e-3$        $H_3O^+ = 0.6359e-6$        $Cl = 0.8259$

$Cl^+ = 0.4649e-9$        $Cl^- = 0.3415e-3$        $Cl_2 = 0.00121$        $ClO = 0.00636$

$ClO_2 = 0.1040e-5$        $Cl_2O = 0.1411e-6$        $HCl = 2.1448$        $HOCl = 0.00166$

$N = 0.0018$        $N_2 = 3.6807$        $N_2^+ = 0.1407e-11$        $N_3 = 0.9000e-8$

$NO = 0.42609$        $NO^+ = 0.1801e-5$        $NO_2 = 0.3703e-3$        $NO_2^+ = 0.7581e-10$

$NO_2^- = 0.1265e-7$        $NO_3^- = 0.7657e-11$        $N_2O = 0.7474e-4$        $N_2O_3 = 0.2847e-9$

$NH = 0.5990e-3$        $NH_2 = 0.2041e-3$        $NH_3 = 0.7342e-4$        $NH_4^+ = 0.1076e-9$

$N_2H_2 = 0.4018e-7$     $N_2H_4 = 0.4661e-11$     $HN = 0.2700e-8$     $HNO = 0.5472e-3$   
 $CINO = 0.6171e-4$     $CINO_2 = 0.4729e-8$     $C = 0.1988e-6$     $C_2 = 0.2852e-11$   
 $CO = 4.3293$     $CO^+ = 0.1414e-9$     $CO_2 = 1.1454$     $CO_2^+ = 0.3645e-9$   
 $C_2O = 0.1326e-7$     $C_3O_2 = 0.3724e-11$     $CH = 0.6470e-7$     $CH_2 = 0.4623e-7$   
 $CH_3 = 0.4132e-7$     $CH_4 = 0.6017e-8$     $C_2H = 0.1785e-10$     $C_2H_2 = 0.1249e-9$   
 $HCO = 0.4915e-3$     $HCO^+ = 0.3964e-7$     $COOH = 0.2144e-3$     $H_2CO = 0.9655e-5$   
 $CH_2OH = 0.2178e-7$     $CCl = 0.1051e-6$     $CCl_2 = 0.6990e-9$     $ClCO = 0.6937e-4$   
 $Cl_2CO = 0.3928e-7$     $CHCl = 0.8576e-8$     $CH_2Cl = 0.5135e-8$     $CH_3Cl = 0.2316e-9$   
 $CN = 0.2395e-5$     $CN^- = 0.4361e-8$     $NCN = 0.6690e-9$     $CNN = 0.1243e-10$   
 $ClCN = 0.2148e-6$     $Al = 0.00585$     $Al^+ = 0.3873e-3$     $Al_2 = 0.1606e-6$   
 $AlO = 0.05109$     $AlO^- = 0.2132e-4$     $AlO_2 = 0.00751$     $AlO_2^- = 0.6171e-6$   
 $Al_2O = 0.00201$     $Al_2O_2 = 0.00406$     $Al_2O_3(c) = 3.6729$     $Al_2O_3 = 0.1708e-3$   
 $AlH = 0.6295e-3$     $AlH_2 = 0.2841e-5$     $AlH_3 = 0.1001e-6$     $AlOH = 0.21227$   
 $HAIO = 0.4356e-3$     $HAIO_2 = 0.00553$     $Al(OH)_2 = 0.02454$     $Al(OH)_3 = 0.01162$   
 $AlCl = 0.0653$     $AlCl_2 = 0.00325$     $AlCl_3 = 0.3629e-3$     $Al_2Cl_6 = 0.2360e-11$   
 $ClAlO = 0.02986$     $Cl_2AlO = 0.1618e-3$     $AlHCl = 0.2127e-3$     $AlH_2Cl = 0.3556e-5$   
 $AlN = 0.1330e-4$     $AlC = 0.5165e-9$

Равновесные параметры при  $p(\text{кам})=5$  МПа,  $p=2.9199$  МПа (кр. сечение, СИ):

$p=2.91985$     $T=3745.24$     $v=0.298465$     $S=8.87345$     $I=-2511.45$   
 $U=-3313.55$     $M=31.7231$     $C_p=1.81432$     $k=1.14712$     $C_p'=6.40452$   
 $k'=1.1794$     $A_p=0.0005698$     $B_v=0.0005338$     $G_t=0.372558e-6$     $MMg=22.1177$   
 $R_g=375.915$     $C_{pg}=1.94768$     $k_g=1.23917$     $C_p'g=8.09876$     $k'g=1.2064$   
 $Mu=0.0001007$     $L_t=0.344362$     $L_t'=2.19376$     $Pr=0.569505$     $Pr'=0.371725$   
 $A=981.214$     $z=0.381007$     $B_m=0.141254$     $n=1.10933$     $w=981.214$   
 $Mach=1$     $F_{rel}=1$     $F'=0.0003042$     $I_{sp}=1869.37$     $B=1520.9$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.1198e-4$     $O = 0.68983$     $O^+ = 0.6825e-11$     $O^- = 0.9407e-6$   
 $O_2 = 0.64372$     $O_2^+ = 0.1539e-8$     $O_2^- = 0.1215e-6$     $O_3 = 0.3381e-5$   
 $H = 1.6493$     $H^+ = 0.1896e-10$     $H^- = 0.1866e-6$     $H_2 = 2.8714$



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	HAIO = 0.2516e-3	HAIO2 = 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):

$e^- = 0.1461e-6$	$O = 0.17032$	$O^- = 0.4335e-9$	$O_2 = 0.28558$
$O_2^- = 0.2806e-10$	$O_3 = 0.1059e-7$	$H = 0.73826$	$H^- = 0.6554e-10$
$H_2 = 2.1375$	$OH = 0.77374$	$OH^- = 0.3457e-8$	$HO_2 = 0.1005e-3$
$H_2O = 8.9243$	$H_2O^+ = 0.7154e-11$	$H_2O_2 = 0.5408e-5$	$H_3O^+ = 0.3778e-8$
$Cl = 0.6041$	$Cl^- = 0.4659e-5$	$Cl_2 = 0.1538e-3$	$ClO = 0.3514e-3$
$ClO_2 = 0.2843e-8$	$Cl_2O = 0.3155e-9$	$HCl = 2.5207$	$HOCl = 0.8604e-4$
$N = 0.2712e-4$	$N_2 = 3.8553$	$N_3 = 0.1501e-11$	$NO = 0.08074$
$NO^+ = 0.9966e-8$	$NO_2 = 0.7658e-5$	$N_2O = 0.1088e-5$	$NH = 0.3493e-5$
$ClNO_2 = 0.3292e-11$	$C = 0.2405e-10$	$CO = 3.3809$	$CO_2 = 2.0946$
$CH = 0.3019e-11$	$CH_2 = 0.3096e-11$	$CH_3 = 0.5552e-11$	$HCO = 0.3198e-5$
$HCN = 0.5464e-7$	$HNC = 0.6481e-8$	$ClCN = 0.1976e-9$	$Al = 0.3119e-4$
$Al^+ = 0.4800e-5$	$AlO = 0.5010e-3$	$AlO^- = 0.3816e-8$	$AlO_2 = 0.1674e-4$
$AlO_2^- = 0.5808e-10$	$Al_2O = 0.1515e-5$	$Al_2O_2 = 0.4566e-5$	$Al_2O_3(c) = 3.9018$
$Al_2O_3 = 0.5970e-7$	$AlH = 0.7250e-6$	$AlH_2 = 0.1623e-9$	$AlH_3 = 0.2730e-11$
$AlOH = 0.00596$	$HALO = 0.7577e-6$	$HALO_2 = 0.7900e-4$	$Al(OH)_2 = 0.1757e-3$
$Al(OH)_3 = 0.2529e-3$	$AlCl = 0.0022$	$AlCl_2 = 0.4449e-4$	$AlCl_3 = 0.1410e-4$
$AlN = 0.1142e-8$			

## 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: С 5.4755 Н 26.1645 О 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 К (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 К (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 К (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

$\text{CH}_4 = 0.2106\text{e-}3$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.1072\text{e-}9$      $\text{C}_2\text{H}_4 = 0.4199\text{e-}9$      $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.4126\text{e-}10$   
 $\text{HCO} = 0.5368\text{e-}7$      $\text{COOH} = 0.3505\text{e-}7$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.4585\text{e-}5$      $\text{HCOOH} = 0.2145\text{e-}4$   
 $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.2145\text{e-}4$      $\text{CH}_4\text{O} = 0.3943\text{e-}7$      $\text{CH}_2\text{OH} = 0.5417\text{e-}10$      $\text{ClCO} = 0.1329\text{e-}8$   
 $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.3252\text{e-}9$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.4383\text{e-}10$      $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.1292\text{e-}6$      $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.4166\text{e-}10$   
 $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} = 0.1620\text{e-}11$      $\text{HClCO} = 0.9286\text{e-}7$      $\text{HCN} = 0.7970\text{e-}5$      $\text{HNC} = 0.6997\text{e-}7$   
 $\text{ClCN} = 0.4672\text{e-}9$      $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.9075$      $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.4548\text{e-}11$      $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.1910\text{e-}5$   
 $\text{AlCl}_2 = 0.1308\text{e-}10$      $\text{AlCl}_3 = 0.1263\text{e-}5$      $\text{AlHCl}_2 = 0.1200\text{e-}9$      $\text{ClAlOH} = 0.1719\text{e-}10$   
 $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.2567\text{e-}5$      $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.8344\text{e-}5$

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

$p=5$      $T=1600$      $v=0.063902$      $S=6.47043$      $I=-8829.09$   
 $U=-9089.07$      $M=27.9254$      $C_p=1.56323$      $k=1.14645$      $C_p'=1.59456$   
 $k'=1.14321$      $A_p=0.0006251$      $B_v=0.0006251$      $G_t=0.200008\text{e-}6$      $\text{MMg}=25.0474$   
 $R_g=331.945$      $C_{pg}=1.72761$      $k_g=1.23784$      $C_p'g=1.77946$      $k'g=1.22942$   
 $M_u=0.0000554$      $L_t=0.15537$      $L_t'=0.15537$      $Pr=0.61591$      $Pr'=0.634395$   
 $A=604.366$      $z=0.398413$      $B_m=0.151441$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$\text{O} = 0.2007\text{e-}9$      $\text{O}_2 = 0.3993\text{e-}9$      $\text{H} = 0.5522\text{e-}4$      $\text{H}_2 = 2.1464$   
 $\text{OH} = 0.9398\text{e-}5$      $\text{HO}_2 = 0.1582\text{e-}11$      $\text{H}_2\text{O} = 9.3697$      $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.9806\text{e-}10$   
 $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.1166\text{e-}11$      $\text{Cl} = 0.6373\text{e-}4$      $\text{Cl}^- = 0.2168\text{e-}11$      $\text{Cl}_2 = 0.6993\text{e-}6$   
 $\text{ClO} = 0.3756\text{e-}10$      $\text{HCl} = 3.1301$      $\text{HOCl} = 0.3405\text{e-}7$      $\text{N}_2 = 3.8954$   
 $\text{NO} = 0.1874\text{e-}6$      $\text{N}_2\text{O} = 0.3611\text{e-}10$      $\text{NH} = 0.6368\text{e-}10$      $\text{NH}_2 = 0.4229\text{e-}7$   
 $\text{NH}_3 = 0.6059\text{e-}3$      $\text{NH}_4^+ = 0.1002\text{e-}11$      $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.2167\text{e-}11$      $\text{HNO} = 0.1212\text{e-}9$   
 $\text{NH}_2\text{OH} = 0.2450\text{e-}10$      $\text{ClNO} = 0.2970\text{e-}11$      $\text{CO} = 2.2366$      $\text{CO}_2 = 3.2388$   
 $\text{CH}_3 = 0.7984\text{e-}8$      $\text{CH}_4 = 0.1486\text{e-}4$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.5553\text{e-}10$      $\text{C}_2\text{H}_4 = 0.2636\text{e-}10$   
 $\text{HCO} = 0.2864\text{e-}6$      $\text{COOH} = 0.2084\text{e-}6$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.4386\text{e-}5$      $\text{HCOOH} = 0.2048\text{e-}4$   
 $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.2048\text{e-}4$      $\text{CH}_3\text{O} = 0.1069\text{e-}11$      $\text{CH}_4\text{O} = 0.1167\text{e-}7$      $\text{CH}_2\text{OH} = 0.1314\text{e-}9$   
 $\text{ClCO} = 0.1235\text{e-}7$      $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.1040\text{e-}8$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.8595\text{e-}10$      $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.2679\text{e-}7$   
 $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.2482\text{e-}10$      $\text{HClCO} = 0.1614\text{e-}6$      $\text{CN} = 0.1042\text{e-}11$      $\text{NCO} = 0.2105\text{e-}11$   
 $\text{HCN} = 0.6965\text{e-}5$      $\text{HNC} = 0.1210\text{e-}6$      $\text{ClCN} = 0.1358\text{e-}8$      $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.9075$

$\text{AlOH} = 0.1975\text{e-}9$      $\text{Al(OH)}_2 = 0.4936\text{e-}9$      $\text{Al(OH)}_3 = 0.1563\text{e-}4$   
 $\text{AlCl}_2 = 0.8294\text{e-}9$      $\text{AlCl}_3 = 0.6259\text{e-}5$      $\text{ClAlO} = 0.7927\text{e-}10$   
 $\text{ClAlOH} = 0.1430\text{e-}8$      $\text{ClAl(OH)}_2 = 0.2006\text{e-}4$      $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.5005\text{e-}4$

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

$p=5$      $T=1800$      $v=0.0718914$      $S=6.65995$      $I=-8507.22$   
 $U=-8807.14$      $M=27.9258$      $C_p=1.60074$      $k=1.14254$      $C_p'=1.62457$   
 $k'=1.14022$      $A_p=0.0005557$      $B_v=0.0005557$      $G_t=0.200010\text{e-}6$      $\text{MMg}=25.0475$   
 $R_g=331.944$      $C_{pg}=1.76842$      $k_g=1.23108$      $C_{p'g}=1.80728$      $k'g=1.22517$   
 $M_u=0.0000605$      $L_t=0.17219$      $L_t'=0.17219$      $Pr=0.621106$      $Pr'=0.634754$   
 $A=640.196$      $z=0.398397$      $B_m=0.15144$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$\text{O} = 0.1519\text{e-}7$      $\text{O}_2 = 0.3249\text{e-}7$      $\text{H} = 0.3483\text{e-}3$      $\text{H}_2 = 1.9676$   
 $\text{OH} = 0.1110\text{e-}3$      $\text{HO}_2 = 0.1290\text{e-}9$      $\text{H}_2\text{O} = 9.5489$      $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.2245\text{e-}8$   
 $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.6086\text{e-}10$      $\text{Cl} = 0.4239\text{e-}3$      $\text{Cl}^- = 0.6881\text{e-}10$      $\text{Cl}_2 = 0.3748\text{e-}5$   
 $\text{ClO} = 0.1864\text{e-}8$      $\text{HCl} = 3.1293$      $\text{HOCl} = 0.3476\text{e-}6$      $\text{N} = 0.5005\text{e-}10$   
 $\text{N}_2 = 3.8955$      $\text{NO} = 0.3631\text{e-}5$      $\text{NO}_2 = 0.5229\text{e-}11$      $\text{N}_2\text{O} = 0.6742\text{e-}9$   
 $\text{NH} = 0.1217\text{e-}8$      $\text{NH}_2 = 0.1816\text{e-}6$      $\text{NH}_3 = 0.3328\text{e-}3$      $\text{NH}_4^+ = 0.7907\text{e-}11$   
 $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.1139\text{e-}10$      $\text{HNO} = 0.2406\text{e-}8$      $\text{HNO}_2 = 0.3498\text{e-}10$      $\text{NH}_2\text{OH} = 0.1250\text{e-}9$   
 $\text{ClNO} = 0.9867\text{e-}10$      $\text{CO} = 2.416$      $\text{CO}_2 = 3.0595$      $\text{CH}_2 = 0.1344\text{e-}11$   
 $\text{CH}_3 = 0.6831\text{e-}8$      $\text{CH}_4 = 0.1877\text{e-}5$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.3249\text{e-}10$      $\text{C}_2\text{H}_4 = 0.2990\text{e-}11$   
 $\text{HCO} = 0.1039\text{e-}5$      $\text{COOH} = 0.8331\text{e-}6$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.4195\text{e-}5$      $\text{HCOOH} = 0.1989\text{e-}4$   
 $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.1989\text{e-}4$      $\text{CH}_3\text{O} = 0.2654\text{e-}11$      $\text{CH}_4\text{O} = 0.4485\text{e-}8$      $\text{CH}_2\text{OH} = 0.2605\text{e-}9$   
 $\text{ClCO} = 0.6936\text{e-}7$      $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.2577\text{e-}8$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.1434\text{e-}9$      $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.7810\text{e-}8$   
 $\text{CHCl}_2 = 0.1705\text{e-}11$      $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.1657\text{e-}10$      $\text{HClCO} = 0.2471\text{e-}6$      $\text{CN} = 0.1260\text{e-}10$   
 $\text{NCO} = 0.2673\text{e-}10$      $\text{HCN} = 0.6193\text{e-}5$      $\text{HNC} = 0.1826\text{e-}6$      $\text{ClCN} = 0.3094\text{e-}8$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.9073$      $\text{AlOH} = 0.1170\text{e-}7$      $\text{HAlO}_2 = 0.2537\text{e-}10$      $\text{Al(OH)}_2 = 0.1854\text{e-}7$   
 $\text{Al(OH)}_3 = 0.8020\text{e-}4$      $\text{AlCl} = 0.7467\text{e-}8$      $\text{AlCl}_2 = 0.2017\text{e-}7$      $\text{AlCl}_3 = 0.2123\text{e-}4$   
 $\text{ClAlO} = 0.4730\text{e-}8$      $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.5038\text{e-}10$      $\text{AlHCl} = 0.2314\text{e-}11$      $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.1763\text{e-}11$

$\text{AlHCl}_2=0.2213\text{e-}7$                        $\text{ClAlOH}=0.4327\text{e-}7$                        $\text{ClAl(OH)}_2=0.9849\text{e-}4$   
 $\text{Cl}_2\text{AlOH}=0.1984\text{e-}3$

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

$p=5$                $T=2000$                $v=0.0798839$                $S=6.83283$                $I=-8178.99$   
 $U=-8518.87$      $M=27.9268$      $C_p=1.63457$      $k=1.13918$      $C_p'=1.65883$   
 $k'=1.13716$      $A_p=0.0005005$      $B_v=0.0005005$      $G_t=0.200039\text{e-}6$      $\text{MMg}=25.0479$   
 $R_g=331.938$      $C_{pg}=1.80311$      $k_g=1.22563$      $C_{p'g}=1.84142$      $k'g=1.22055$   
 $M_u=0.0000654$      $L_t=0.188626$      $L_t'=0.188626$      $Pr=0.624758$      $Pr'=0.638033$   
 $A=673.926$      $z=0.398352$      $B_m=0.151438$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$\text{O} = 0.4861\text{e-}6$                $\text{O}_2 = 0.1101\text{e-}5$                $\text{H} = 0.00153$                $\text{H}_2 = 1.8345$   
 $\text{OH} = 0.7997\text{e-}3$      $\text{HO}_2 = 0.4378\text{e-}8$                $\text{H}_2\text{O} = 9.6819$                $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.2762\text{e-}7$   
 $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.6690\text{e-}9$                $\text{Cl} = 0.00194$                $\text{Cl}^- = 0.6892\text{e-}9$                $\text{Cl}_2 = 0.1437\text{e-}4$   
 $\text{ClO} = 0.4251\text{e-}7$                $\text{HCl} = 3.1266$                $\text{HOCl} = 0.2231\text{e-}5$                $\text{N} = 0.1234\text{e-}8$   
 $\text{N}_2 = 3.8956$                $\text{NO} = 0.3895\text{e-}4$                $\text{NO}_2 = 0.2247\text{e-}9$                $\text{N}_2\text{O} = 0.7080\text{e-}8$   
 $\text{NH} = 0.1289\text{e-}7$      $\text{NH}_2 = 0.5833\text{e-}6$      $\text{NH}_3 = 0.2064\text{e-}3$      $\text{NH}_4^+ = 0.1923\text{e-}10$   
 $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.4366\text{e-}10$      $\text{HNO} = 0.2651\text{e-}7$      $\text{HNO}_2 = 0.6899\text{e-}9$      $\text{NH}_2\text{OH} = 0.4677\text{e-}9$   
 $\text{ClNO} = 0.1638\text{e-}8$      $\text{CO} = 2.5499$                $\text{CO}_2 = 2.9256$                $\text{CH}_2 = 0.6295\text{e-}11$   
 $\text{CH}_3 = 0.6000\text{e-}8$      $\text{CH}_4 = 0.3611\text{e-}6$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.2106\text{e-}10$      $\text{HCO} = 0.2896\text{e-}5$   
 $\text{COOH} = 0.2527\text{e-}5$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.4041\text{e-}5$      $\text{HCOOH} = 0.1961\text{e-}4$      $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.1961\text{e-}4$   
 $\text{CH}_3\text{O} = 0.5509\text{e-}11$      $\text{CH}_4\text{O} = 0.2092\text{e-}8$      $\text{CH}_2\text{OH} = 0.4520\text{e-}9$      $\text{ClCO} = 0.2744\text{e-}6$   
 $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.5339\text{e-}8$      $\text{CHCl} = 0.1508\text{e-}11$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.2156\text{e-}9$      $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.2918\text{e-}8$   
 $\text{CHCl}_2 = 0.4065\text{e-}11$      $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.1204\text{e-}10$      $\text{HClCO} = 0.3476\text{e-}6$      $\text{CN} = 0.9186\text{e-}10$   
 $\text{NCO} = 0.2042\text{e-}9$      $\text{HCN} = 0.5623\text{e-}5$      $\text{HNC} = 0.2530\text{e-}6$      $\text{ClCN} = 0.5978\text{e-}8$   
 $\text{Al} = 0.1539\text{e-}11$      $\text{AlO} = 0.3590\text{e-}10$      $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.9069$                $\text{AlH} = 0.1587\text{e-}11$   
 $\text{AlOH} = 0.2984\text{e-}6$      $\text{HAlO} = 0.1780\text{e-}11$      $\text{HAlO}_2 = 0.1268\text{e-}8$      $\text{Al(OH)}_2 = 0.3320\text{e-}6$   
 $\text{Al(OH)}_3 = 0.2964\text{e-}3$      $\text{AlCl} = 0.1675\text{e-}6$      $\text{AlCl}_2 = 0.2517\text{e-}6$      $\text{AlCl}_3 = 0.5520\text{e-}4$   
 $\text{ClAlO} = 0.1218\text{e-}6$      $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.1326\text{e-}8$      $\text{AlHCl} = 0.7541\text{e-}10$      $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.2614\text{e-}10$

$\text{AlHCl}_2=0.1329\text{e-6}$                        $\text{ClAlOH}=0.6470\text{e-6}$                        $\text{ClAl(OH)}_2=0.3489\text{e-3}$   
 $\text{Cl}_2\text{AlOH}=0.5883\text{e-3}$

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

$p=5$                $T=2200$                $v=0.0878906$                $S=6.99294$                $I=-7842.94$   
 $U=-8222.84$      $M=27.9307$      $C_p=1.66564$      $k=1.13627$      $C_p'=1.70453$   
 $k'=1.13381$      $A_p=0.0004563$      $B_v=0.0004562$      $G_t=0.200138\text{e-6}$      $\text{MMg}=25.0472$   
 $R_g=331.948$      $C_{pg}=1.83316$      $k_g=1.22112$      $C_p'g=1.89344$      $k'g=1.21475$   
 $M_u=0.0000701$      $L_t=0.204717$      $L_t'=0.204717$      $Pr=0.627314$      $Pr'=0.647944$   
 $A=705.8$                $z=0.398245$      $B_m=0.151427$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.1367\text{e-11}$                $O = 0.8298\text{e-5}$                $O_2 = 0.1964\text{e-4}$                $H = 0.00514$   
 $H_2 = 1.7338$                $OH = 0.00402$                $HO_2 = 0.7829\text{e-7}$                $H_2O = 9.781$   
 $H_2O_2 = 0.2157\text{e-6}$      $H_3O^+ = 0.4619\text{e-8}$                $Cl = 0.00672$                $Cl^- = 0.4685\text{e-8}$   
 $Cl_2 = 0.4306\text{e-4}$                $ClO = 0.5483\text{e-6}$                $Cl_2O = 0.4337\text{e-11}$                $HCl = 3.1193$   
 $HOCl = 0.1019\text{e-4}$                $N = 0.1705\text{e-7}$                $N_2 = 3.8955$                $NO = 0.2713\text{e-3}$   
 $NO^+ = 0.1716\text{e-11}$      $NO_2 = 0.4884\text{e-8}$                $N_2O = 0.4879\text{e-7}$                $NH = 0.8897\text{e-7}$   
 $NH_2 = 0.1519\text{e-5}$      $NH_3 = 0.1402\text{e-3}$      $NH_4^+ = 0.3888\text{e-10}$      $N_2H_2 = 0.1332\text{e-9}$   
 $HN_3 = 0.1855\text{e-11}$      $HNO = 0.1901\text{e-6}$      $HNO_2 = 0.7953\text{e-8}$      $NH_2OH = 0.1395\text{e-8}$   
 $ClNO = 0.1634\text{e-7}$      $CO = 2.6532$                $CO_2 = 2.8223$                $C_2O = 0.2793\text{e-11}$   
 $CH_2 = 0.2224\text{e-10}$      $CH_3 = 0.5409\text{e-8}$      $CH_4 = 0.9509\text{e-7}$      $C_2H_2 = 0.1485\text{e-10}$   
 $HCO = 0.6681\text{e-5}$      $HCO^+ = 0.1087\text{e-10}$      $COOH = 0.6273\text{e-5}$      $H_2CO = 0.3926\text{e-5}$   
 $HCOOH = 0.1954\text{e-4}$      $CH_2O_2 = 0.1954\text{e-4}$      $CH_3O = 0.1008\text{e-10}$      $CH_4O = 0.1129\text{e-8}$   
 $CH_2OH = 0.7147\text{e-9}$      $CCl = 0.3943\text{e-11}$                $ClCO = 0.8415\text{e-6}$      $Cl_2CO = 0.9692\text{e-8}$   
 $CHCl = 0.6161\text{e-11}$      $CH_2Cl = 0.3012\text{e-9}$      $CH_3Cl = 0.1312\text{e-8}$      $CHCl_2 = 0.8281\text{e-11}$   
 $CH_2Cl_2 = 0.9327\text{e-11}$      $HClCO = 0.4598\text{e-6}$      $CN = 0.4658\text{e-9}$      $NCO = 0.1080\text{e-8}$   
 $HCN = 0.5208\text{e-5}$      $HNC = 0.3309\text{e-6}$      $ClCN = 0.1027\text{e-7}$                $Al = 0.9046\text{e-10}$   
 $Al^+ = 0.1633\text{e-10}$      $AlO = 0.2130\text{e-8}$      $AlO_2 = 0.2131\text{e-10}$      $Al_2O_2 = 0.2866\text{e-11}$   
 $Al_2O_3(c) = 3.9058$      $AlH = 0.5758\text{e-10}$      $AlOH = 0.4138\text{e-5}$      $HAIO = 0.7283\text{e-10}$   
 $HAIO_2 = 0.3049\text{e-7}$      $Al(OH)_2 = 0.3468\text{e-5}$      $Al(OH)_3 = 0.8611\text{e-3}$      $AlCl = 0.2082\text{e-5}$



$\text{AlCl}_2 = 0.1932\text{e-}5$   $\text{AlCl}_3 = 0.1180\text{e-}3$   $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.2200\text{e-}11$   $\text{ClAlO} = 0.1702\text{e-}5$   
 $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.1885\text{e-}7$   $\text{AlHCl} = 0.1274\text{e-}8$   $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.2333\text{e-}9$   $\text{AlHCl}_2 = 0.5652\text{e-}6$   
 $\text{ClAlOH} = 0.5795\text{e-}5$   $\text{ClAl(OH)}_2 = 0.9728\text{e-}3$   $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00141$

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

$p=5$   $T=2400$   $v=0.0959424$   $S=7.33289$   $I=-7056.01$   
 $U=-7476.13$   $M=27.9444$   $C_p=1.7553$   $k=1.12851$   $C_p'=1.83496$   
 $k'=1.12543$   $A_p=0.0004219$   $B_v=0.0004216$   $G_t=0.200408\text{e-}6$   $MM_g=25.0386$   
 $R_g=332.062$   $C_{p_g}=1.85955$   $k_g=1.21739$   $C_{p'_g}=1.98833$   $k'_g=1.2065$   
 $M_u=0.0000746$   $L_t=0.220519$   $L'_t=0.23317$   $Pr=0.628959$   $Pr'=0.636027$   
 $A=734.546$   $z=0.398065$   $B_m=0.151395$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.1503\text{e-}10$   $O = 0.8819\text{e-}4$   $O_2 = 0.2155\text{e-}3$   $O_3 = 0.1240\text{e-}11$   
 $H = 0.01422$   $H_2 = 1.6584$   $OH = 0.01539$   $OH^- = 0.4326\text{e-}11$   
 $HO_2 = 0.8621\text{e-}6$   $H_2O = 9.8509$   $H_2O_2 = 0.1194\text{e-}5$   $H_3O^+ = 0.2268\text{e-}7$   
 $Cl = 0.01893$   $Cl^- = 0.2356\text{e-}7$   $Cl_2 = 0.1066\text{e-}3$   $ClO = 0.4588\text{e-}5$   
 $ClO_2 = 0.1324\text{e-}10$   $Cl_2O = 0.5156\text{e-}10$   $HCl = 3.1031$   $HOCl = 0.3586\text{e-}4$   
 $N = 0.1524\text{e-}6$   $N_2 = 3.895$   $N_3 = 0.1832\text{e-}11$   $NO = 0.00136$   
 $NO^+ = 0.5654\text{e-}10$   $NO_2 = 0.6330\text{e-}7$   $N_2O = 0.2443\text{e-}6$   $NH = 0.4459\text{e-}6$   
 $NH_2 = 0.3388\text{e-}5$   $NH_3 = 0.1022\text{e-}3$   $NH_4^+ = 0.6918\text{e-}10$   $N_2H_2 = 0.3425\text{e-}9$   
 $HN_3 = 0.7119\text{e-}11$   $HNO = 0.9871\text{e-}6$   $HNO_2 = 0.6096\text{e-}7$   $NH_2OH = 0.3505\text{e-}8$   
 $ClNO = 0.1108\text{e-}6$   $CO = 2.7374$   $CO_2 = 2.7381$   $C_2O = 0.9967\text{e-}11$   
 $CH = 0.1666\text{e-}11$   $CH_2 = 0.6400\text{e-}10$   $CH_3 = 0.5006\text{e-}8$   $CH_4 = 0.3195\text{e-}7$   
 $C_2H_2 = 0.1128\text{e-}10$   $HCO = 0.1342\text{e-}4$   $HCO^+ = 0.8640\text{e-}10$   $COOH = 0.1340\text{e-}4$   
 $H_2CO = 0.3853\text{e-}5$   $HCOOH = 0.1963\text{e-}4$   $CH_2O_2 = 0.1963\text{e-}4$   $CH_3O = 0.1685\text{e-}10$   
 $CH_4O = 0.6827\text{e-}9$   $CH_2OH = 0.1058\text{e-}8$   $CCl = 0.2412\text{e-}10$   $CCl_2 = 0.3067\text{e-}11$   
 $ClCO = 0.2131\text{e-}5$   $Cl_2CO = 0.1586\text{e-}7$   $CHCl = 0.1996\text{e-}10$   $CH_2Cl = 0.3999\text{e-}9$   
 $CH_3Cl = 0.6802\text{e-}9$   $CHCl_2 = 0.1498\text{e-}10$   $CH_2Cl_2 = 0.7572\text{e-}11$   $HClCO = 0.5808\text{e-}6$   
 $CN = 0.1809\text{e-}8$   $NCO = 0.4344\text{e-}8$   $HCN = 0.4923\text{e-}5$   $HNC = 0.4165\text{e-}6$

$\text{ClCN} = 0.1615\text{e-}7$      $\text{Al} = 0.2432\text{e-}8$      $\text{Al}^+ = 0.6869\text{e-}9$      $\text{AlO} = 0.5783\text{e-}7$   
 $\text{AlO}_2 = 0.1217\text{e-}8$      $\text{Al}_2\text{O} = 0.4638\text{e-}10$      $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.1894\text{e-}9$      $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.9041$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.1827\text{e-}11$      $\text{AlH} = 0.1037\text{e-}8$      $\text{AlH}_2 = 0.2374\text{e-}11$      $\text{AlH}_3 = 0.1003\text{e-}11$   
 $\text{AlOH} = 0.3336\text{e-}4$      $\text{HAlO} = 0.1450\text{e-}8$      $\text{HAlO}_2 = 0.3882\text{e-}6$      $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.2216\text{e-}4$   
 $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.00191$      $\text{AlCl} = 0.1524\text{e-}4$      $\text{AlCl}_2 = 0.9432\text{e-}5$      $\text{AlCl}_3 = 0.1987\text{e-}3$   
 $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.4058\text{e-}11$      $\text{ClAlO} = 0.1374\text{e-}4$      $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.1541\text{e-}6$      $\text{AlHCl} = 0.1208\text{e-}7$   
 $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.1308\text{e-}8$      $\text{AlHCl}_2 = 0.1698\text{e-}5$      $\text{ClAlOH} = 0.3236\text{e-}4$      $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.00207$   
 $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00262$

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

$p=5$      $T=2600$      $v=0.104116$      $S=7.48371$      $I=-6679.01$   
 $U=-7139.9$      $M=27.9836$      $C_p=1.76946$      $k=1.12759$      $C_p'=1.94757$   
 $k'=1.12265$      $A_p=0.0003975$      $B_v=0.0003969$      $G_t=0.200999\text{e-}6$      $MM_g=25.0045$   
 $R_g=332.514$      $C_{pg}=1.88297$      $k_g=1.21446$      $C_p'g=2.17363$      $k'g=1.19468$   
 $M_u=0.000079$      $L_t=0.23614$      $L_t'=0.283504$      $Pr=0.629645$      $Pr'=0.605408$   
 $A=763.881$      $z=0.397851$      $B_m=0.151309$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.1231\text{e-}9$      $\text{O} = 0.6476\text{e-}3$      $\text{O}_2 = 0.00161$      $\text{O}_3 = 0.4649\text{e-}10$   
 $\text{H} = 0.03381$      $\text{H}_2 = 1.6078$      $\text{OH} = 0.04766$      $\text{OH}^- = 0.4538\text{e-}10$   
 $\text{HO}_2 = 0.6483\text{e-}5$      $\text{H}_2\text{O} = 9.8869$      $\text{H}_2\text{O}^+ = 0.7461\text{e-}11$      $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.5037\text{e-}5$   
 $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.8253\text{e-}7$      $\text{Cl} = 0.04517$      $\text{Cl}^- = 0.9718\text{e-}7$      $\text{Cl}_2 = 0.2259\text{e-}3$   
 $\text{ClO} = 0.2725\text{e-}4$      $\text{ClO}_2 = 0.2187\text{e-}9$      $\text{Cl}_2\text{O} = 0.4085\text{e-}9$      $\text{HCl} = 3.0726$   
 $\text{HOCl} = 0.1025\text{e-}3$      $\text{N} = 0.9749\text{e-}6$      $\text{N}_2 = 3.893$      $\text{N}_3 = 0.1019\text{e-}10$   
 $\text{NO} = 0.00529$      $\text{NO}^+ = 0.1019\text{e-}8$      $\text{NO}_2 = 0.5451\text{e-}6$      $\text{N}_2\text{O} = 0.9509\text{e-}6$   
 $\text{NH} = 0.1750\text{e-}5$      $\text{NH}_2 = 0.6729\text{e-}5$      $\text{NH}_3 = 0.7916\text{e-}4$      $\text{NH}_4^+ = 0.1082\text{e-}9$   
 $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.7746\text{e-}9$      $\text{HN}_3 = 0.2237\text{e-}10$      $\text{HNO} = 0.3981\text{e-}5$      $\text{HNO}_2 = 0.3380\text{e-}6$   
 $\text{HNO}_3 = 0.6241\text{e-}11$      $\text{NH}_2\text{OH} = 0.7713\text{e-}8$      $\text{ClNO} = 0.5522\text{e-}6$      $\text{ClNO}_2 = 0.3846\text{e-}11$   
 $\text{C} = 0.5507\text{e-}11$      $\text{CO} = 2.8148$      $\text{CO}_2 = 2.6607$      $\text{C}_2\text{O} = 0.2978\text{e-}10$   
 $\text{CH} = 0.9653\text{e-}11$      $\text{CH}_2 = 0.1592\text{e-}9$      $\text{CH}_3 = 0.4793\text{e-}8$      $\text{CH}_4 = 0.1314\text{e-}7$   
 $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.9247\text{e-}11$      $\text{HCO} = 0.2432\text{e-}4$      $\text{HCO}^+ = 0.4751\text{e-}9$      $\text{COOH} = 0.2546\text{e-}4$

$\text{H}_2\text{CO} = 0.3833\text{e-}5$   $\text{HCOOH} = 0.1984\text{e-}4$   $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.1984\text{e-}4$   $\text{CH}_3\text{O} = 0.2647\text{e-}10$   
 $\text{CH}_4\text{O} = 0.4551\text{e-}9$   $\text{CH}_2\text{OH} = 0.1500\text{e-}8$   $\text{CCl} = 0.1119\text{e-}9$   $\text{CCl}_2 = 0.9138\text{e-}11$   
 $\text{ClCO} = 0.4645\text{e-}5$   $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.2378\text{e-}7$   $\text{CHCl} = 0.5440\text{e-}10$   $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.5138\text{e-}9$   
 $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.3967\text{e-}9$   $\text{CHCl}_2 = 0.2473\text{e-}10$   $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.6384\text{e-}11$   $\text{HCICO} = 0.7075\text{e-}6$   
 $\text{CN} = 0.5769\text{e-}8$   $\text{NCO} = 0.1417\text{e-}7$   $\text{HCN} = 0.4772\text{e-}5$   $\text{HNC} = 0.5140\text{e-}6$   
 $\text{ClCN} = 0.2384\text{e-}7$   $\text{Al} = 0.3392\text{e-}7$   $\text{Al}^+ = 0.1322\text{e-}7$   $\text{AlO} = 0.8108\text{e-}6$   
 $\text{AlO}^- = 0.1704\text{e-}11$   $\text{AlO}_2 = 0.3164\text{e-}7$   $\text{Al}_2\text{O} = 0.1098\text{e-}8$   $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.4804\text{e-}8$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.902$   $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.7664\text{e-}10$   $\text{AlH} = 0.1034\text{e-}7$   $\text{AlH}_2 = 0.2568\text{e-}10$   
 $\text{AlH}_3 = 0.6190\text{e-}11$   $\text{AlOH} = 0.1672\text{e-}3$   $\text{HALO} = 0.1563\text{e-}7$   $\text{HALO}_2 = 0.2841\text{e-}5$   
 $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.9113\text{e-}4$   $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.0032$   $\text{AlCl} = 0.7001\text{e-}4$   $\text{AlCl}_2 = 0.3048\text{e-}4$   
 $\text{AlCl}_3 = 0.2597\text{e-}3$   $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.4874\text{e-}11$   $\text{ClAlO} = 0.6824\text{e-}4$   $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.7671\text{e-}6$   
 $\text{AlHCl} = 0.6932\text{e-}7$   $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.4845\text{e-}8$   $\text{AlHCl}_2 = 0.3665\text{e-}5$   $\text{ClAlOH} = 0.1179\text{e-}3$   
 $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.00334$   $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00376$   $\text{AlN} = 0.1391\text{e-}10$

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

$p=5$   $T=2800$   $v=0.112569$   $S=7.63515$   $I=-6270.06$   
 $U=-6772.98$   $M=28.076$   $C_p=1.78206$   $k=1.12714$   $C_p'=2.16467$   
 $k'=1.11989$   $A_p=0.0003855$   $B_v=0.0003841$   $G_t=0.202149\text{e-}6$   $\text{MMg}=24.9183$   
 $R_g=333.664$   $C_{pg}=1.90374$   $k_g=1.21252$   $C_{p'g}=2.53078$   $k'g=1.17991$   
 $\text{Mu}=0.0000832$   $L_t=0.251773$   $L_t'=0.373485$   $\text{Pr}=0.629003$   $\text{Pr}'=0.563685$   
 $A=792.437$   $z=0.39755$   $B_m=0.15106$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.8779\text{e-}9$   $\text{O} = 0.00352$   $\text{O}^- = 0.6683\text{e-}11$   $\text{O}_2 = 0.00869$   
 $\text{O}_3 = 0.9995\text{e-}9$   $\text{H} = 0.07183$   $\text{H}^- = 0.5374\text{e-}11$   $\text{H}_2 = 1.59$   
 $\text{H}_3^+ = 0.1240\text{e-}11$   $\text{OH} = 0.12408$   $\text{OH}^- = 0.3890\text{e-}9$   $\text{HO}_2 = 0.3543\text{e-}4$   
 $\text{H}_2\text{O} = 9.8691$   $\text{H}_2\text{O}^+ = 0.7076\text{e-}10$   $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.1689\text{e-}4$   $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.2164\text{e-}6$   
 $\text{Cl} = 0.09382$   $\text{Cl}^- = 0.3733\text{e-}6$   $\text{Cl}_2 = 0.4160\text{e-}3$   $\text{ClO} = 0.1211\text{e-}3$   
 $\text{ClO}_2 = 0.2290\text{e-}8$   $\text{Cl}_2\text{O} = 0.2282\text{e-}8$   $\text{HCl} = 3.0185$   $\text{HOCl} = 0.2447\text{e-}3$   
 $\text{N} = 0.4795\text{e-}5$   $\text{N}_2 = 3.8874$   $\text{N}_3 = 0.4437\text{e-}10$   $\text{NO} = 0.01661$   
 $\text{NO}^+ = 0.1029\text{e-}7$   $\text{NO}_2 = 0.3322\text{e-}5$   $\text{N}_2\text{O} = 0.2996\text{e-}5$   $\text{NH} = 0.5696\text{e-}5$

$\text{NH}_2 = 0.1231\text{e-}4$      $\text{NH}_3 = 0.6505\text{e-}4$      $\text{NH}_4^+ = 0.1416\text{e-}9$      $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.1594\text{e-}8$   
 $\text{HN}_3 = 0.6017\text{e-}10$      $\text{HNO} = 0.1306\text{e-}4$      $\text{HNO}_2 = 0.1424\text{e-}5$      $\text{HNO}_3 = 0.5206\text{e-}10$   
 $\text{NH}_2\text{OH} = 0.1528\text{e-}7$      $\text{ClNO} = 0.2116\text{e-}5$      $\text{ClNO}_2 = 0.3057\text{e-}10$      $\text{C} = 0.3907\text{e-}10$   
 $\text{CO} = 2.9039$      $\text{CO}_2 = 2.5714$      $\text{C}_2\text{O} = 0.7921\text{e-}10$      $\text{CH} = 0.4518\text{e-}10$   
 $\text{CH}_2 = 0.3627\text{e-}9$      $\text{CH}_3 = 0.4857\text{e-}8$      $\text{CH}_4 = 0.6563\text{e-}8$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.8402\text{e-}11$   
 $\text{HCO} = 0.4111\text{e-}4$      $\text{HCO}^+ = 0.1800\text{e-}8$      $\text{COOH} = 0.4400\text{e-}4$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.3910\text{e-}5$   
 $\text{HCOOH} = 0.2017\text{e-}4$      $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.2017\text{e-}4$      $\text{CH}_3\text{O} = 0.4031\text{e-}10$      $\text{CH}_4\text{O} = 0.3346\text{e-}9$   
 $\text{CH}_2\text{OH} = 0.2092\text{e-}8$      $\text{CCl} = 0.4215\text{e-}9$      $\text{CCl}_2 = 0.2315\text{e-}10$      $\text{ClCO} = 0.8970\text{e-}5$   
 $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.3285\text{e-}7$      $\text{CHCl} = 0.1312\text{e-}9$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.6542\text{e-}9$      $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.2590\text{e-}9$   
 $\text{CHCl}_2 = 0.3811\text{e-}10$      $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.5581\text{e-}11$      $\text{HClCO} = 0.8376\text{e-}6$      $\text{CN} = 0.1604\text{e-}7$   
 $\text{NCN} = 0.1868\text{e-}11$      $\text{NCO} = 0.3942\text{e-}7$      $\text{HCN} = 0.4819\text{e-}5$      $\text{HNC} = 0.6380\text{e-}6$   
 $\text{ClCN} = 0.3369\text{e-}7$      $\text{Al} = 0.3286\text{e-}6$      $\text{Al}^+ = 0.1459\text{e-}6$      $\text{AlO} = 0.7767\text{e-}5$   
 $\text{AlO}^- = 0.3084\text{e-}10$      $\text{AlO}_2 = 0.5027\text{e-}6$      $\text{Al}_2\text{O} = 0.1659\text{e-}7$      $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.7566\text{e-}7$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.899$      $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.1826\text{e-}8$      $\text{AlH} = 0.7563\text{e-}7$      $\text{AlH}_2 = 0.2027\text{e-}9$   
 $\text{AlH}_3 = 0.3051\text{e-}10$      $\text{AlOH} = 0.6648\text{e-}3$      $\text{HAlO} = 0.1200\text{e-}6$      $\text{HAlO}_2 = 0.1533\text{e-}4$   
 $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.3029\text{e-}3$      $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.00491$      $\text{AlCl} = 0.2570\text{e-}3$      $\text{AlCl}_2 = 0.8127\text{e-}4$   
 $\text{AlCl}_3 = 0.3141\text{e-}3$      $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.5318\text{e-}11$      $\text{ClAlO} = 0.2630\text{e-}3$      $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.2912\text{e-}5$   
 $\text{AlHCl} = 0.3102\text{e-}6$      $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.1504\text{e-}7$      $\text{AlHCl}_2 = 0.6987\text{e-}5$      $\text{ClAlOH} = 0.3509\text{e-}3$   
 $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.0049$      $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00495$      $\text{AlN} = 0.1967\text{e-}9$

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

$p=5$      $T=3000$      $v=0.121606$      $S=7.79648$      $I=-5801.93$   
 $U=-6349.53$      $M=28.2713$      $C_p=1.79312$      $k=1.12743$      $C_p'=2.54861$   
 $k'=1.11915$      $A_p=0.0003896$      $B_v=0.0003864$      $G_t=0.204035\text{e-}6$      $MM_g=24.7329$   
 $R_g=336.167$      $C_{p_g}=1.92185$      $k_g=1.212$      $C_{p'_g}=3.15966$      $k'_g=1.16684$   
 $M_u=0.0000873$      $L_t=0.267786$      $L_t'=0.521001$      $Pr=0.626257$      $Pr'=0.529204$   
 $A=821.514$      $z=0.397095$      $B_m=0.150408$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.6083\text{e-}8$      $\text{O} = 0.01468$      $\text{O}^- = 0.1076\text{e-}9$      $\text{O}_2 = 0.03457$   
 $\text{O}_2^+ = 0.4482\text{e-}11$      $\text{O}_2^- = 0.1566\text{e-}10$      $\text{O}_3 = 0.1287\text{e-}7$      $\text{H} = 0.14083$

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	HCICO = 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	HAIO = 0.7190e-6
HAIO2 = 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 К (единицы СИ):

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

$U=-5835.22$     $M=28.6357$     $C_p=1.80251$     $k=1.12887$     $C_p'=3.11696$   
 $k'=1.12341$     $A_p=0.0004096$     $B_v=0.0004031$     $G_t=0.206505e-6$     $MMg=24.3927$   
 $R_g=340.855$     $C_{pg}=1.93699$     $kg=1.21355$     $C_{p'g}=4.07662$     $k'g=1.16222$   
 $Mu=0.0000912$     $L_t=0.28476$     $L_t'=0.765239$     $Pr=0.620268$     $Pr'=0.485774$   
 $A=853.257$     $z=0.39631$     $B_m=0.149029$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.4095e-7$     $O = 0.04808$     $O^- = 0.1395e-8$     $O_2 = 0.10088$   
 $O_{2+} = 0.4269e-10$     $O_{2-} = 0.2331e-9$     $O_3 = 0.9980e-7$     $H = 0.26219$   
 $H^- = 0.4331e-9$     $H_2 = 1.7547$     $H_{3+} = 0.1550e-10$     $OH = 0.53781$   
 $OH_+ = 0.1139e-10$     $OH^- = 0.2130e-7$     $HO_2 = 0.4411e-3$     $HO_{2-} = 0.2541e-$   
 $11H_2O = 9.4875$     $H_2O_+ = 0.1451e-8$     $H_2O_2 = 0.1001e-3$     $H_3O_+ = 0.5776e-6$   
 $Cl = 0.28188$     $Cl_+ = 0.7300e-11$     $Cl^- = 0.5550e-5$     $Cl_2 = 0.9234e-3$   
 $ClO = 0.00107$     $ClO_2 = 0.7016e-7$     $Cl_2O = 0.2627e-7$     $HCl = 2.8138$   
 $HOCl = 0.8271e-3$     $N = 0.6438e-4$     $N_2 = 3.8497$     $N_3 = 0.4797e-9$   
 $NO = 0.0917$     $NO_+ = 0.2083e-6$     $NO_2 = 0.4657e-4$     $NO_{2+} = 0.3546e-11$   
 $NO_{2-} = 0.3384e-10$     $N_2O = 0.1664e-4$     $N_2O_3 = 0.1006e-10$     $NH = 0.4100e-4$   
 $NH_2 = 0.3668e-4$     $NH_3 = 0.5555e-4$     $NH_{4+} = 0.1491e-9$     $N_2H_2 = 0.5787e-8$   
 $N_2H_4 = 0.1111e-11$     $HN_3 = 0.3131e-9$     $HNO = 0.8278e-4$     $HNO_2 = 0.1152e-4$   
 $HNO_3 = 0.1101e-8$     $NH_2OH = 0.4733e-7$     $ClNO = 0.1470e-4$     $ClNO_2 = 0.5958e-9$   
 $C = 0.1174e-8$     $CO = 3.2418$     $CO_+ = 0.2476e-11$     $CO_2 = 2.2334$   
 $CO_{2+} = 0.1856e-10$     $C_2O = 0.5103e-9$     $CH = 0.7273e-9$     $CH_2 = 0.1896e-8$   
 $CH_3 = 0.7188e-8$     $CH_4 = 0.3314e-8$     $C_2H_2 = 0.1222e-10$     $HCO = 0.1078e-3$   
 $HCO_+ = 0.9659e-8$     $COOH = 0.1033e-3$     $H_2CO = 0.4772e-5$     $HCOOH = 0.2120e-4$   
 $CH_2O_2 = 0.2120e-4$     $CH_3O = 0.9989e-10$     $CH_4O = 0.2670e-9$     $CH_2OH = 0.4494e-8$   
 $CCl = 0.4054e-8$     $CCl_2 = 0.1054e-9$     $ClCO = 0.2496e-4$     $Cl_2CO = 0.4802e-7$   
 $CHCl = 0.6489e-9$     $CH_2Cl = 0.1200e-8$     $CH_3Cl = 0.1699e-9$     $CHCl_2 = 0.8151e-10$   
 $CH_2Cl_2 = 0.5031e-11$     $HClCO = 0.1114e-5$     $CN = 0.1042e-6$     $CN^- = 0.1061e-10$   
 $NCN = 0.1837e-10$     $NCO = 0.2198e-6$     $HCN = 0.6354e-5$     $HNC = 0.1174e-5$   
 $ClCN = 0.6564e-7$     $Al = 0.1604e-4$     $Al_+ = 0.4824e-5$     $Al_2 = 0.4158e-11$   
 $AlO = 0.3230e-3$     $AlO^- = 0.6474e-8$     $AlO_2 = 0.4049e-4$     $AlO_{2-} = 0.2361e-9$

$\text{Al}_2\text{O} = 0.1714\text{e-}5$     $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.7238\text{e-}5$     $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.8869$     $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.2963\text{e-}6$   
 $\text{AlH} = 0.2465\text{e-}5$     $\text{AlH}_2 = 0.7845\text{e-}8$     $\text{AlH}_3 = 0.5811\text{e-}9$     $\text{AlOH} = 0.0069$   
 $\text{HAlO} = 0.3633\text{e-}5$     $\text{HAlO}_2 = 0.2243\text{e-}3$     $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.00214$     $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.00901$   
 $\text{AlCl} = 0.00232$     $\text{AlCl}_2 = 0.3924\text{e-}3$     $\text{AlCl}_3 = 0.3801\text{e-}3$     $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.4882\text{e-}11$   
 $\text{ClAlO} = 0.00222$     $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.2159\text{e-}4$     $\text{AlHCl} = 0.4074\text{e-}5$     $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.1153\text{e-}6$   
 $\text{AlHCl}_2 = 0.2074\text{e-}4$     $\text{ClAlOH} = 0.00204$     $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.00831$     $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00695$   
 $\text{AlN} = 0.1767\text{e-}7$

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

$p=5$     $T=3400$     $v=0.14335$     $S=8.18762$     $I=-4546.61$   
 $U=-5200.51$     $M=29.2261$     $C_p=1.8101$     $k=1.13182$     $C_p'=3.81518$   
 $k'=1.13381$     $A_p=0.0004397$     $B_v=0.0004281$     $G_t=0.209243\text{e-}6$     $\text{MMg}=23.8724$   
 $R_g=348.283$     $C_{pg}=1.94863$     $k_g=1.21763$     $C_p'g=5.14888$     $k'g=1.16816$   
 $\text{Mu}=0.000095$     $L_t=0.303286$     $L_t'=1.0843$     $\text{Pr}=0.610092$     $\text{Pr}'=0.450901$   
 $A=889.536$     $z=0.39472$     $B_m=0.146827$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.2585\text{e-}6$     $\text{O} = 0.12686$     $\text{O}^- = 0.1426\text{e-}7$     $\text{O}_2 = 0.22007$   
 $\text{O}_2^+ = 0.2296\text{e-}9$     $\text{O}_2^- = 0.2464\text{e-}8$     $\text{O}_3 = 0.4820\text{e-}6$     $\text{H} = 0.4708$   
 $\text{H}^+ = 0.1445\text{e-}11$     $\text{H}^- = 0.3507\text{e-}8$     $\text{H}_2 = 1.9935$     $\text{H}_3^+ = 0.3931\text{e-}10$   
 $\text{OH} = 0.91526$     $\text{OH}^+ = 0.5772\text{e-}10$     $\text{OH}^- = 0.1299\text{e-}6$     $\text{HO}_2 = 0.00103$   
 $\text{HO}_2^- = 0.2471\text{e-}10$     $\text{H}_2\text{O} = 9.0152$     $\text{H}_2\text{O}^+ = 0.3859\text{e-}8$     $\text{H}_2\text{O}_2 = 0.1782\text{e-}3$   
 $\text{H}_3\text{O}^+ = 0.6877\text{e-}6$     $\text{Cl} = 0.41727$     $\text{Cl}^+ = 0.3253\text{e-}10$     $\text{Cl}^- = 0.2001\text{e-}4$   
 $\text{Cl}_2 = 0.00112$     $\text{ClO} = 0.00219$     $\text{ClO}_2 = 0.2116\text{e-}6$     $\text{Cl}_2\text{O} = 0.5537\text{e-}7$   
 $\text{HCl} = 2.6638$     $\text{HOCl} = 0.00118$     $\text{N} = 0.1887\text{e-}3$     $\text{N}_2 = 3.813$   
 $\text{N}_3 = 0.1263\text{e-}8$     $\text{NO} = 0.16466$     $\text{NO}^+ = 0.5063\text{e-}6$     $\text{NO}_2 = 0.1089\text{e-}3$   
 $\text{NO}_2^+ = 0.1265\text{e-}10$     $\text{NO}_2^- = 0.2511\text{e-}9$     $\text{N}_2\text{O} = 0.2980\text{e-}4$     $\text{N}_2\text{O}_3 = 0.3943\text{e-}10$   
 $\text{NH} = 0.9635\text{e-}4$     $\text{NH}_2 = 0.6226\text{e-}4$     $\text{NH}_3 = 0.5848\text{e-}4$     $\text{NH}_4^+ = 0.1410\text{e-}9$   
 $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.1063\text{e-}7$     $\text{N}_2\text{H}_4 = 0.1703\text{e-}11$     $\text{HN}_3 = 0.6335\text{e-}9$     $\text{HNO} = 0.1642\text{e-}3$   
 $\text{HNO}_2 = 0.2229\text{e-}4$     $\text{HNO}_3 = 0.2804\text{e-}8$     $\text{NH}_2\text{OH} = 0.7528\text{e-}7$     $\text{ClNO} = 0.2704\text{e-}4$   
 $\text{ClNO}_2 = 0.1481\text{e-}8$     $\text{C} = 0.5619\text{e-}8$     $\text{CO} = 3.5281$     $\text{CO}^+ = 0.1011\text{e-}10$

$\text{CO}_2 = 1.947$     $\text{CO}_2^+ = 0.5862\text{e-}10$     $\text{C}_2\text{O} = 0.1335\text{e-}8$     $\text{C}_3\text{O}_2 = 0.1200\text{e-}11$   
 $\text{CH} = 0.2793\text{e-}8$     $\text{CH}_2 = 0.4741\text{e-}8$     $\text{CH}_3 = 0.1111\text{e-}7$     $\text{CH}_4 = 0.3450\text{e-}8$   
 $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.2106\text{e-}10$     $\text{HCO} = 0.1731\text{e-}3$     $\text{HCO}^+ = 0.1655\text{e-}7$     $\text{COOH} = 0.1406\text{e-}3$   
 $\text{H}_2\text{CO} = 0.5814\text{e-}5$     $\text{HCOOH} = 0.2156\text{e-}4$     $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.2156\text{e-}4$     $\text{CH}_3\text{O} = 0.1694\text{e-}9$   
 $\text{CH}_4\text{O} = 0.2945\text{e-}9$     $\text{CH}_2\text{OH} = 0.7187\text{e-}8$     $\text{CCl} = 0.1123\text{e-}7$     $\text{CCl}_2 = 0.1990\text{e-}9$   
 $\text{ClCO} = 0.3668\text{e-}4$     $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.5034\text{e-}7$     $\text{CHCl} = 0.1424\text{e-}8$     $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.1810\text{e-}8$   
 $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.1745\text{e-}9$     $\text{CHCl}_2 = 0.1171\text{e-}9$     $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.5266\text{e-}11$     $\text{HClCO} = 0.1257\text{e-}5$   
 $\text{CN} = 0.2633\text{e-}6$     $\text{CN}^- = 0.6213\text{e-}10$     $\text{NCN} = 0.5455\text{e-}10$     $\text{NCO} = 0.4611\text{e-}6$   
 $\text{HCN} = 0.8628\text{e-}5$     $\text{HNC} = 0.1827\text{e-}5$     $\text{ClCN} = 0.9360\text{e-}7$     $\text{Al} = 0.9486\text{e-}4$   
 $\text{Al}^+ = 0.1928\text{e-}4$     $\text{Al}_2 = 0.9928\text{e-}10$     $\text{AlO} = 0.00159$     $\text{AlO}^- = 0.7779\text{e-}7$   
 $\text{AlO}_2 = 0.2309\text{e-}3$     $\text{AlO}_2^- = 0.2880\text{e-}8$     $\text{Al}_2\text{O} = 0.1438\text{e-}4$     $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.5224\text{e-}4$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.8713$     $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.2360\text{e-}5$     $\text{AlH} = 0.1283\text{e-}4$     $\text{AlH}_2 = 0.4537\text{e-}7$   
 $\text{AlH}_3 = 0.2609\text{e-}8$     $\text{AlOH} = 0.01981$     $\text{HAIO} = 0.1623\text{e-}4$     $\text{HAIO}_2 = 0.6571\text{e-}3$   
 $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.00482$     $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.01079$     $\text{AlCl} = 0.00635$     $\text{AlCl}_2 = 0.7679\text{e-}3$   
 $\text{AlCl}_3 = 0.3912\text{e-}3$     $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.4253\text{e-}11$     $\text{ClAlO} = 0.00523$     $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.4476\text{e-}4$   
 $\text{AlHCl} = 0.1349\text{e-}4$     $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.3181\text{e-}6$     $\text{AlHCl}_2 = 0.3457\text{e-}4$     $\text{ClAlOH} = 0.00429$   
 $\text{ClAl}(\text{OH})_2 = 0.00969$     $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00755$     $\text{AlN} = 0.1335\text{e-}6$     $\text{AlC} = 0.1446\text{e-}11$

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

$p=5$     $T=3600$     $v=0.157078$     $S=8.42813$     $I=-3704.3$   
 $U=-4424.64$     $M=30.0755$     $C_p=1.81559$     $k=1.13657$     $C_p'=4.63435$   
 $k'=1.14978$     $A_p=0.000476$     $B_v=0.0004572$     $G_t=0.212260\text{e-}6$     $\text{MMg}=23.2043$   
 $R_g=358.311$     $C_{pg}=1.95558$     $k_g=1.22433$     $C_{p'g}=6.2452$     $k'g=1.18231$   
 $\text{Mu}=0.0000985$     $L_t=0.32354$     $L_t'=1.48926$     $\text{Pr}=0.595562$     $\text{Pr}'=0.413195$   
 $A=931.291$     $z=0.391133$     $B_m=0.144169$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$\text{e}^- = 0.1491\text{e-}5$     $\text{O} = 0.28161$     $\text{O}^+ = 0.2027\text{e-}11$     $\text{O}^- = 0.1157\text{e-}6$   
 $\text{O}_2 = 0.38152$     $\text{O}_2^+ = 0.8080\text{e-}9$     $\text{O}_2^- = 0.1905\text{e-}7$     $\text{O}_3 = 0.1596\text{e-}5$   
 $\text{H} = 0.81538$     $\text{H}^+ = 0.6826\text{e-}11$     $\text{H}^- = 0.2543\text{e-}7$     $\text{H}_2 = 2.3325$   
 $\text{H}_3^+ = 0.8687\text{e-}10$     $\text{OH} = 1.3961$     $\text{OH}^+ = 0.2117\text{e-}9$     $\text{OH}^- = 0.6761\text{e-}6$



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
CINO = 0.4128e-4	CINO2 = 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	HAIO = 0.6493e-4
HAIO2 = 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 К (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

$C_2HCl = 0.3118e-11$     $HClCO = 0.1431e-5$     $CN = 0.1553e-5$     $CN^- = 0.1890e-8$   
 $NCN = 0.4123e-9$     $CNN = 0.6856e-11$     $C_2N_2 = 0.3808e-11$     $NCO = 0.1617e-5$   
 $HCN = 0.1842e-4$     $HNC = 0.4897e-5$     $ClCN = 0.1844e-6$     $Al = 0.00259$   
 $Al^+ = 0.2159e-3$     $Al_2 = 0.3728e-7$     $AlO = 0.02618$     $AlO^- = 0.7168e-5$   
 $AlO_2 = 0.00394$     $AlO_2^- = 0.2227e-6$     $Al_2O = 0.7579e-3$     $Al_2O_2 = 0.00175$   
 $Al_2O_3(c) = 3.7541$     $Al_2O_3 = 0.7648e-4$     $AlH = 0.2918e-3$     $AlH_2 = 0.1265e-5$   
 $AlH_3 = 0.4904e-7$     $AlOH = 0.13438$     $HAIO = 0.2321e-3$     $HAIO_2 = 0.00376$   
 $Al(OH)_2 = 0.01839$     $Al(OH)_3 = 0.01199$     $AlCl = 0.04136$     $AlCl_2 = 0.00249$   
 $AlCl_3 = 0.3772e-3$     $Al_2Cl_6 = 0.2786e-11$     $ClAlO = 0.02166$     $Cl_2AlO = 0.1307e-3$   
 $AlHCl = 0.1249e-3$     $AlH_2Cl = 0.2236e-5$     $AlHCl_2 = 0.8839e-4$     $ClAlOH = 0.01506$   
 $ClAl(OH)_2 = 0.01069$     $Cl_2AlOH = 0.00768$     $AlN = 0.5403e-5$     $AlC = 0.1618e-9$

Равновесные параметры при p=5 МПа, T=4000 К (единицы СИ):

$p=5$     $T=4000$     $v=0.193991$     $S=9.0377$     $I=-1380.62$   
 $U=-2278.28$     $M=32.729$     $C_p=1.81331$     $k=1.15437$     $C_p'=7.39638$   
 $k'=1.20311$     $A_p=0.0005965$     $B_v=0.0005489$     $G_t=0.221118e-6$     $MMg=21.828$   
 $R_g=380.903$     $C_{p,g}=1.9364$     $k_g=1.24488$     $C_{p,g}'=8.28697$     $k'_g=1.2265$   
 $M_u=0.0001048$     $L_t=0.364513$     $L_t'=2.44236$     $Pr=0.556535$     $Pr'=0.355464$   
 $A=1036.22$     $z=0.363385$     $B_m=0.14077$

Равновесные концентрации (моль/кг):

$e^- = 0.3554e-4$     $O = 0.99184$     $O^+ = 0.3479e-10$     $O^- = 0.4185e-5$   
 $O_2 = 0.76336$     $O_2^+ = 0.4739e-8$     $O_2^- = 0.5476e-6$     $O_3 = 0.8693e-5$   
 $H = 2.1437$     $H^+ = 0.8723e-10$     $H^- = 0.8640e-6$     $H_2 = 3.0938$   
 $H_2^+ = 0.8447e-11$     $H_3^+ = 0.2944e-9$     $OH = 2.5512$     $OH^+ = 0.1520e-8$   
 $OH^- = 0.1128e-4$     $HO_2 = 0.00428$     $HO_2^- = 0.4593e-8$     $H_2O = 6.3921$   
 $H_2O^+ = 0.2229e-7$     $H_2O_2 = 0.4003e-3$     $H_3O^+ = 0.5903e-6$     $Cl = 0.905$   
 $Cl^+ = 0.6830e-9$     $Cl^- = 0.5352e-3$     $Cl_2 = 0.00117$     $ClO = 0.00719$   
 $ClO_2 = 0.1244e-5$     $Cl_2O = 0.1518e-6$     $HCl = 2.0194$     $HOCl = 0.00165$   
 $N = 0.00259$     $N_2 = 3.6513$     $N_2^+ = 0.2259e-11$     $N_3 = 0.1215e-7$   
 $NO = 0.48376$     $NO^+ = 0.2110e-5$     $NO_2 = 0.4274e-3$     $NO_2^+ = 0.9392e-10$

$\text{NO}_2^- = 0.2272\text{e-}7$      $\text{NO}_3^- = 0.1349\text{e-}10$      $\text{N}_2\text{O} = 0.8393\text{e-}4$      $\text{N}_2\text{O}_3 = 0.3572\text{e-}9$   
 $\text{NH} = 0.7957\text{e-}3$      $\text{NH}_2 = 0.2430\text{e-}3$      $\text{NH}_3 = 0.7440\text{e-}4$      $\text{NH}_4^+ = 0.9802\text{e-}10$   
 $\text{N}_2\text{H}_2 = 0.4863\text{e-}7$      $\text{N}_2\text{H}_4 = 0.5253\text{e-}11$      $\text{HN}_3 = 0.3331\text{e-}8$      $\text{HNO} = 0.6417\text{e-}3$   
 $\text{HNO}_2 = 0.5679\text{e-}4$      $\text{HNO}_3 = 0.9703\text{e-}8$      $\text{NH}_2\text{OH} = 0.1827\text{e-}6$   
 $\text{ClNO} = 0.6687\text{e-}4$      $\text{ClNO}_2 = 0.5248\text{e-}8$      $\text{C} = 0.3575\text{e-}6$      $\text{C}_2 = 0.5745\text{e-}11$   
 $\text{CO} = 4.4529$      $\text{CO}^+ = 0.2094\text{e-}9$      $\text{CO}_2 = 1.0216$      $\text{CO}_2^+ = 0.4626\text{e-}9$   
 $\text{C}_2\text{O} = 0.1922\text{e-}7$      $\text{C}_3\text{O}_2 = 0.4417\text{e-}11$      $\text{CH} = 0.1078\text{e-}6$      $\text{CH}_2 = 0.6650\text{e-}7$   
 $\text{CH}_3 = 0.5061\text{e-}7$      $\text{CH}_4 = 0.6509\text{e-}8$      $\text{C}_2\text{H} = 0.3038\text{e-}10$      $\text{C}_2\text{H}_2 = 0.1684\text{e-}9$   
 $\text{HCO} = 0.5716\text{e-}3$      $\text{HCO}^+ = 0.4408\text{e-}7$      $\text{COOH} = 0.2200\text{e-}3$      $\text{H}_2\text{CO} = 0.1023\text{e-}4$   
 $\text{HCOOH} = 0.1740\text{e-}4$      $\text{CH}_2\text{O}_2 = 0.1740\text{e-}4$      $\text{CH}_3\text{O} = 0.6822\text{e-}9$   
 $\text{CH}_2\text{OH} = 0.2514\text{e-}7$      $\text{C}_2\text{H}_2\text{O} = 0.1010\text{e-}11$      $\text{CCl} = 0.1487\text{e-}6$   
 $\text{ClCO} = 0.7419\text{e-}4$      $\text{Cl}_2\text{CO} = 0.3551\text{e-}7$      $\text{CHCl} = 0.1123\text{e-}7$      $\text{CH}_2\text{Cl} = 0.5909\text{e-}8$   
 $\text{CH}_3\text{Cl} = 0.2344\text{e-}9$      $\text{CHCl}_2 = 0.2579\text{e-}9$      $\text{CH}_2\text{Cl}_2 = 0.5613\text{e-}11$      $\text{C}_2\text{HCl} = 0.5392\text{e-}11$   
 $\text{HClCO} = 0.1394\text{e-}5$      $\text{CN} = 0.3453\text{e-}5$      $\text{CN}^- = 0.8822\text{e-}8$      $\text{NCN} = 0.1003\text{e-}8$   
 $\text{CNN} = 0.2045\text{e-}10$      $\text{C}_2\text{N}_2 = 0.7464\text{e-}11$      $\text{NCO} = 0.2702\text{e-}5$      $\text{HCN} = 0.2615\text{e-}4$   
 $\text{HNC} = 0.7654\text{e-}5$      $\text{ClCN} = 0.2420\text{e-}6$      $\text{Al} = 0.01176$      $\text{Al}^+ = 0.6399\text{e-}3$   
 $\text{Al}_2 = 0.5581\text{e-}6$      $\text{AlO} = 0.09016$      $\text{AlO}^- = 0.5361\text{e-}4$      $\text{AlO}_2 = 0.0129$   
 $\text{AlO}_2^- = 0.1453\text{e-}5$      $\text{Al}_2\text{O} = 0.00463$      $\text{Al}_2\text{O}_2 = 0.00829$      $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c}) = 3.5639$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3358\text{e-}3$      $\text{AlH} = 0.00121$      $\text{AlH}_2 = 0.5610\text{e-}5$      $\text{AlH}_3 = 0.1813\text{e-}6$   
 $\text{AlOH} = 0.31171$      $\text{HAlO} = 0.7393\text{e-}3$      $\text{HAlO}_2 = 0.00761$      $\text{Al}(\text{OH})_2 = 0.0309$   
 $\text{Al}(\text{OH})_3 = 0.01106$      $\text{AlCl} = 0.09602$      $\text{AlCl}_2 = 0.00403$      $\text{AlCl}_3 = 0.3447\text{e-}3$   
 $\text{Al}_2\text{Cl}_6 = 0.1969\text{e-}11$      $\text{ClAlO} = 0.03894$      $\text{Cl}_2\text{AlO} = 0.1907\text{e-}3$   
 $\text{AlH}_2\text{Cl} = 0.5202\text{e-}5$      $\text{AlHCl}_2 = 0.1279\text{e-}3$      $\text{ClAlOH} = 0.02484$   
 $\text{Cl}_2\text{AlOH} = 0.00706$      $\text{AlN} = 0.2861\text{e-}4$      $\text{AlC} = 0.1386\text{e-}8$

## Приложение Г. Зависимость расхода и угла наклона конуса поверхности горения в широком диапазоне давлений

```
In [33]: import openpyxl
import math

book = openpyxl.open("1_Topлива.xlsx", read_only=True)
sheet = book.active
D = 500 * 10 ** -3
d = 20 * 10 ** -3
p = [i for i in range(3 * 10 ** 6, 7 * 10 ** 6 + 1, 8 * 10 ** 4)]

In [34]: mSum = [[[ for j in range(10)] for i in range(10)]
sinAlpha = [[[ for j in range(10)] for i in range(10)]
for j in range(1, 10):
    mSum[0][j] = sheet[1][j].value
    sinAlpha[0][j] = sheet[1][j].value
    mSum[j][0] = sheet[1][j].value
    sinAlpha[j][0] = sheet[1][j].value
    for i in range(1, 10):
        if i != j:
            po_1 = sheet[6][j].value
            po_2 = sheet[6][i].value
            u_l1 = sheet[7][j].value * 10 ** -3
            u_l2 = sheet[7][i].value * 10 ** -3
            v_1 = sheet[8][j].value
            v_2 = sheet[8][i].value
            for p_k in p:
                sinA = (u_l1 * (p_k / 98066.5) ** v_1) / (u_l2 * (p_k / 98066.5) ** v_2)
                sinAlpha[i][j].append(sinA)
                m_1 = po_1 * u_l2 * (p_k / 98066.5) ** v_2 * (math.pi / 4) * (D ** 2 - d ** 2)
                m_2 = po_2 * u_l2 * (p_k / 98066.5) ** v_2 * (math.pi / 4) * d ** 2
                if sinA <= 1 and v_2 < v_1:
                    mSum[i][j].append(m_1 + m_2)
                else:
                    mSum[i][j] = []
                    break
```

Рисунок Г.1

In [35]:

```
book_write = openpyxl.Workbook()
sheet_write = book_write.active
s = 2
sheet_write.cell(row=1, column=1).value = "p"
for i in range(len(p)):
    sheet_write[i + 2][0].value = p[i] * 10 ** -6
for i in range(10):
    for j in range(10):
        if len(mSum[i][j]) == 51:
            sheet_write.cell(row=1, column=s).value = mSum[0][j] + "-" + mSum[i][0]
            for k in range(len(mSum[i][j])):
                sheet_write.cell(row=k + 2, column=s).value = mSum[i][j][k]
            s += 1
book_write.save("result.xlsx")
book_write.close()
```

In [36]:

```
import math
book_write = openpyxl.Workbook()
sheet_write = book_write.active
s = 2
sheet_write.cell(row=1, column=1).value = "p"
for i in range(len(p)):
    sheet_write[i + 2][0].value = p[i] * 10 ** -6
for i in range(10):
    for j in range(10):
        if len(sinAlpha[i][j]) == 51:
            sheet_write.cell(row=1, column=s).value = sinAlpha[0][j] + "-" + sinAlpha[i][0]
            for k in range(len(sinAlpha[i][j])):
                sheet_write.cell(row=k + 2, column=s).value = math.degrees(math.asin(sinAlpha[i][j][k]))
            s += 1
book_write.save("result_sin.xlsx")
book_write.close()
```

Рисунок Г.2

## Приложение Д. Результаты расчета расхода для топливных пар в зависимости от давления

Таблица Д.1

$p_k$ , МПа	ARCADENE-ARCIT-373D	RD-2435-ARCIT-373D	ПХА-3М-ARCIT-373D	ПХА-4М-ARCIT-373D
3	6,683	6,572	6,461	6,683
3,5	6,913	6,798	6,683	6,913
4	7,120	7,001	6,883	7,120
4,5	7,307	7,185	7,063	7,307
5	7,478	7,353	7,229	7,478
5,5	7,636	7,509	7,382	7,636
6	7,784	7,654	7,525	7,784
6,5	7,922	7,790	7,659	7,922
7	8,052	7,918	7,784	8,052

Таблица Д.2

$p_k$ , МПа	ПХА-5М-ARCIT-373D	ПХК-1М-ARCIT-373D	ARCADENE-TP-H-3062	RD-2435-TP-H-3062
3	5,682	7,573	3,833	3,769
3,5	5,878	7,834	3,965	3,899
4	6,053	8,067	4,083	4,015
4,5	6,212	8,279	4,190	4,121
5	6,358	8,473	4,289	4,217
5,5	6,493	8,653	4,380	4,307
6	6,618	8,820	4,464	4,390
6,5	6,736	8,977	4,543	4,468
7	6,846	9,124	4,618	4,541



Таблица Д.3

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ТР-Н-3062	ПХА-5М-ТР-Н-3062	ARCADENE-ПХА-4М	RD-2435-ПХА-4М
3	3,705	3,259	5,213	5,126
3,5	3,833	3,372	5,409	5,319
4	3,947	3,472	5,585	5,492
4,5	4,051	3,563	5,745	5,650
5	4,146	3,646	5,892	5,794
5,5	4,234	3,724	6,029	5,929
6	4,316	3,796	6,156	6,054
6,5	4,392	3,863	6,275	6,171
7	4,464	3,927	6,388	6,282

Таблица Д.4

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ПХА-4М	ПХА-5М-ПХА-4М	ПХК-1М-ПХА-4М	RD-2435-ПХК-1М
3	5,039	4,432	5,907	4,275
3,5	5,229	4,599	6,129	4,464
4	5,399	4,749	6,329	4,634
4,5	5,554	4,885	6,510	4,789
5	5,696	5,010	6,677	4,933
5,5	5,828	5,126	6,831	5,066
6	5,951	5,234	6,976	5,191
6,5	6,067	5,336	7,111	5,309
7	6,175	5,431	7,239	5,420

Таблица Д.5

$p_k$ , МПа	ARCADENE-ПХН-2М	ARCIT-373D-ПХН-2М	RD-2435-ПХН-2М	TP-H-3062-ПХН-2М
3	9,821	9,658	9,658	9,930
3,5	10,113	9,945	9,945	10,225
4	10,373	10,200	10,200	10,488
4,5	10,608	10,431	10,431	10,725
5	10,822	10,642	10,642	10,942
5,5	11,020	10,837	10,837	11,142
6	11,204	11,017	11,017	11,328
6,5	11,375	11,186	11,186	11,501
7	11,537	11,345	11,345	11,664

Таблица Д.6

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ПХН-2М	ПХА-4М-ПХН-2М	ПХА-5М-ПХН-2М	ПХК-1М-ПХН-2М
3	9,494	9,821	8,351	11,128
3,5	9,777	10,113	8,599	11,458
4	10,028	10,373	8,820	11,753
4,5	10,255	10,608	9,020	12,019
5	10,462	10,822	9,202	12,262
5,5	10,653	11,020	9,370	12,486
6	10,831	11,204	9,527	12,694
6,5	10,997	11,375	9,673	12,889
7	11,153	11,537	9,810	13,071

## Приложение Е. Результаты расчета угла наклона конуса для топливных пар в зависимости от давления

Таблица Е.1

$p_k$ , МПа	ARCADENE-ARCIT-373D	RD-2435-ARCIT-373D	ПХА-3М-ARCIT-373D	ПХА-4М-ARCIT-373D
3	11,536	21,063	26,275	51,258
3,5	11,608	22,742	26,451	51,479
4	11,671	24,317	26,603	51,671
4,5	11,727	25,809	26,739	51,843
5	11,777	27,234	26,861	51,997
5,5	11,823	28,603	26,972	52,137
6	11,865	29,924	27,074	52,265
6,5	11,903	31,204	27,167	52,384
7	11,939	32,451	27,255	52,495

Таблица Е.2

$p_k$ , МПа	ПХА-5М-ARCIT-373D	ПХК-1М-ARCIT-373D	ARCADENE-TP-H-3062	RD-2435-TP-H-3062
3	26,275	40,574	20,407	38,805
3,5	26,451	41,031	20,539	42,382
4	26,603	41,433	20,654	45,891
4,5	26,739	41,793	20,756	49,390
5	26,861	42,119	20,848	52,934
5,5	26,972	42,416	20,931	56,589
6	27,074	42,691	21,008	60,437
6,5	27,167	42,946	21,079	64,606
7	27,255	43,184	21,144	69,326

Таблица Е.3

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ТР-Н-3062	ПХА-5М-ТР-Н-3062	ARCADENE-ПХА-4М	RD-2435-ПХА-4М
3	50,524	50,524	14,856	27,438
3,5	50,957	50,957	14,903	29,611
4	51,337	51,337	14,944	31,663
4,5	51,676	51,676	14,980	33,621
5	51,983	51,983	15,012	35,504
5,5	52,264	52,264	15,042	37,329
6	52,523	52,523	15,068	39,107
6,5	52,763	52,763	15,093	40,848
7	52,988	52,988	15,116	42,562

Таблица Е.4

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ПХА-4М	ПХА-5М-ПХА-4М	ПХК-1М-ПХА-4М	RD-2435-ПХК-1М
3	34,581	34,581	56,502	33,543
3,5	34,703	34,703	57,042	36,078
4	34,809	34,809	57,518	38,482
4,5	34,903	34,903	57,946	40,790
5	34,988	34,988	58,334	43,027
5,5	35,064	35,064	58,691	45,214
6	35,134	35,134	59,021	47,367
6,5	35,199	35,199	59,328	49,503
7	35,259	35,259	59,616	51,635



Таблица Е.5

$p_k$ , МПа	ARCADENE-ПХН-2М	ARCIT-373D-ПХН-2М	RD-2435-ПХН-2М	ТР-Н-3062-ПХН-2М
3	7,826	42,913	14,165	22,985
3,5	7,911	43,160	15,334	23,098
4	7,986	43,376	16,428	23,196
4,5	8,052	43,568	17,462	23,283
5	8,112	43,741	18,446	23,361
5,5	8,167	43,898	19,387	23,432
6	8,217	44,043	20,291	23,497
6,5	8,264	44,176	21,164	23,557
7	8,307	44,300	22,009	23,612

Таблица Е.6

$p_k$ , МПа	ПХА-3М-ПХН-2М	ПХА-4М-ПХН-2М	ПХА-5М-ПХН-2М	ПХК-1М-ПХН-2М
3	17,543	32,078	17,543	26,287
3,5	17,739	32,356	17,739	26,683
4	17,912	32,599	17,912	27,032
4,5	18,065	32,816	18,065	27,343
5	18,203	33,012	18,203	27,626
5,5	18,330	33,190	18,330	27,885
6	18,446	33,353	18,446	28,123
6,5	18,553	33,504	18,553	28,345
7	18,653	33,645	18,653	28,552

## **Приложение Ж. Графическая часть дипломного проекта**

В графическую часть дипломного проекта входят:

1. Конструкция РДТТ (рисунок Ж.1);
2. Поворотное сопло. Воспламенительное устройство (рисунок Ж.2);
3. Графики ВБХ (рисунок Ж.3);
4. Расчет тепловых потоков по длине сопла (рисунок Ж.4);
5. Исследовательская часть (рисунок Ж.5);
6. Общий вид заряда (рисунок Ж.6);
7. Операционная карта, лист 1 (рисунок Ж.7);
8. Операционная карта, лист 2 (рисунок Ж.8);
9. Операционная карта, лист 3 (рисунок Ж.9);
10. Операционная карта, лист 4 (рисунок Ж.10);
11. Экструдер, сборочный чертеж (рисунок Ж.11);
12. Спецификация к сборочному чертежу экструдера (рисунок Ж.12);
13. План проектных работ (рисунок Ж.13).



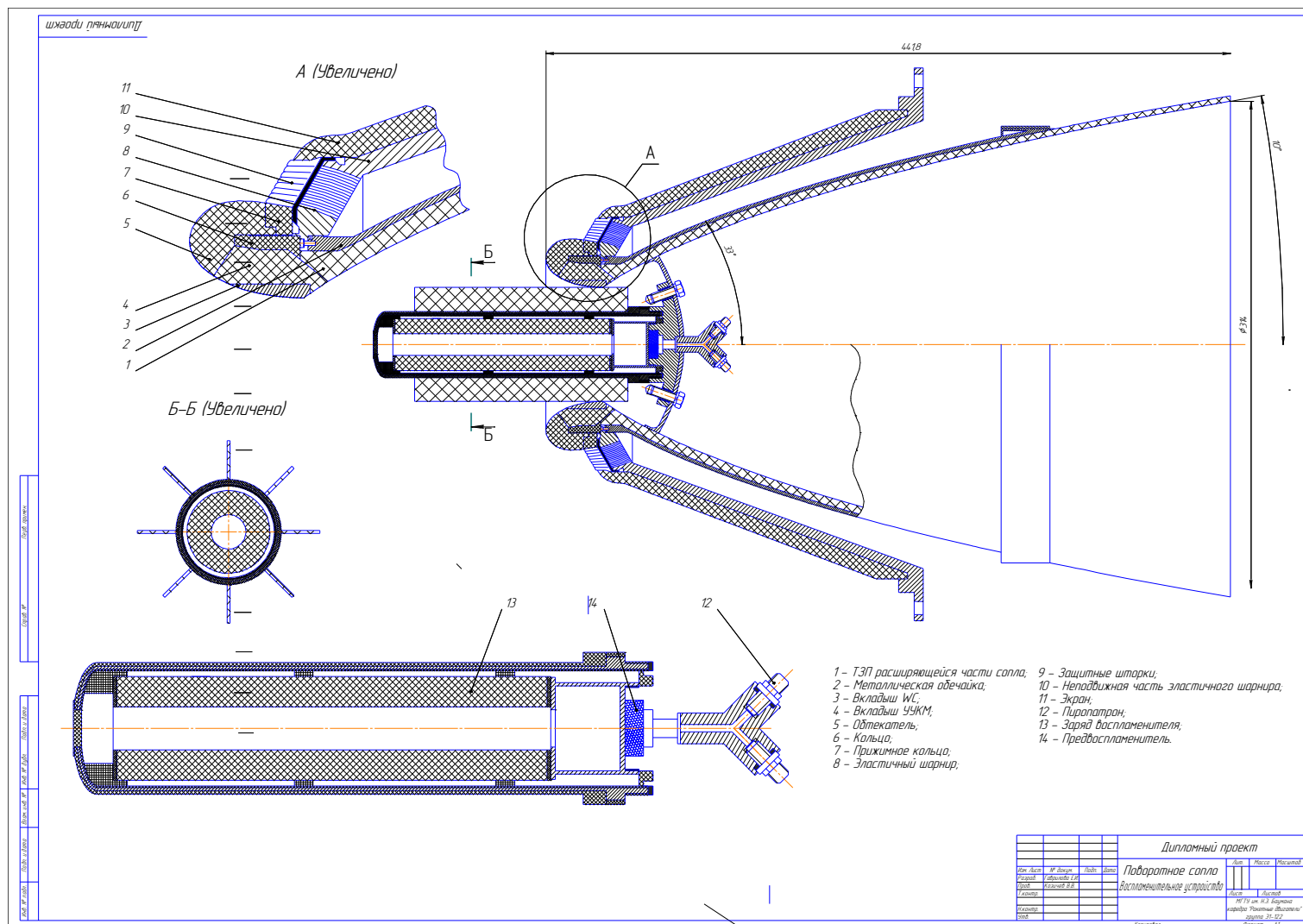


Рисунок Ж.2 – Поворотное сопло. Воспламенительное устройство

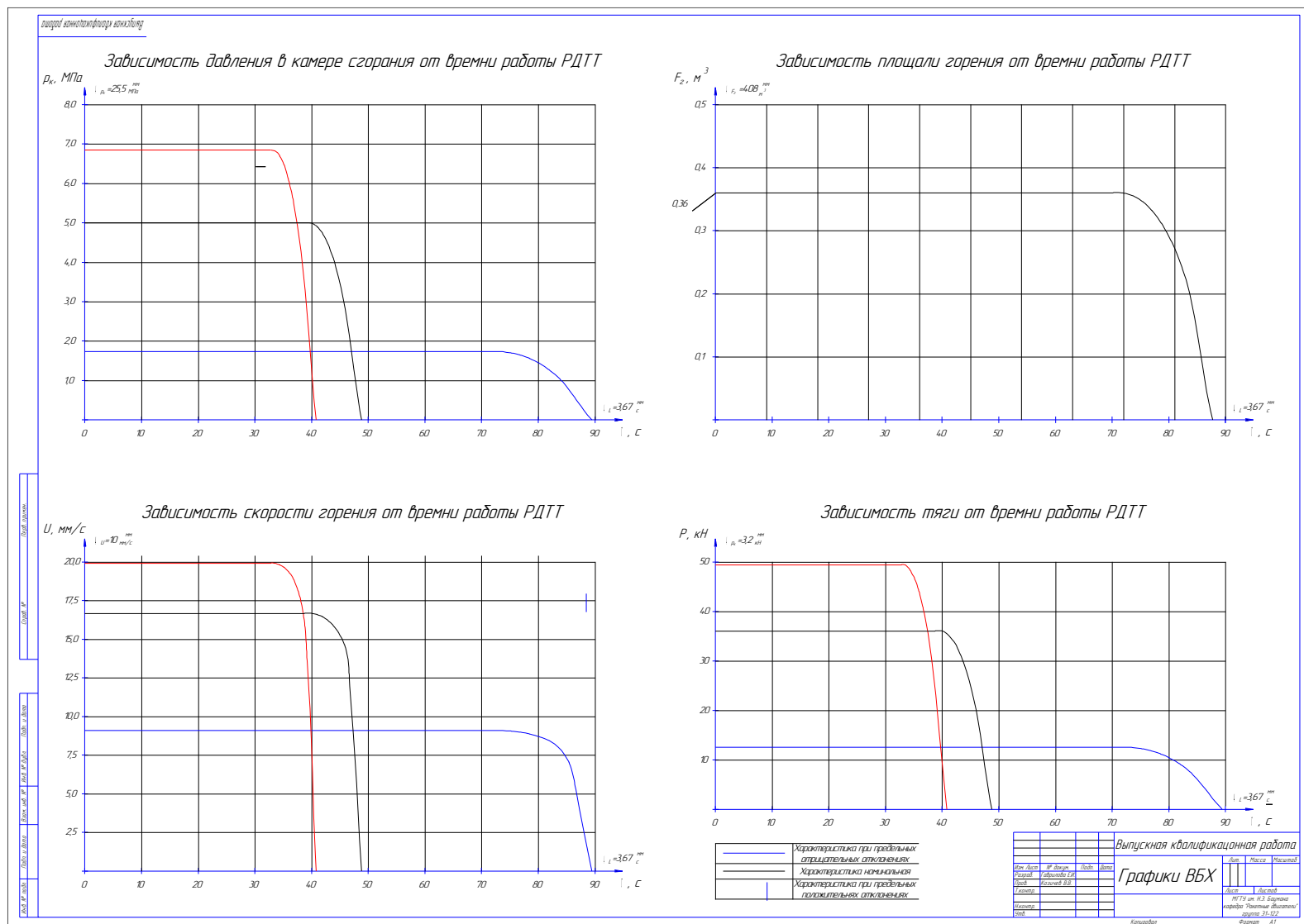


Рисунок Ж.3 – Графики ВВХ



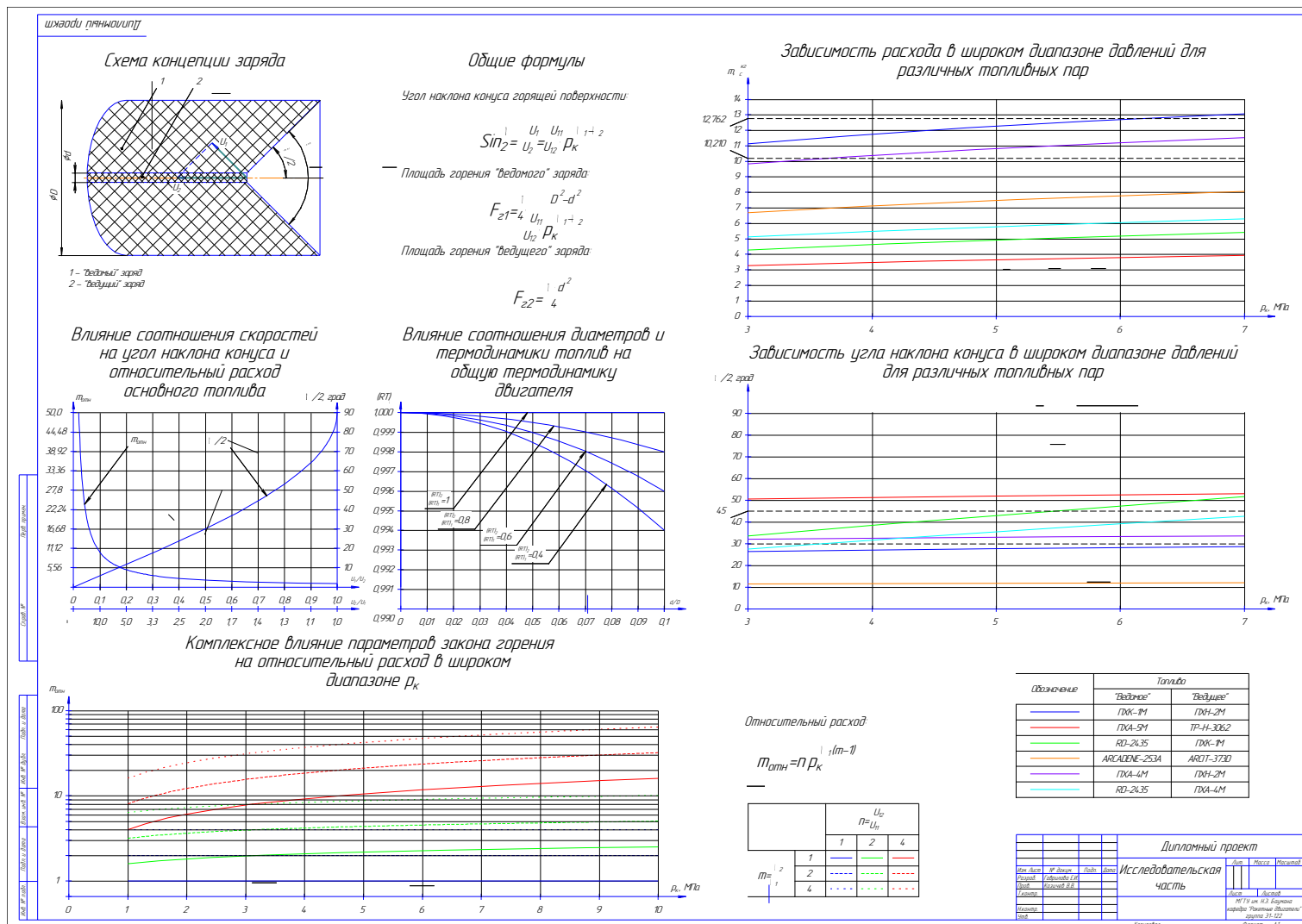


Рисунок Ж.5 – Исследовательская часть





Операция 005. Подготовка рабочей смеси порошкообразных компонентов

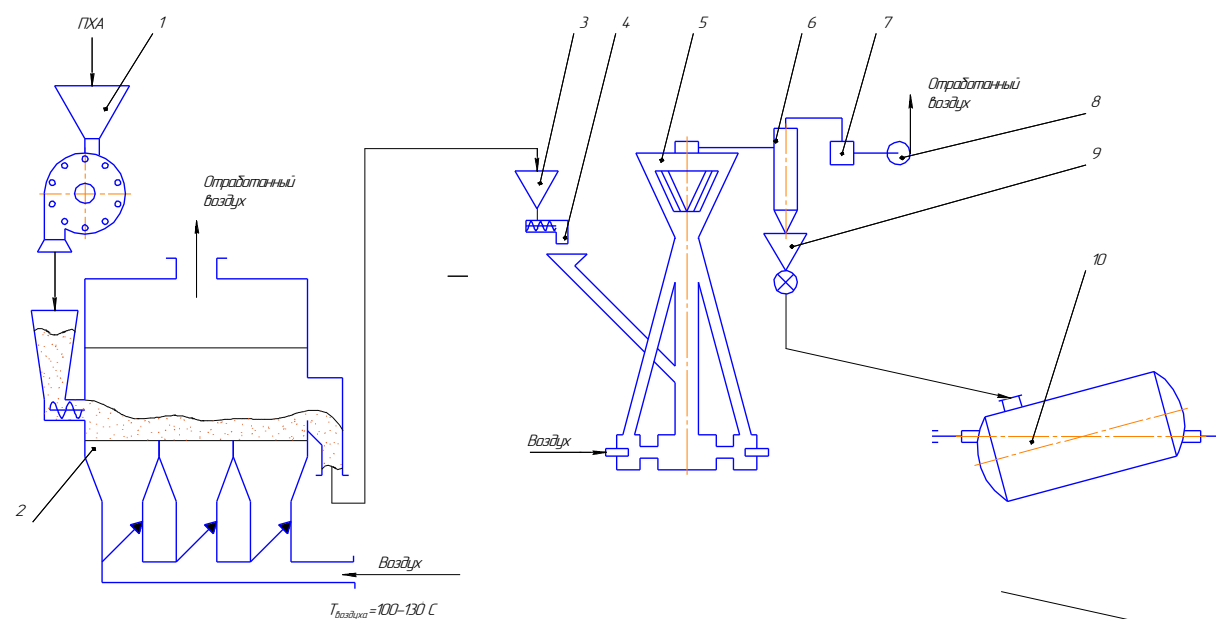
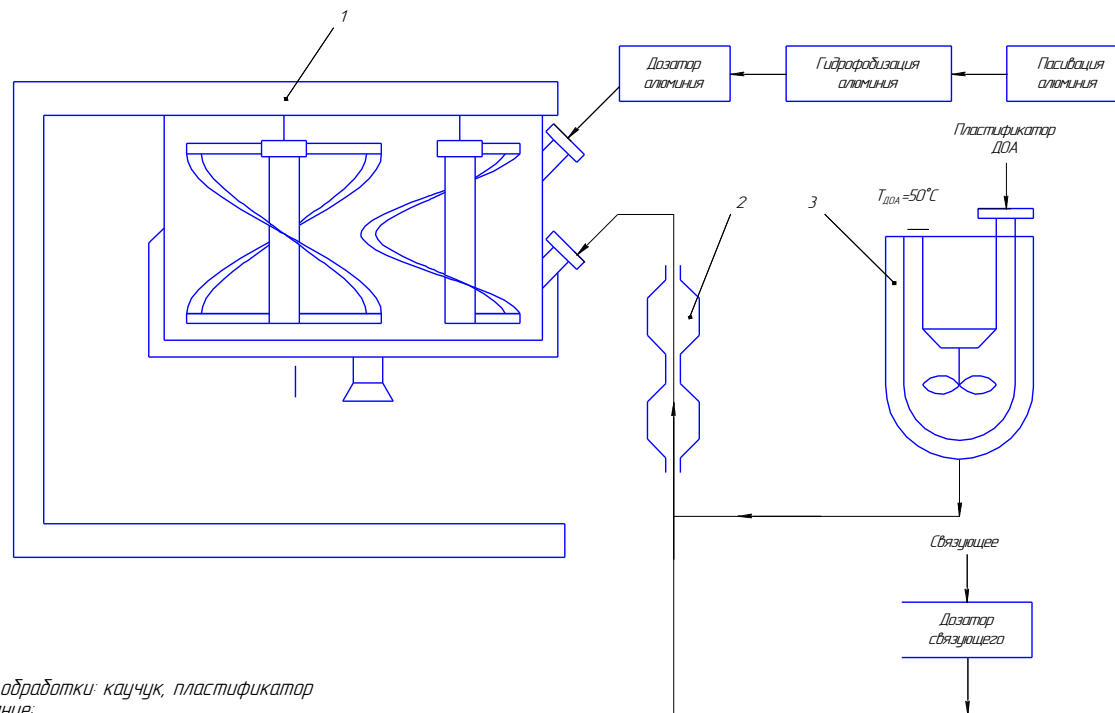


Рисунок Ж.7 – Операционная карта, лист 1

# Операция 010. Приготовление смеси связующего с добавками



1. Материал обработки: каучук, пластификатор
2. Оборудование: планетарный смеситель
3. Время смешения не менее 10 мин
4. Скорость вращения лопастей - 10 об/с

- 1 - смеситель планетарного действия;
- 2 - импульсный дозатор;
- 3 - реактор пластификатора.

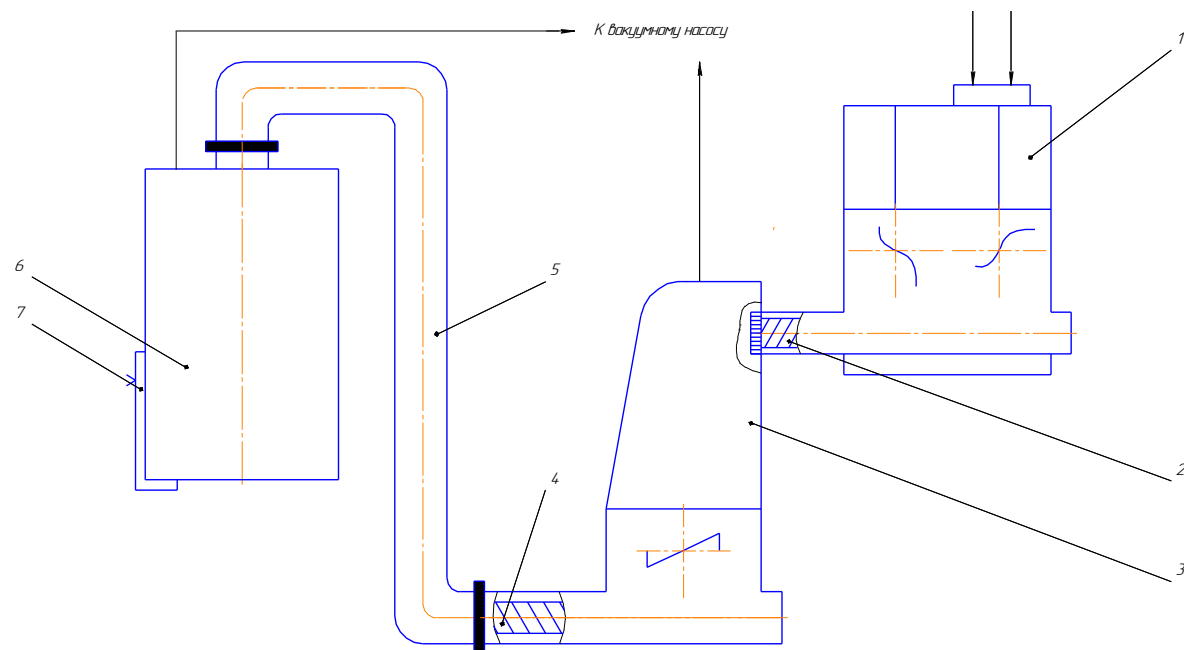
Выпускная квалификационная работа				Лит	Масса	Масштаб
Изм.	Докл.	№ докум.	Подп.	Дата		
Разработ.	Губарева Е.И.					
Проб.	Косов М.А.					
Технотр.						
Пожитр.						
Этп.						

Операционная карта

Лист 1 из 1  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра "Ресурсы двигателей"  
группа 31-122  
Формат А2

Рисунок Ж.8 – Операционная карта, лист 2

Операция 025. Смешение топливной массы

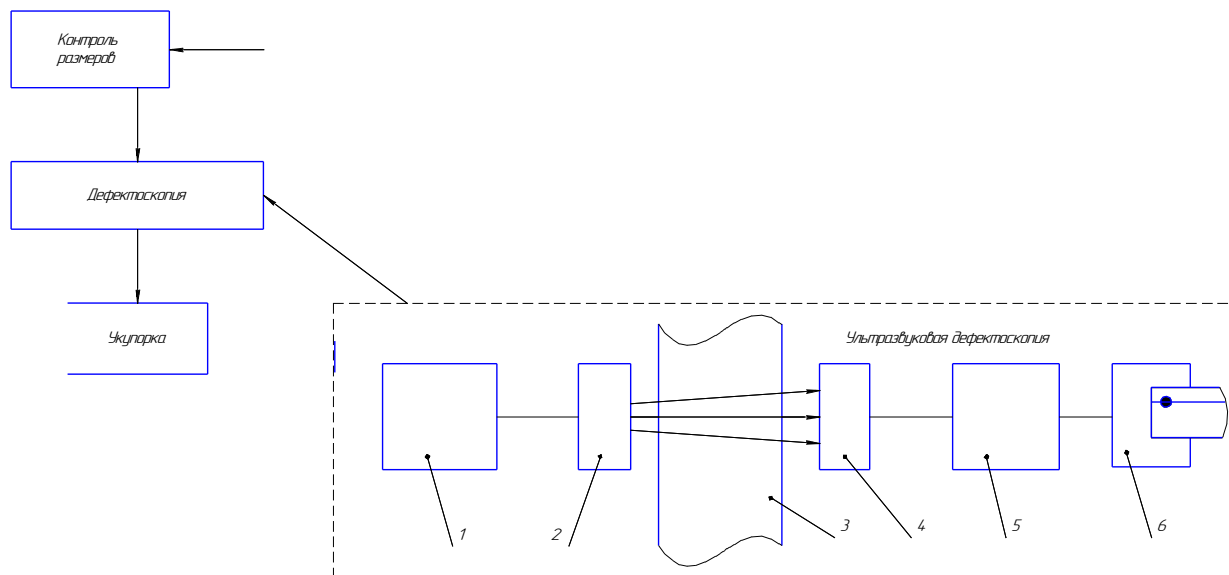


- 1 – смеситель непрерывного действия;
- 2 – первичный шнек;
- 3 – вакуумная камера;
- 4 – напорный шнек;
- 5 – напорная труба;
- 6 – корпус РДТТ;
- 7 – крепежная опора

- 1. Оборудование:  
– смеситель непрерывного действия
- 2. Температура топливной массы –  $T_{TM}=80-120^{\circ}\text{C}$
- 3. Скорость вращения лопастей – 10 об/с

Рисунок Ж.9 – Операционная карта, лист 3

# Операция 070. Контроль качества и укупорка



- 1 – генератор ультразвуковой аппаратуры;
- 2 – излучающий преобразователь;
- 3 – снаряженный корпус;
- 4 – приемный преобразователь;
- 5 – приемник ультразвуковой аппаратуры;
- 6 – регистрирующее устройство.

1. Оборудование:  
– ультразвуковой дефектоскоп, УЗД-150
2. Скорость перемещения стола не более 10 мм/с
3. Не допускаются пустоты в заряде с размером более 5 мм и суммарным объемом более 10 см<sup>3</sup>
4. Не допускаются сколы, трещины и расслоения в заряде

Выпускная квалификационная работа				Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Лист	Дата		
Разраб.	Габрилова Е.И.					
Проб.	Камков М.А.					
Т.контр.						
И.контр.						
Утв.						
Операционная карта				Лист	Листов	
				МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедра "Ракетные двигатели" группа 31-122		
Контроль				Формат А2		

Рисунок Ж.10 – Операционная карта, лист 4



Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание			
Перв. примен.	Справ. №								
			1		Хомут	1			
			2		Винт	1			
			3		Корпус шнека	1			
			4		Втулка	1			
			5		Загрузочный бункер	1			
			6		Корпус подшипника	1			
			7		Втулка упорная	1			
			9		Корпус	1			
			11		Крышка подшипника	1			
			12		Уплотнительное кольцо	1			
			13		Шестерня	1			
			14		Узел обогрева	1			
			19		Плита	1			
		Подп. и дата	Инв. № дудл.						
Взам. инв. №	Инв. № инв.								
Подп. и дата	Инв. № подл.								
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Изм. Лист № докум. Подп. Дата</p> <p>Разраб. Гаврилова Е.И.</p> <p>Пров. Комков М.А.</p> <p>Н.контр.</p> <p>Утв.</p> </div> <div> <p><b>Выпускная квалификационная работа</b></p> <p><b>Экструдер</b></p> </div> <div> <p>Лит. Лист Листов</p> <p>МГТУ им. Н.Э. Баумана</p> <p>кафедра "Ракетные двигатели"</p> <p>группа Э1-122</p> </div> </div>									

Копировал
Формат А4

Рисунок Ж.12 – Спецификация к сборочному чертежу экструдера

