









## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

|      |  |
|------|--|
| РДТТ | – ракетный двигатель твердого топлива; |
| ТРТ  | – твердое ракетное топливо;            |
| ТЗ   | – техническое задание;                 |
| ТТХ  | – тактико-технические характеристики;  |
| ВБП  | – внутрибаллистические параметры;      |
| ПС   | – продукты сгорания;                   |
| КС   | – камера сгорания;                     |
| ТЗП  | – теплозащитное покрытие;              |
| ВБР  | – вероятность безотказной работы;      |
| ВУ   | – воспламенительное устройство.        |

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ;

$\beta$  – расходный комплекс,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$c_p$  – массовая удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

$d$  – диаметр,  $\text{м}$ ;

$\delta$  – относительное отклонение;

$F$  – площадь,  $\text{м}^2$ ;

$h$  – толщина,  $\text{м}$ ;

$I$  – энтальпия,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$k$  – показатель адиабаты, коэффициент запаса;

$l$  – длина,  $\text{м}$ ;

$m$  – масса,  $\text{кг}$ ;

$\dot{m}$  – секундный массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$M$  – число Маха, момент;

$\mu$  – молекулярная масса,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;

$\lambda$  – приведенная скорость, коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$R_k$  – газовая постоянная,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;

$R$  – сила,  $\text{Н}$ ;

$p$  – давление,  $\text{Па}$ ;

$Q$  – количество теплоты,  $\text{Дж}$ ;

$q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ;

$r$  – радиус,  $\text{м}$ ;

$\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$T$  – температура по шкале Кельвина,  $\text{К}$ ;

$t$  – температура по шкале Цельсия,  $^\circ$ ;

$\sigma$  – напряжение, МПа;

$\tau$  – промежуток времени, с;

$u$  – линейная скорость горения твердого топлива, мм/с;

$V$  – объем, м<sup>3</sup>;

$W$  – скорость, м/с;

$\varphi$  – коэффициент сопла, расхода;

$x$  – линейное перемещение, мм;

$\chi$  – коэффициент тепловых потерь;

$z$  – относительное массовое содержание k-фазы.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....  | 5  |
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....  | 6  |
| СОДЕРЖАНИЕ .....   | 8  |
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 11 |
| 1 Конструкторская часть.....   | 13 |
| 1.1 Назначение и область применения.....   | 13 |
| 1.2 Описание конструкции РДТТ .....  | 13 |
| 1.2.1 Описание конструкции, состав и принцип действия .....  | 13 |
| 1.2.2 Конструкция крышки задней .....  | 16 |
| 1.2.3 Конструкция узла стыковки .....  | 18 |
| 1.2.4 Сборка двух двигателей.....  | 20 |
| 1.3 Выбор твердого ракетного топлива.....  | 22 |
| 1.3.1 Состав №1.....   | 22 |
| 1.3.2 Состав №2.....   | 23 |
| 1.3.3 Опытные данные .....   | 25 |
| 1.4 Выбор конструктивной формы заряда .....  | 27 |
| 1.5 Расчет внутрибаллистических характеристик РДТТ .....   | 28 |
| 1.6 Расчет отклонений и оценка предельных значений внутрибаллистических характеристик РДТТ .....               | 35 |
| 1.6.1 Исходные данные.....   | 36 |
| 1.6.2 Случайные отклонения параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда твердого топлива .....         | 36 |
| 1.6.3 Отклонения, вызванные случайными отклонениями параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда ..... | 39 |
| 1.6.4 Предельные отклонения параметров .....   | 40 |
| 1.7 Прочностной расчет корпуса .....   | 40 |
| 1.8 Выбор и обоснование конструкции воспламенителя .....   | 42 |
| 1.9 Расчет сопловой заглушки .....   | 44 |
| 1.10 Расчёт и проектирование соплового блока.....  | 45 |
| 1.10.1 Профилирование сужающейся части сопла .....   | 45 |
| 1.10.2 Профилирование трансзвуковой части сопла .....  | 46 |
| 1.10.3 Профилирование расширяющейся части сопла .....  | 47 |
| 1.11 Оценка потерь удельного импульса .....  | 47 |
| 1.12 Тепловой расчет двигателя .....   | 49 |
| 1.12.1 Задачи расчета.....   | 49 |



|  |     |
|--|-----|
| 1.12.2 Исходные данные для расчета.....  | 49  |
| 1.12.3 Расчет.....   | 52  |
| 1.12.4 Результат расчета .....   | 56  |
| 1.13 Расчет толщины бронирующего покрытия заряда .....   | 60  |
| 1.14 Расчет заряда на прочность.....   | 63  |
| Заключение к конструкторской части.....  | 66  |
| 2 Исследовательская часть. Экспериментальное подтверждение требований<br>технического задания..... | 67  |
| Введение .....   | 67  |
| 2.1 Стапельное оборудование.....   | 67  |
| 2.2 Программа и методика проведения испытаний.....   | 71  |
| 2.2.1 Перечень обозначений и сокращений.....   | 71  |
| 2.3 Программа на проведение испытаний .....  | 82  |
| 2.4 Опытные данные .....   | 84  |
| Заключение к исследовательской части.....  | 85  |
| 3 Технологическая часть.....   | 87  |
| Введение .....   | 87  |
| 3.1 Проектирование технологического процесса изготовления детали.....                              | 87  |
| 3.1.1 Назначение детали, анализ технических требований .....                                       | 87  |
| 3.1.2 Анализ технологичности .....   | 88  |
| 3.1.3 Выбор метода изготовления .....  | 89  |
| 3.1.4 Выбор материала.....   | 90  |
| 3.1.5 Свойства материала .....   | 90  |
| 3.2 Технологический процесс .....  | 91  |
| 3.3 Расчет режимов резания. Техническое нормирование.....  | 99  |
| 3.4 Приспособление .....   | 103 |
| 4 Охрана труда и экология.....   | 105 |
| 4.1 Экологическая безопасность разрабатываемого двигателя .....                                    | 105 |
| 4.1.1 Анализ неблагоприятных факторов при испытаниях .....   | 105 |
| 4.1.2 Общие требования экологической безопасности.....   | 105 |
| 4.1.3 Обеспечение экологической безопасности персонала при работе с<br>изделием.....               | 107 |
| 4.1.4 Предложения по утилизации зарядов после истечения сроков их<br>технической пригодности ..... | 111 |
| 4.1.5 Эколого-гигиеническая характеристика продуктов сгорания изделия<br>.....                     | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1.6 Оценка озоноразрушающего действия продуктов сгорания состава .....                    | 117 |
| 4.1.7 Эколого-гигиеническая характеристика компонентов дымного пороха (воспламенителя)..... | 118 |
| 4.2 Заключение .....  | 119 |
| 5 Экономическая часть .....   | 121 |
| Введение .....  | 121 |
| 5.1 Исходные данные для проведения расчета затрат на создание РДТТ ....                     | 122 |
| 5.2 Основные этапы НИОКР .....  | 123 |
| 5.3 Сетевая модель .....  | 126 |
| 5.4 Определение числа исполнителей.....   | 126 |
| 5.5 Затраты на проект.....  | 127 |
| 5.5.1 Затраты на проектирование .....   | 127 |
| 5.5.2 Затраты на испытания.....   | 132 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 144 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....  | 146 |

## ВВЕДЕНИЕ

Ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ) в настоящее время широко применяются в качестве маршевых двигателей многоступенчатых баллистических ракет и ракет-носителей для вывода космических аппаратов на орбиту, вспомогательных РД для ориентации и стабилизации космических аппаратов, коррекции траектории и выполнения маневров на орбите, разделения ступеней, обеспечения мягкой посадки спускаемых отсеков, систем аварийного спасения экипажа и полезного груза (САС) и т.д.

Актуальность разработки РДТТ обосновывается рядом преимуществ его перед жидкостным ракетным двигателем (ЖРД):

- относительная простота конструкции и эксплуатации – горение топлива в РДТТ происходит в камере сгорания (КС), нет поступления каких-либо дополнительных веществ, т.е. отсутствие систем подачи топлива;
- высокая готовность применения – благодаря возможности длительного хранения в снаряженном состоянии РДТТ может находиться значительное время в готовности на старте без проведения каких-либо специальных подготовленных работ независимо от времени года и атмосферных условий;
- высокая надежность и безотказность – реализуется за счет малого количества отдельных узлов и агрегатов, входящих в состав РДТТ.

Недостатки РДТТ:

- более низкие энергетические характеристики твердых ракетных топлив (ТРТ) по сравнению с жидкими ракетными топливами;
- зависимость скорости горения топлива от начальной температуры  $T_{\text{нач}}$  (в особенности у баллистических топлив), что увеличивает разброс ВБП и ТТХ РДТТ;

— ограниченное время работы из-за сложности реализации охлаждения конструкционных материалов и из-за ограниченных габаритов заряда РДТТ;

— сложность регулирования тяги по величине и направлению;

— трудность осуществления многократного запуска РДТТ;

— наиболее совершенные ТРТ с экономической точки зрения менее выгодны, чем другие РТ.

## **1 Конструкторская часть**

### **1.1 Назначение и область применения**

1 РДТТ предназначен для подачи по воздуху заряда разминирования на заданную дистанцию, при его применении в установках разминирования УР-77, УР-07М с целью проделывания проходов в противотанковых минных полях противника.

2 Заряд двигателя предназначен для снаряжения герметичного, двухкамерного, однорежимного, шестисопельного двигателя.

3 Воспламенитель предназначен для воспламенения заряда в двигателе.

4 Инициирование (зажжение) воспламенителя осуществляется от пиропатрона ДП4-3.

5 Корпус изготавливается в штатном и телеметрическом исполнении. Конструкция корпуса телеметрического исполнения предусматривает возможность установки датчиков для измерения давления на этапе отработки опытного образца при ОСИ и при дальнейших ПС ОСИ.

### **1.2 Описание конструкции РДТТ**

При выборе конструктивно-компоновочной схемы и конструкционных материалов в качестве аналога была рассмотрена схема маршевого ракетного двигателя ДМ-70, серийное изготовление которого было начато в 1988 году.

Использование конструктивных элементов, отработанных на двигателе ДМ-70, позволит значительно сократить затраты, необходимые на отработку конструкции двигателя.

#### **1.2.1 Описание конструкции, состав и принцип действия**

Конструкция двигателя представлена на рисунке 1.13 и включает следующие основные составные части:

- корпус;
- заряд баллиститного ракетного твердого топлива;

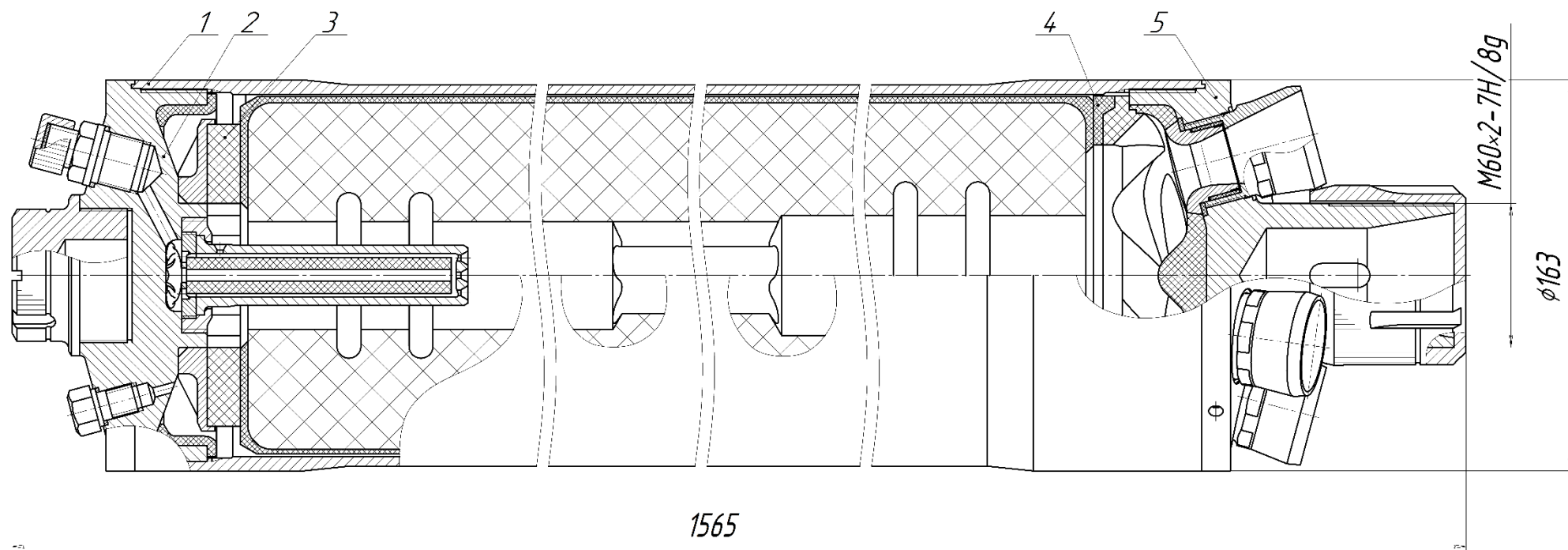
- воспламенительное устройство, состоящее из воспламенителя и заряда форкамеры;
- пиропатрон ДП4-3.

Корпус (рисунок 1.1) выполнен в виде тонкостенного цилиндра 1, к которому по торцам на резьбе крепятся крышка передняя 2 и крышка задняя 5.

Цилиндрическая часть корпуса 1 выполнена из трубы диаметром 163 мм и длиной 1390 мм. Материал трубы сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-2016 с механическими свойствами:

- предел текучести не менее 1078 МПа (110 кгс/мм<sup>2</sup>);
- относительное удлинение не менее 10 %.

Для фиксации заряда в осевом направлении и обеспечения застойной зоны на опоре передней приклеен «амортизатор» 3, а на опоре задней приклеен «обтюратор» 4, выполненные из пористой резины. На крышке задней 5 выполнен цилиндрический выступ с резьбой М60×2-7Н/8g, имеющий конусное отверстие, предназначенное для соединения либо с другим двигателем (при использовании варианта «попарно-параллельного» соединения двух двигателей (рисунок 1.16)), либо с детонирующим удлиненным зарядом разминирования при помощи переходной втулки и соединительного троса.



- 1 – корпус;
- 2 – крышка передняя;
- 3 – амортизатор;
- 4 – обтюратор;
- 5 – крышка задняя.

Рисунок 1.1 – Двигатель

### **1.2.2 Конструкция крышки задней**

Сборочная единица «Крышка задняя» (рисунок 1.2) состоит из крышки задней 4, в которой установлено шесть вкладышей 5 и шесть втулок 6, образующих 6 сопел под углом  $15^\circ$  к оси изделия.

Конструкция сопла:

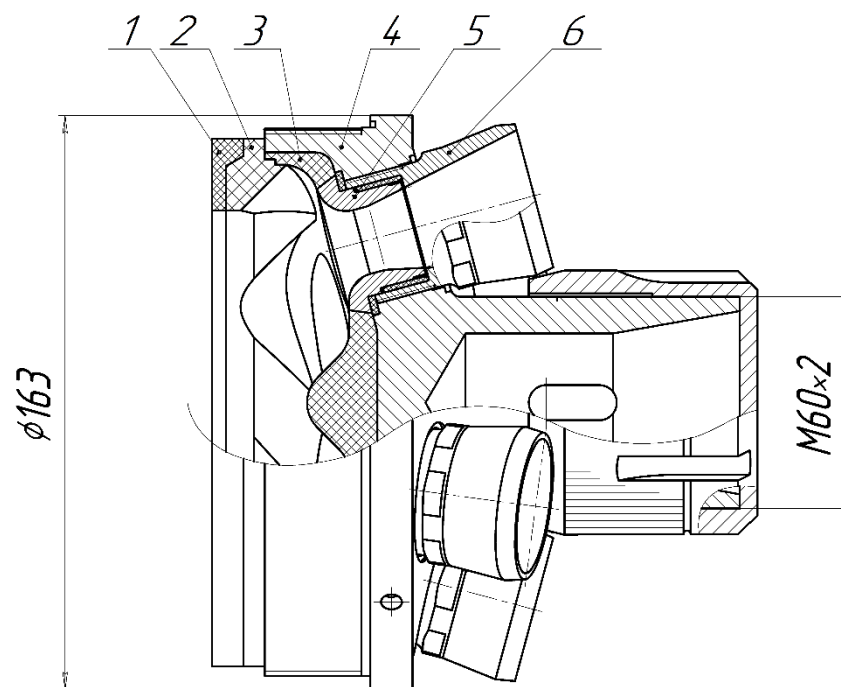
Сопло двигателя выполнено из молибденовых вкладышей 5 и втулки 6, которые уменьшают разгар критического сечения сопла, что частично улучшило ВБП двигателя и позволило обеспечить выполнение требований ТЗ.

Между крышкой задней 4 и вкладышем для уменьшения прогрева крышки задней нанесено теплоизолирующее покрытие 3, выполненное из П-5-2М.

Изоляционные свойства теплозащитного покрытия подтверждаются результатами ОСИ.

В выходной части сопла между вкладышем 5 и втулкой 6, установлена алюминиевая мембрана, обеспечивающая герметичность камеры сгорания двигателя и давление вскрытия, необходимое для надежного воспламенения заряда.





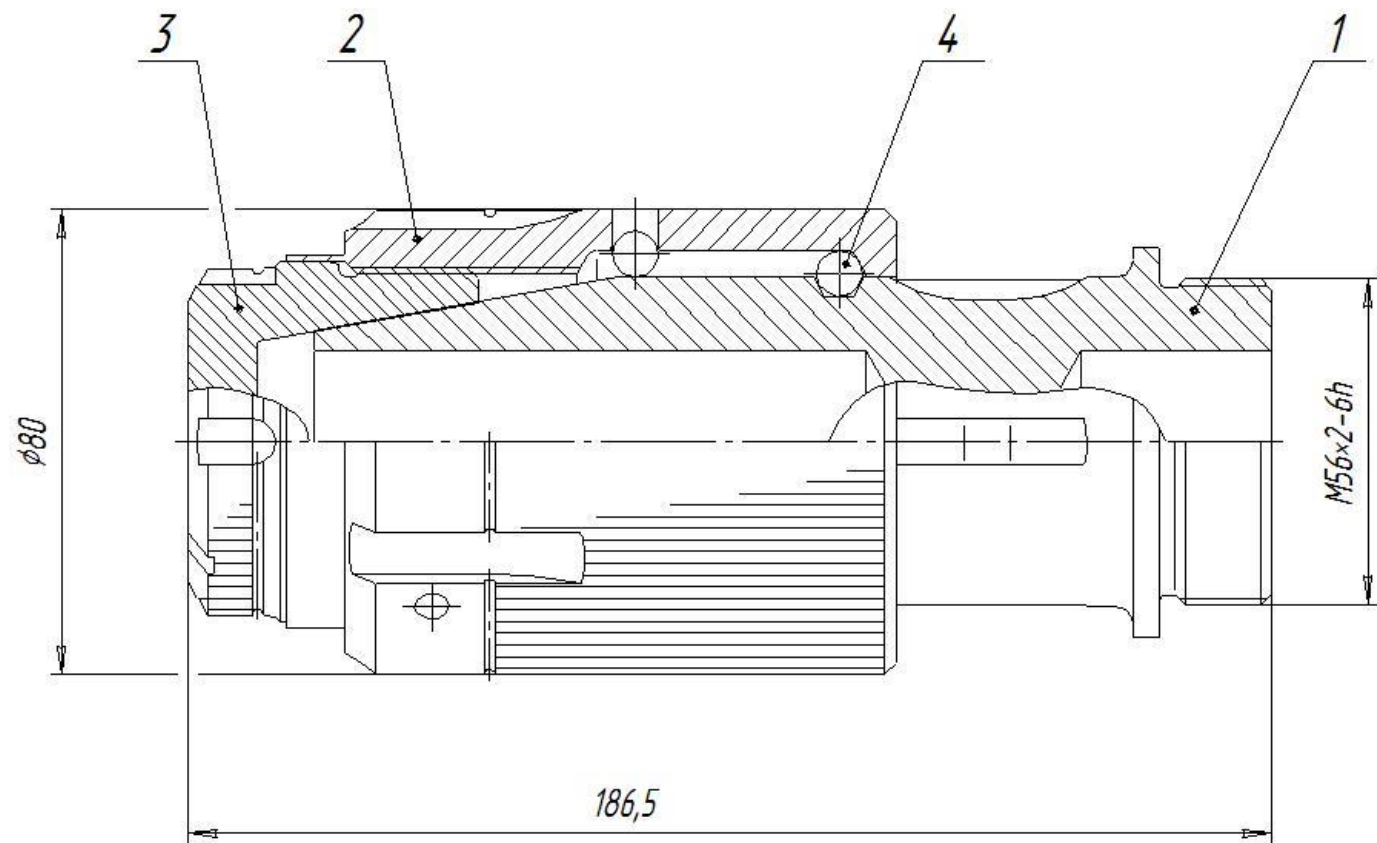
- 1 – обтюратор;
- 2 – опора;
- 3 – облицовка;
- 4 – крышка задняя;
- 5 – вкладыш;
- 6 – втулка;

Рисунок 1.2 – Крышка задняя

### **1.2.3 Конструкция узла стыковки**

Узел стыковки (рисунок 1.3), расположенный на внешней стороне переднего дна, предназначен для «попарно-последовательного» соединения двигателей и состоит из штыря 1 с конусным хвостовиком, на котором шарнирно закреплена резьбовая стыковочная втулка 2 и заглушка 3. Стыковочная втулка соединяет два двигателя между собой на направляющих и удерживает их между собой в состыкованном состоянии при запуске и в полете.

Стыковочная втулка представляет собой цилиндр с резьбой и канавкой под шарики. Шарики 4 предназначены для передачи усилия тяги первого двигателя, а также для облегчения вращения при стыковке.



- 1 – штырь;
- 2 – втулка стыковочная;
- 3 – заглушка;
- 4 – шарик.

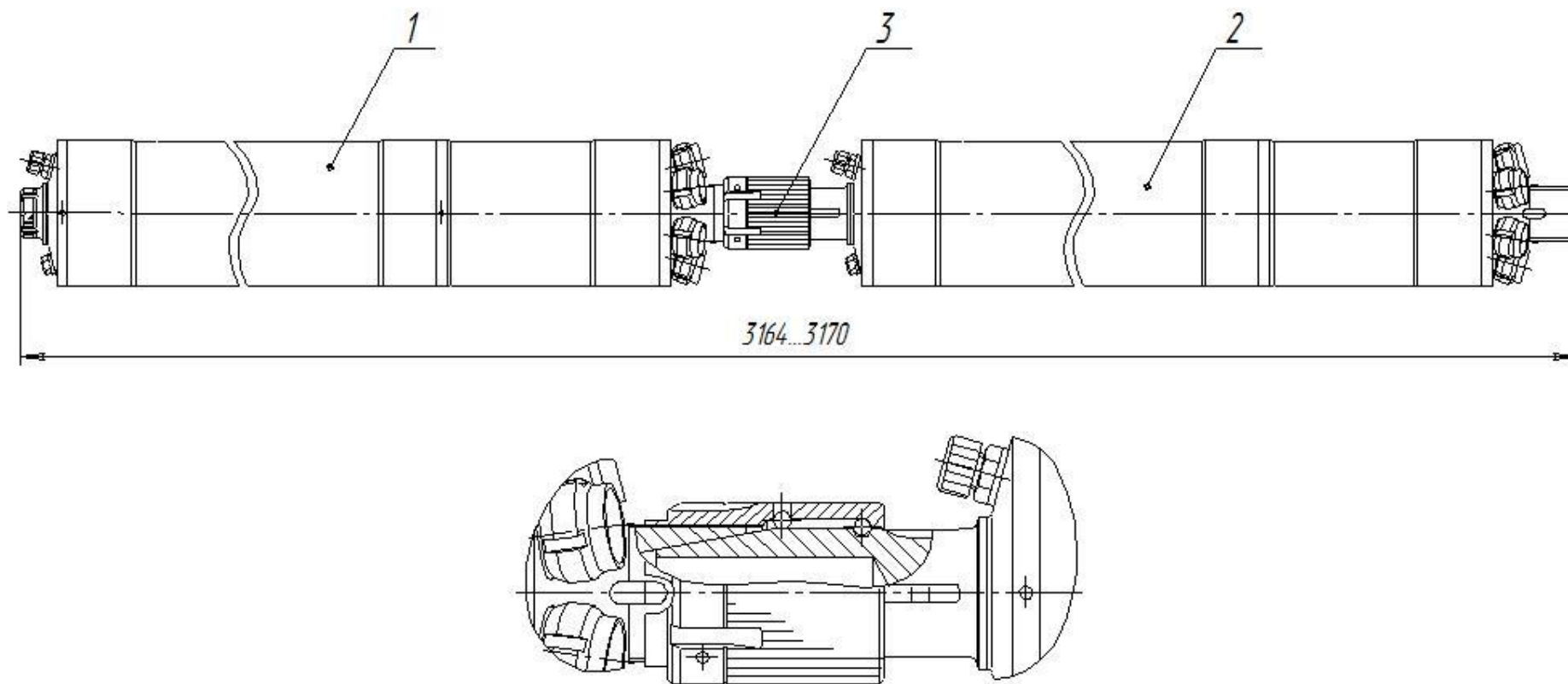
Рисунок 1.3 – Узел стыковки

#### **1.2.4 Сборка двух двигателей**

С целью увеличения дальности подачи удлиненного заряда разминирования и увеличения длины прохода в минном поле, два двигателя могут быть «попарно-последовательно» состыкованы между собой (рисунок 1.4) с помощью узла стыковки.

На торце стыковочной втулки имеется цилиндрический выступ в виде тонкостенного кольца, кромка которого вдавливается при стыковке в один из двух пазов крышки задней переднего двигателя (при использовании варианта соединения двух двигателей в тандем, либо с детонирующим зарядом в спарке двигателей), что обеспечивает жесткое скрепление двух двигателей и стопорит стыковочную втулку от самоотвинчивания.

При необходимости расстыковки двигателей вдавленная часть выступа отгибается, втулка отвинчивается и двигатели расстыковываются.



- 1 – первый двигатель;
- 2 – второй двигатель;
- 3 – втулка стыковочная.

Рисунок 1. – Парно-параллельное соединение двигателей

### 1.3 Выбор твердого ракетного топлива

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

В настоящее время в ракетной технике применяются два основных вида ТРТ: баллиститное и смесевое.

Выбор ТРТ для проектируемого заряда осуществлялся на основе следующих критериев:

- низкая скорость горения топлива;
- высокие энергитические характеристики;
- высокая плотность;
- температурный диапазон эксплуатации;
- прочностные характеристики топлива;
- сохраняемость свойств в течении гарантийного срока хранения в

условиях эксплуатационных воздействий.

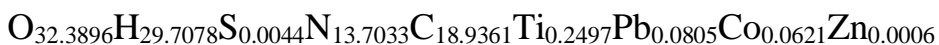
Требования, предъявляемые к РДТТ по комплексу массово-энергетических, баллистических и эксплуатационных характеристик, определяют использование баллиститного топлива с потребными значениями удельного импульса ( $\sim 2800$  м/с) и плотности ( $\sim 1700$  кг/м<sup>3</sup>), скоростью горения  $u = 7 \div 16$  мм/с, работоспособного в широком температурном диапазоне эксплуатации (от минус 50°C до плюс 50°C)

Выбор баллиститного топлива также обусловлен экономическими характеристиками и производится из стоимости производства одного одного заряда ТРТ.

Для реализации условий ТЗ и отработки для данного РДТТ предлагается оценить ВБП двигателя на следующих составах БТРТ:

#### 1.3.1 Состав №1

Условная химическая формула:



$$\Delta H_{298} = -1810 \text{ кДж/кг};$$

Аналитическая зависимость скорости горения выбранного топлива при температуре 20°C и диапазоне давлений от 6 до 18 МПа описывается следующим выражением:

$$u = 7,924 \cdot p^{0,4};$$

Основные характеристики топлива представлены в таблице 1.3.1

Таблица 1.3.1 – Основные характеристики топлива (состав №1)

| Наименование характеристики   | Значение             |
|---|----------------------|
| Плотность, $\rho_t$ , кг/м <sup>3</sup>   | 1680                 |
| Коэффициент обеспеченности окислителем  | 0,610                |
| Удельная теплота горения, $Q_{ж}$ , кДж/кг  | 4190                 |
| Тропиловый эквивалент   | 1,05                 |
| Теплоемкость топлива, $c_t$ , кДж/(кг·К) при 293 К                                      | 1,34                 |
| Теплопроводность топлива, $\lambda_t$ , Вт/(м·К) при 293 К                              | 0,265                |
| Температуропроводность топлива, $a_t$ , м <sup>2</sup> /с при 293 К                     | $1,17 \cdot 10^{-7}$ |
| Температура вспышки топлива, $T_{всп}$ , К  | 446                  |
| Температурный коэффициент линейного расширения топлива, $\alpha_{л.р.}$ , 1/К при 293 К | $1,23 \cdot 10^{-4}$ |

### 1.3.2 Состав №2

Условная химическая формула:



$$\Delta H_{298} = -1703,6 \text{ кДж/кг};$$

Скорость горения состава №2 приведена в таблице 1.2.2.

Таблица 1.3.2 – Скорость горения топлива (состав №2)

| Температура,<br>К (°C) | Скорость горения, мм/с, при давлении, МПа |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 3,92                                      | 5,88 | 7,85 | 9,81 | 11,76 | 13,72 | 15,68 | 17,65 |
| 323 (50)               | 12,3                                      | 15   | 16,8 | 18,2 | 19,3  | 20,7  | 21,1  | 21,9  |
| 293 (20)               | 11  | 14   | 15   | 15,6 | 17,6  | 19    | 19,8  | 20,6  |
| 233 (-40)              | 10,6                                      | 12,8 | 14,6 | 15,6 | 16,7  | 17,5  | 18,4  | 18,7  |

Аналитическая зависимость скорость горения в виде  $U=U_1p^v$  выбранного топлива при различных температурах представлена в таблице 1.2.3

Таблица 1.3.3 – Аналитическая зависимость скорости горения ТРТ (Состав №2) от давления при различных температурах, выраженная в виде  $U=U_1p^v$ .

| Температура испытаний, К(°С) | Диапазон давлений, МПа | Эмпирическая формула скорости горения, $U=U_1p^v$ , мм/с |
|------------------------------|------------------------|--|
| 323 (50)                     | От 5,88 до 9,81        | $U=3,18p^{0,38}$   |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=3,38p^{0,36}$   |
|                              | От 5,88 до 13,73       | $U=3,26p^{0,37}$   |
|                              | От 5,88 до 15,68       | $U=3,51p^{0,355}$  |
| 293 (20)                     | От 5,88 до 9,81        | $U=5,86p^{0,21}$   |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=3,92p^{0,307}$  |
|                              | От 5,88 до 13,73       | $U=3,17p^{0,356}$  |
|                              | От 5,88 до 15,68       | $U=2,988p^{0,37}$  |
| 233 (-40)                    | От 5,88 до 9,81        | $U=2,6p^{0,39}$  |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=2,74p^{0,37}$   |
|                              | От 5,88 до 13,73       | $U=2,9p^{0,36}$  |
|                              | От 5,88 до 15,68       | $U=2,95p^{0,361}$  |

Основные характеристики топлива представлены в таблице 1.3.4



Таблица 1.3.4 – Основные характеристики топлива (состав №2)

| Наименование характеристики   | Значение             |
|---|----------------------|
| Плотность, $\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>                                   | 1700                 |
| Коэффициент обеспеченности окислителем                                    | 0,649                |
| Удельная теплота горения, $Q_{ж}$ , кДж/кг                                | 4602                 |
| Тропиловый эквивалент   | 1,1                  |
| Теплоемкость топлива, $c_T$ , кДж/(кг·К) при 293 К                        | 0,421                |
| Коэффициент линейного расширения топлива, $\alpha_{л.р.}$ , 1/К при 293 К | $1,22 \cdot 10^{-4}$ |

### 1.3.3 Опытные данные

Промежуточные результаты расчета ВБП показали невыполнение требований технического задания при использовании паспортных данных рассмотренных составов (время работы РДТТ меньше требований ТЗ). Скорости горения состава принимаются из результатов опытов по сжиганию навесок состава №2 в установке постоянного давления. Дальнейшие расчеты производятся на основании опытных данных.

Таблица 1.3.5 – Скорости горения (опытные)

| Температура | Скорость горения, мм/с, при давлении, МПа (атм) |              |              |              |               |                |                |                |                |
|-------------|---|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|             | 2,02<br>(20)                                    | 3,92<br>(40) | 5,88<br>(60) | 7,85<br>(80) | 9,81<br>(100) | 11,76<br>(120) | 13,72<br>(140) | 15,68<br>(160) | 17,65<br>(180) |
| 293 (20)    | 5,66  | 8,54         | 10,94        | 12,71        | 14,09         | 15,09          | 15,94          | -              | -              |
| 323 (50)    | 6,07  | 9,08         | 11,62        | 13,62        | 15,10         | 16,36          | 17,30          | -              | -              |
| 233 (-40)   | 6,11  | 9,30         | 12,14        | 14,18        | 16,13         | 17,29          | 18,37          | 19,63          | 21,02          |

Аналитическая зависимость скорость горения в виде  $U=U_1 p^v$  выбранного топлива (состав №2) при различных температурах представлена в таблице 1.3.6

Таблица 1.3.6 – Аналитическая зависимость скорости горения ТРТ (Состав №2, опытные данные) от давления при различных температурах, выраженная в виде  $U=U_1p^\nu$ .

| Температура испытаний, К(°С) | Диапазон давлений, МПа | Эмпирическая формула скорости горения, $U=U_1p^\nu$ , мм/с |
|------------------------------|------------------------|--|
| 293 (20)                     | От 2,02 до 5,88        | $U=1,035p^{0,58}$  |
|                              | От 5,88 до 9,81        | $U=1,418p^{0,514}$   |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=1,556p^{0,49}$  |
|                              | От 9,81 до 13,72       | $U=2,988p^{0,37}$  |
| 323 (50)                     | От 5,88 до 9,81        | $U=3,18p^{0,38}$   |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=3,38p^{0,36}$   |
|                              | От 5,88 до 13,73       | $U=3,26p^{0,37}$   |
|                              | От 5,88 до 15,68       | $U=3,51p^{0,355}$  |
| 233 (-40)                    | От 5,88 до 9,81        | $U=2,6p^{0,39}$  |
|                              | От 5,88 до 11,76       | $U=2,74p^{0,37}$   |
|                              | От 5,88 до 13,73       | $U=2,9p^{0,36}$  |
|                              | От 5,88 до 15,68       | $U=2,95p^{0,361}$  |

Термодинамические расчёты проводятся по известной условной химической формуле топлива и при заданной степени расширения в программном комплексе «Астра». В результате расчета (приложение А) вычислены следующие параметры:  $T_k=2818$  К;  $R_k=338,917$ ;  $k=1,222$ .

#### 1.4 Выбор конструктивной формы заряда

Выбор формы заряда непосредственно влияет на внутренние и внешние баллистические характеристики РДТТ, а также на соответствие параметров РДТТ требованиям ТЗ.

Основные требования к заряду ТТ заключаются в следующем:

- форма заряда должна обеспечивать заданное изменение тяги или внутрикамерного давления по времени;
- форма должна обеспечивать оптимальное удлинение корпуса РДТТ;
- форма должна обеспечивать оптимальное расположение узлов воспламенения РДТТ;
- форма заряда должна быть технологичной;
- коэффициент заполнения камеры топливом должен быть максимальным.

Для обеспечения вышеприведенных требований РДТТ выбраны форма заряда и геометрические параметры. Вкладной заряд представляет собой бронированную по наружной и торцевым поверхностям одноканальную пашку. Часть канала выполнена в форме «звезда». Так же для обеспечения ТЗ в цилиндрических участках канала предусмотрены компенсаторы.

Заряды с профильными каналами типа «звезда» из-за догорания остатков топлива после выхода лучей «звезды» на поверхность корпуса имеют в конце работы пологий спад давления и увеличенное соотношение  $p_{max}/p_{ср}$  для полного времени работы. Заряды с профильными каналами формируют неравномерный по сечению поток ПС, приводящий, особенно при высокой температуре ПС, к искажению тракта сопла. Горение такого типа заряда происходит только по внутренней поверхности, это создает хорошие условия для предохранения КС РДТТ от перегрева.

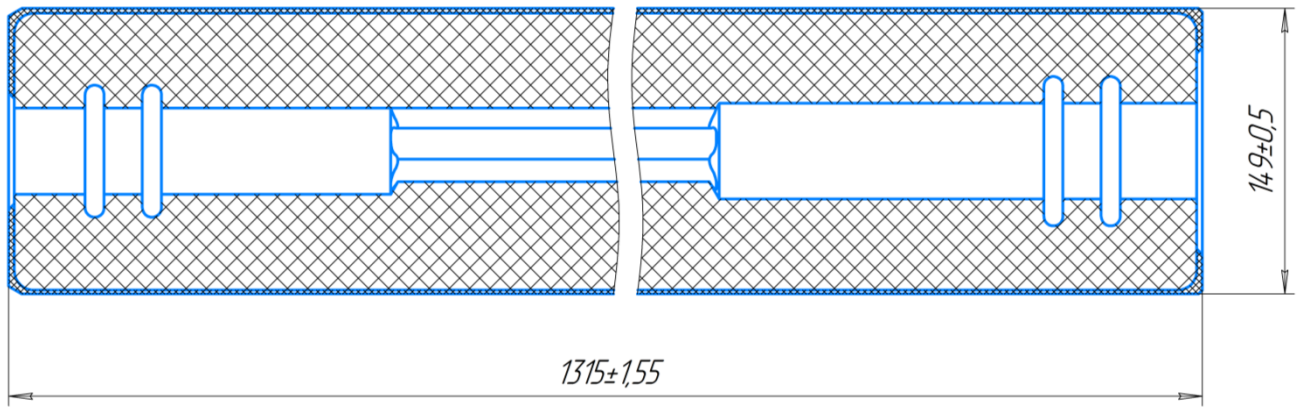


Рис. 1.5 – Конструктивная форма заряда.

### 1.5 Расчет внутрибаллистических характеристик РДТТ

Для получения основных параметров РДТТ необходимо произвести расчёт внутрибаллистических параметров.

В результате термодинамического расчёта топлива получены значения:

- равновесной температуры продуктов сгорания  $T_K = 2818 \text{ K}$ ,
- показателя адиабаты  $k = 1,222$ ;
- газовая постоянная  $R = 338,917 \text{ Дж/к} \cdot \text{Кг}$ .

Так же зададимся следующими значениями:

- коэффициент, учитывающий потери энергии на нагрев стенок КС и на неполноту сгорания твердого топлива –  $\chi = 0,95$ ;
- коэффициент потерь расхода сопла –  $\varphi_c = 0,96$ ;
- диаметр критического сечения  $d_{кр} = 17,5 \text{ мм}$ ; (соответствует прототипу)

По указанным в задании на проект данным определяются начальные газодинамические параметры.

$$A_K = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1}} = \left( \frac{2}{1,222+1} \right)^{\frac{1}{1,222-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,222}{1,222+1}} = 0,652;$$

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]};$$

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

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

Полученные ранее значения используются для расчёта давления:

$$p_{ki} = \left[ \frac{F_{zi} \cdot \rho_m \cdot \left( \frac{u_1}{98066,5} \right) \cdot \sqrt{\chi \cdot R \cdot T_k}}{\varphi_c \cdot F_{kpi} \cdot A_k} \right]^{\frac{1}{1-\nu}}.$$

Скорость горения вычисляем по формуле:

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

Значение времени работы при данной величине сгоревшего свода определяется следующим образом:

$$t_i = t_{i-1} + \frac{2,5}{u_{i-1}}.$$

Значения тяги вычисляем по формуле:

$$R_i = \varphi_1 \cdot \varphi_c \cdot p_{ki} \cdot F_{кр} \frac{f(\lambda_a) - \frac{p_h}{p_{ki}}}{q(\lambda_a)};$$

Действительное значение тяги численно равно произведению модуля тяги на  $\cos(15^\circ)$  в виду конструктивного расположения сопл.

Полученные результаты при температурах  $-40^\circ\text{C}$ ,  $+40^\circ\text{C}$ ,  $+50^\circ\text{C}$  приведены в таблицах 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3

Таблица 1.5.1 - Внутрибаллистические параметры в зависимости от величины сгоревшего свода при Т= минус 40°С

| е,<br>мм | F <sub>г</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>к</sub> , МПа | U <sub>г</sub> ,<br>мм/с | λ     | f(λ)  | q(λ)  | Модуль тяги R,<br>кН | R*cos 15°,<br>кН | t <sub>р</sub> , с | I <sub>тяги</sub> <sup>Σ</sup> , Н*с |
|----------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 0        | 224818                           | 2,68                 | 6,648                    | 2,127 | 0,368 | 0,228 | 5,087                | 4,909            | 0,000              | 0,000                                |
| 2,5      | 244878,6                         | 3,31                 | 7,526                    | 2,174 | 0,321 | 0,196 | 6,414                | 6,189            | 0,376              | 2086,697                             |
| 5        | 258174                           | 3,77                 | 8,126                    | 2,203 | 0,295 | 0,179 | 7,395                | 7,136            | 0,708              | 2213,176                             |
| 7,5      | 284984,8                         | 4,85                 | 9,477                    | 2,255 | 0,250 | 0,149 | 9,751                | 9,410            | 1,016              | 2545,191                             |
| 10       | 304382,2                         | 5,75                 | 10,505                   | 2,287 | 0,223 | 0,131 | 11,713               | 11,303           | 1,280              | 2732,084                             |
| 12,5     | 321099,2                         | 6,44                 | 11,195                   | 2,309 | 0,206 | 0,121 | 13,245               | 12,781           | 1,518              | 2865,893                             |
| 15       | 340118,6                         | 7,26                 | 11,921                   | 2,330 | 0,190 | 0,110 | 15,081               | 14,553           | 1,741              | 3051,981                             |
| 17,5     | 359473,8                         | 8,15                 | 12,664                   | 2,351 | 0,175 | 0,101 | 17,080               | 16,482           | 1,951              | 3254,117                             |
| 20       | 377460,8                         | 8,88                 | 13,171                   | 2,365 | 0,165 | 0,095 | 18,721               | 18,065           | 2,148              | 3409,965                             |
| 22,5     | 394043,8                         | 9,61                 | 13,656                   | 2,379 | 0,156 | 0,090 | 20,377               | 19,664           | 2,338              | 3580,766                             |
| 25       | 409427                           | 10,27                | 14,078                   | 2,390 | 0,149 | 0,085 | 21,859               | 21,094           | 2,521              | 3730,758                             |
| 27,5     | 426196,8                         | 10,95                | 14,428                   | 2,400 | 0,142 | 0,081 | 23,424               | 22,604           | 2,699              | 3880,155                             |
| 30       | 443400,4                         | 11,68                | 14,782                   | 2,410 | 0,136 | 0,077 | 25,074               | 24,196           | 2,872              | 4054,581                             |
| 32,5     | 460796,4                         | 12,37                | 15,089                   | 2,419 | 0,131 | 0,074 | 26,670               | 25,737           | 3,041              | 4222,335                             |
| 35       | 454929,2                         | 12,17                | 15,017                   | 2,417 | 0,132 | 0,075 | 26,204               | 25,287           | 3,207              | 4227,061                             |
| 37,5     | 465522,4                         | 12,57                | 15,173                   | 2,422 | 0,129 | 0,073 | 27,123               | 26,173           | 3,373              | 4283,562                             |
| 40       | 453084,4                         | 12,09                | 14,979                   | 2,416 | 0,133 | 0,075 | 26,022               | 25,111           | 3,538              | 4224,949                             |
| 42,5     | 461146,6                         | 12,39                | 15,095                   | 2,420 | 0,131 | 0,074 | 26,704               | 25,769           | 3,705              | 4245,846                             |
| 45       | 468789,6                         | 12,71                | 15,231                   | 2,423 | 0,128 | 0,073 | 27,437               | 26,477           | 3,870              | 4326,468                             |
| 47,5     | 411636                           | 10,36                | 14,124                   | 2,391 | 0,148 | 0,085 | 22,063               | 21,291           | 4,035              | 3920,143                             |
| 50       | 208396,3                         | 2,23                 | 5,955                    | 2,082 | 0,414 | 0,259 | 4,135                | 3,991            | 4,212              | 2237,452                             |
| 52,5     | 51486,98                         | 0,10                 | 0,966                    | 0,306 | 1,048 | 0,471 | 0,028                | 0,027            | 4,631              | 843,314                              |
| 55       | 0                                | 0,00                 | 0,000                    | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000                | 0,000            | 5,149              | 7,027                                |

Таблица 1.5.2 - Внутрибаллистические параметры в зависимости от величины сгоревшего свода при T= плюс 20°С

| е,<br>мм | F <sub>г</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>к</sub> , МПа | U <sub>г</sub> ,<br>мм/с | λ     | f(λ)  | q(λ)  | Модуль тяги R,<br>кН | R*cos 15°,<br>кН | t <sub>р</sub> , с | I <sub>тяги</sub> <sup>Σ</sup> , Н*с |
|----------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 0        | 224818                           | 3,14                 | 7,767                    | 2,162 | 0,333 | 0,204 | 6,040                | 6,040            | 0,000              | 0,000                                |
| 2,5      | 244878,6                         | 3,84                 | 8,740                    | 2,207 | 0,292 | 0,176 | 7,555                | 7,555            | 0,322              | 2111,309                             |
| 5        | 258174                           | 4,41                 | 9,501                    | 2,235 | 0,266 | 0,159 | 8,780                | 8,780            | 0,608              | 2254,371                             |
| 7,5      | 284984,8                         | 5,67                 | 11,074                   | 2,285 | 0,225 | 0,133 | 11,547               | 11,547           | 0,871              | 2580,777                             |
| 10       | 304382,2                         | 6,52                 | 11,936                   | 2,311 | 0,204 | 0,120 | 13,413               | 13,413           | 1,097              | 2718,817                             |
| 12,5     | 321099,2                         | 7,34                 | 12,742                   | 2,332 | 0,188 | 0,110 | 15,246               | 15,246           | 1,306              | 2896,285                             |
| 15       | 340118,6                         | 8,34                 | 13,670                   | 2,355 | 0,172 | 0,100 | 17,492               | 17,492           | 1,502              | 3099,184                             |
| 17,5     | 359473,8                         | 9,29                 | 14,455                   | 2,373 | 0,160 | 0,092 | 19,632               | 19,632           | 1,685              | 3275,770                             |
| 20       | 377460,8                         | 10,17                | 15,074                   | 2,388 | 0,150 | 0,086 | 21,634               | 21,634           | 1,858              | 3443,638                             |
| 22,5     | 394043,8                         | 10,89                | 15,474                   | 2,399 | 0,143 | 0,082 | 23,269               | 23,269           | 2,024              | 3593,255                             |
| 25       | 409427                           | 11,65                | 15,941                   | 2,410 | 0,136 | 0,078 | 25,020               | 25,020           | 2,186              | 3764,204                             |
| 27,5     | 426196,8                         | 12,50                | 16,480                   | 2,421 | 0,130 | 0,074 | 26,969               | 26,969           | 2,343              | 3933,913                             |
| 30       | 443400,4                         | 13,30                | 16,854                   | 2,431 | 0,124 | 0,070 | 28,808               | 28,808           | 2,494              | 4082,650                             |
| 32,5     | 460796,4                         | 14,13                | 17,226                   | 2,440 | 0,119 | 0,067 | 30,715               | 30,715           | 2,643              | 4260,103                             |
| 35       | 454929,2                         | 13,85                | 17,101                   | 2,437 | 0,121 | 0,068 | 30,067               | 30,067           | 2,788              | 4256,209                             |
| 37,5     | 465522,4                         | 14,36                | 17,326                   | 2,442 | 0,118 | 0,066 | 31,241               | 31,241           | 2,934              | 4324,373                             |
| 40       | 453084,4                         | 13,76                | 17,062                   | 2,436 | 0,121 | 0,068 | 29,864               | 29,864           | 3,078              | 4254,146                             |
| 42,5     | 461146,6                         | 14,15                | 17,233                   | 2,440 | 0,119 | 0,067 | 30,754               | 30,754           | 3,225              | 4285,578                             |
| 45       | 468789,6                         | 14,52                | 17,395                   | 2,444 | 0,117 | 0,066 | 31,607               | 31,607           | 3,370              | 4364,885                             |
| 47,5     | 411636                           | 11,76                | 16,008                   | 2,411 | 0,135 | 0,077 | 25,276               | 25,276           | 3,513              | 3944,508                             |
| 50       | 208396,3                         | 2,62                 | 6,995                    | 2,121 | 0,374 | 0,232 | 4,945                | 4,945            | 3,670              | 2277,254                             |
| 52,5     | 51486,98                         | 0,13                 | 1,238                    | 0,728 | 1,198 | 0,916 | 0,086                | 0,086            | 4,027              | 867,615                              |
| 55       | 0                                | 0,00                 | 0,000                    | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000                | 0,000            | 4,835              | 33,446                               |

Таблица 1.5.3 - Внутрибаллистические параметры в зависимости от величины сгоревшего свода при T= плюс 50°С

| е,<br>мм | F <sub>г</sub> , мм <sup>2</sup> | P <sub>к</sub> , МПа | U <sub>г</sub> ,<br>мм/с | λ     | f(λ)  | q(λ)  | Модуль тяги R,<br>кН | R*cos 15°,<br>кН | t <sub>р</sub> , с | I <sub>тяги</sub> <sup>Σ</sup> , Н*с |
|----------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 0        | 224818                           | 3,30                 | 8,165                    | 2,174 | 0,322 | 0,197 | 6,725                | 6,490            | 0,000              | 0,000                                |
| 2,5      | 244878,6                         | 4,10                 | 9,312                    | 2,220 | 0,279 | 0,168 | 8,533                | 8,235            | 0,306              | 2336,013                             |
| 5        | 258174                           | 4,81                 | 10,355                   | 2,253 | 0,251 | 0,150 | 10,171               | 9,815            | 0,575              | 2510,797                             |
| 7,5      | 284984,8                         | 6,30                 | 12,325                   | 2,304 | 0,209 | 0,123 | 13,607               | 13,131           | 0,816              | 2870,513                             |
| 10       | 304382,2                         | 7,27                 | 13,315                   | 2,330 | 0,190 | 0,110 | 15,879               | 15,323           | 1,019              | 2990,566                             |
| 12,5     | 321099,2                         | 8,16                 | 14,178                   | 2,351 | 0,175 | 0,101 | 17,992               | 17,363           | 1,207              | 3179,760                             |
| 15       | 340118,6                         | 9,38                 | 15,368                   | 2,375 | 0,159 | 0,091 | 20,897               | 20,166           | 1,383              | 3428,789                             |
| 17,5     | 359473,8                         | 10,39                | 16,229                   | 2,392 | 0,148 | 0,085 | 23,309               | 22,494           | 1,546              | 3595,629                             |
| 20       | 377460,8                         | 11,24                | 16,722                   | 2,404 | 0,140 | 0,080 | 25,353               | 24,466           | 1,700              | 3748,104                             |
| 22,5     | 394043,8                         | 12,05                | 17,169                   | 2,415 | 0,133 | 0,076 | 27,298               | 26,342           | 1,849              | 3935,753                             |
| 25       | 409427                           | 12,69                | 17,388                   | 2,423 | 0,128 | 0,073 | 28,833               | 27,824           | 1,995              | 4086,746                             |
| 27,5     | 426196,8                         | 13,55                | 17,840                   | 2,433 | 0,123 | 0,069 | 30,923               | 29,841           | 2,139              | 4295,737                             |
| 30       | 443400,4                         | 14,73                | 18,565                   | 2,446 | 0,115 | 0,065 | 33,794               | 32,611           | 2,279              | 4534,516                             |
| 32,5     | 460796,4                         | 15,91                | 19,288                   | 2,457 | 0,109 | 0,061 | 36,656               | 35,373           | 2,413              | 4743,486                             |
| 35       | 454929,2                         | 15,50                | 19,044                   | 2,454 | 0,111 | 0,063 | 35,678               | 34,429           | 2,543              | 4687,872                             |
| 37,5     | 465522,4                         | 16,23                | 19,484                   | 2,460 | 0,108 | 0,060 | 37,454               | 36,143           | 2,674              | 4800,227                             |
| 40       | 453084,4                         | 15,38                | 18,967                   | 2,452 | 0,112 | 0,063 | 35,373               | 34,135           | 2,803              | 4672,295                             |
| 42,5     | 461146,6                         | 15,93                | 19,302                   | 2,458 | 0,109 | 0,061 | 36,715               | 35,430           | 2,934              | 4750,808                             |
| 45       | 468789,6                         | 16,61                | 19,731                   | 2,464 | 0,106 | 0,059 | 38,368               | 37,025           | 3,064              | 4862,377                             |
| 47,5     | 411636                           | 12,80                | 17,448                   | 2,425 | 0,128 | 0,072 | 29,105               | 28,086           | 3,191              | 4274,581                             |
| 50       | 208396,3                         | 2,72                 | 7,266                    | 2,130 | 0,365 | 0,225 | 5,436                | 5,246            | 3,334              | 2474,560                             |
| 52,5     | 51486,98                         | 0,11                 | 1,056                    | 0,505 | 1,117 | 0,722 | 0,053                | 0,052            | 3,678              | 944,422                              |
| 55       | 0                                | 0,00                 | 0,000                    | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000                | 0,000            | 4,151              | 12,654                               |



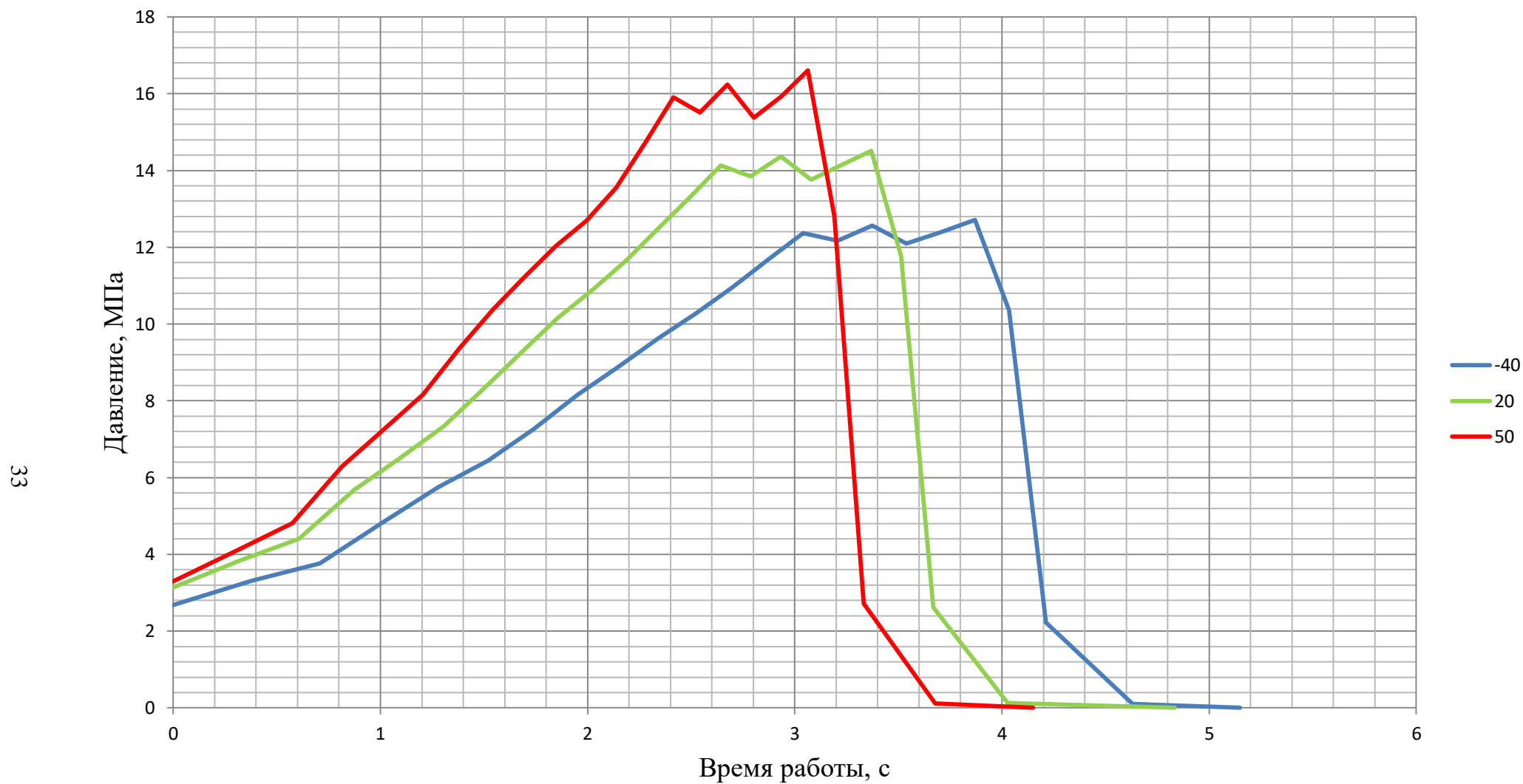


Рис. 1.6 Зависимость внутрикамерного давления  $p_k$  от времени работы  $t_p$

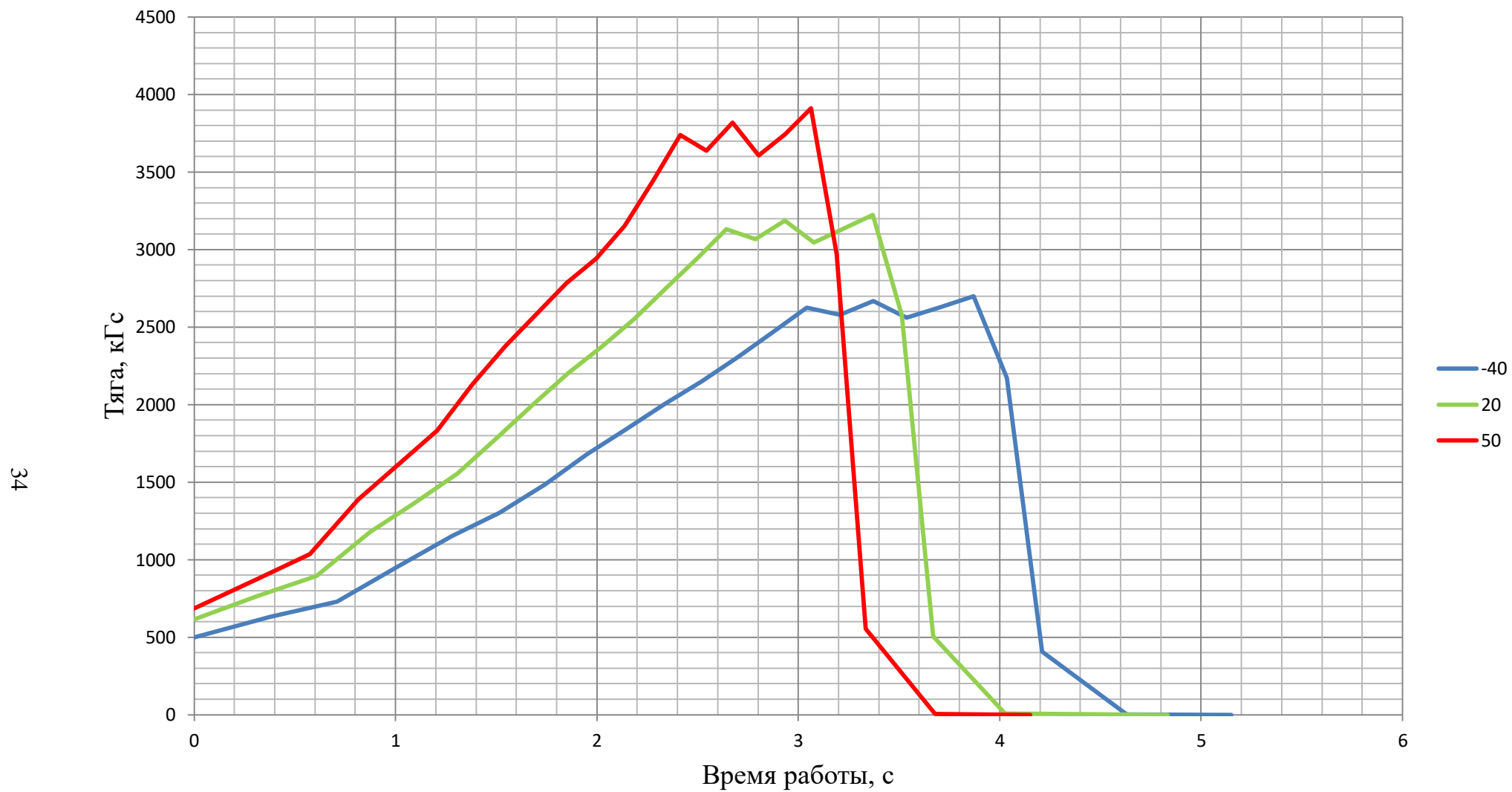


Рис. 1.7 Зависимость тяги двигателя R от времени работы  $t_p$

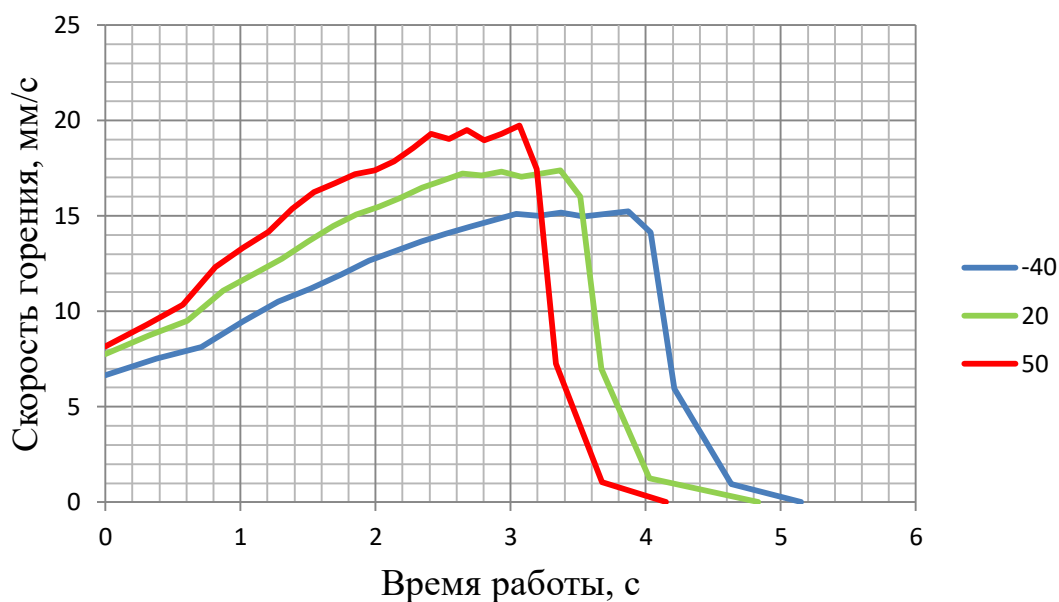


Рис. 1.8 Зависимость скорости горения топлива от времени работы  $t_p$

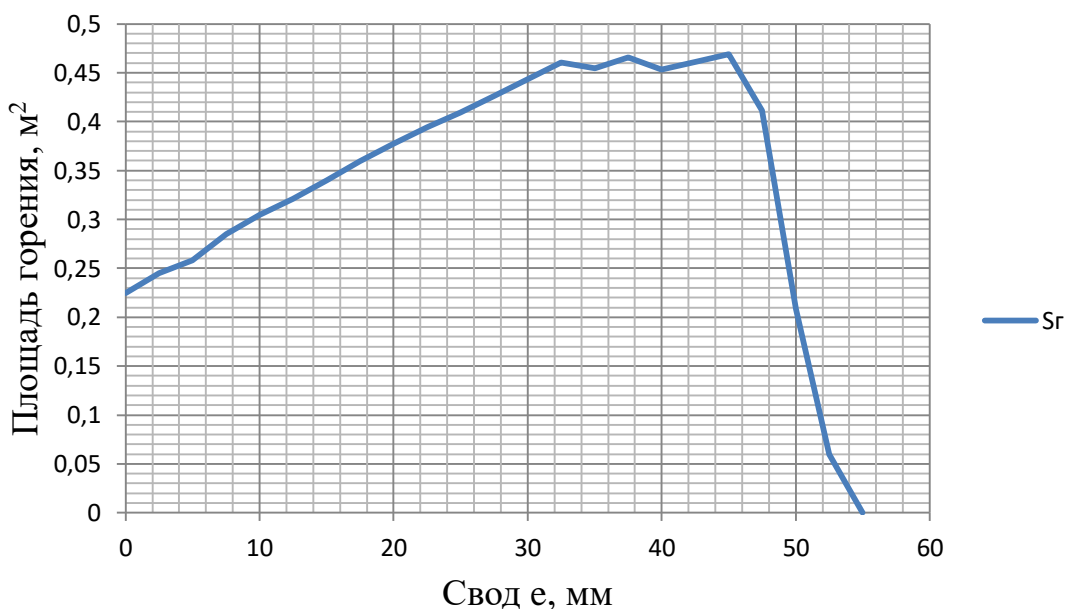


Рис. 1.9 Зависимость площади горения заряда от величины сгоревшего свода

## 1.6 Расчет отклонений и оценка предельных значений внутрибаллистических характеристик РДТТ

Данный расчет позволяет определить предельные значения ВБП РДТТ, вызванные случайными и неслучайными отклонениями параметров РДТТ от номинальных. Расчет выполнен по методике [5].

### 1.6.1 Исходные данные

а) Характеристики заряда:

$$1,034p^{0,579}$$

$$B = 340;$$

$$R_k = 338,917 \text{ (Дж} \cdot \text{кг)} / \text{К};$$

$$\rho_T = 1700 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$T^* = 2818 \text{ К};$$

$$k = 1,222;$$

$$\tau = 4,5 \dots 5,5 \text{ с};$$

### 1.6.2 Случайные отклонения параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда твердого топлива

Относительное случайное отклонение единичной скорости горения, вызванное разбросом технологических режимов и свойств исходного сырья:

$$\delta u_1^{\text{сл1}} = 0,01 \dots 0,04 = 0,03;$$

Относительное случайное отклонение единичной скорости горения, из-за неточности измерения начальной температуры заряда:

$$\delta u_1^{\text{сл2}} = \frac{\Delta u_1}{u_1} = \frac{\partial u_1}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{u_1}$$

$$u_1 = u_1^* \cdot [1 + 0,0014 \cdot (T - 293)]$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial T} = u_1^* \cdot 0,0014$$

$$\begin{aligned} \delta u_1^{\text{сл2}} &= \frac{u_1^* \cdot 0,0014 \cdot \Delta T}{u_1} = \frac{u_1^* \cdot 0,0014 \cdot \Delta T}{u_1^* \cdot (1 + 0,0014 \cdot \Delta T)} = \frac{0,0014 \cdot \Delta T}{1 + 0,0014 \cdot \Delta T} \\ &= \frac{0,0014 \cdot 3}{1 + 0,0014 \cdot 3} = 0,004 \end{aligned}$$

где  $\Delta T$  - неточность измерения начальной температуры заряда,  $T = 3^\circ \dots 5^\circ = 3^\circ$ .

Случайное отклонение единичной скорости горения:

$$\delta u_1^{\text{сл}} = \delta u_1^{\text{сл1}} + \delta u_1^{\text{сл2}} = 0,03 + 0,004 = 0,034$$

Случайное отклонение площади поверхности горения заряда твердого топлива:

$$\delta F_r^{\text{сл}} = 0,005 \dots 0,01 = 0,008$$

Случайное отклонение плотности твердого топлива из-за отклонений в технологических режимах при изготовлении заряда, а также из-за изменений химического состава топлива в пределах допуска:

$$\delta \rho_T^{\text{сл}} = 0,005 \dots 0,01 = 0,006$$

Относительное случайное отклонение энергетической характеристики твердого топлива, вызванное разбросом технологических режимов и свойств исходного сырья:

$$\delta(RT_K)^{\text{сл}1} = 0,005 \dots 0,015 = 0,0091$$

Относительное случайное отклонение комплекса  $(RT_K)$  из-за неточности измерения начальной температуры заряда:

$$\delta(RT_K)^{\text{сл}2} = m \cdot \Delta T = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 3 = 0,0009$$

$$\text{где } m = 3 \cdot 10^{-4}$$

Случайное отклонение энергетической характеристики твердого топлива:

$$\delta(RT_K)^{\text{сл}} = \delta(RT_K)^{\text{сл}1} + \delta(RT_K)^{\text{сл}2} = 0,0091 + 0,0009 = 0,01$$

Случайное отклонение коэффициента тепловых потерь, вызванное изменениями толщины стенок камеры сгорания, условий теплопередачи от газа к стенкам камеры и т.п.:

$$\delta \chi^{\text{сл}} = 0,002 \dots 0,03 = 0,002$$

Случайное отклонение коэффициента расхода сопла, вызванное изменениями геометрических размеров и состояния поверхности сопла в пределах поля допуска на изготовление:

$$\delta \varphi_c^{\text{сл}} = 0,002 \dots 0,004 = 0,002$$

Случайный разброс площади критического сечения сопла из-за допуска на изготовление:

$$\Delta d - \text{половина поля допуска на } d^*, d^* = 17,5 \text{ мм, допуск H14,}$$

$$\Delta d = \frac{0,52}{2} = 0,26 \text{ (мм)}$$

$$\delta F_{\text{кр}}^{\text{сл1}} = \frac{(d^* + \Delta d)^2 - d^{*2}}{d^{*2}} \cong \frac{(17,76)^2 - (17,5)^2}{(17,5)^2} = 0,029$$

Случайное отклонение площади критического сечения:

$$\delta F_{\text{кр}}^{\text{сл}} = 0,029$$

Случайное отклонение площади среза сопла, вызванное изменениями диаметра сопла на срезе в пределах допуска на изготовление:

$$\delta F_{\text{а}}^{\text{сл}} = 0,03 \dots 0,04 = 0,04$$

Случайное отклонение комплекса  $\Phi[p_{\text{а}}/p_{\text{к}}]$ :

$$f_1^* = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,222}{1,222 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{0,098}{16,61} \right)^{\frac{1,222-1}{1,222}} \right]} = 2,584$$

$$f_4^* = \frac{\left( \frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{f_1^{*2} + \left( \frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{\left( \frac{0,098}{16,61} \right)^{\frac{1,222-1}{1,222}}}{2,584^2 + \left( \frac{0,098}{16,61} \right)^{\frac{1,222-1}{1,222}}} = 0,056$$

Для  $f_4^* = 0,056$ . Тогда

$$\delta \Phi^{\text{сл}} = (-\delta \varphi_{\text{с}}^{\text{сл}} - \delta F_{\text{кр}}^{\text{сл}} + \delta F_{\text{а}}^{\text{сл}}) \cdot f_4^* = (-0,002 - 0,029 + 0,04) \cdot$$

$$0,056 = 0,0005.$$

$$\bar{\Phi}_{\text{сл}} = \delta \Phi_{\text{сл}} + 1 = 0,0005 + 1 = 1,0005.$$

Предельное отклонение комплекса  $\Phi[p_{\text{а}}/p_{\text{к}}]$ :

$$\begin{aligned} \delta \Phi_{\text{пред}}^{\text{сл}} &= \pm f_4^* \cdot \sqrt{(\delta \varphi_{\text{с}}^{\text{сл}})^2 + (\delta F_{\text{кр}}^{\text{сл}})^2 + (\delta F_{\text{а}}^{\text{сл}})^2} = \\ &= \pm 0,056 \cdot \sqrt{(0,002)^2 + (0,029)^2 + (0,04)^2} = \pm 0,0027. \end{aligned}$$

Предельное отклонение давления в камере сгорания:

$$\begin{aligned}
\delta p_{\text{к пред}}^{\text{сл}} &= \pm \frac{1}{1-\nu} \cdot \left[ (\delta F_{\text{г}}^{\text{сл}})^2 + (\delta \rho_{\text{т}}^{\text{сл}})^2 + (\delta \varphi_{\text{с}}^{\text{сл}})^2 + \left( \frac{\delta \chi^{\text{сл}}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\delta (RT_{\text{к}})^{\text{сл}}}{2} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + (\delta F_{\text{кр}}^{\text{сл}})^2 + (\delta u_1^{\text{сл}})^2 \right]^{0,5} = \\
&= \frac{1}{1-0,579} \\
&\quad \cdot \left[ (0,008)^2 + (0,006)^2 + (0,002)^2 + \left( \frac{0,002}{2} \right)^2 + \left( \frac{0,01}{2} \right)^2 + \right. \\
&\quad \left. + (0,029)^2 + (0,034)^2 \right]^{0,5} = \pm 0,11 .
\end{aligned}$$

Предельное отклонение тяги двигателя:

$$\begin{aligned}
a &= \frac{P^* + p_{\text{н}} \cdot F_{\text{а}}^*}{P^*} = \frac{51150 + 0,098 \cdot 10^6 \cdot 6,949 \cdot 10^{-3}}{51150} = 1,013 \\
b &= \frac{p_{\text{н}} \cdot F_{\text{а}}^*}{P^*} = \frac{0,098 \cdot 10^6 \cdot 6,949 \cdot 10^{-3}}{51150} = 0,013 \\
\delta P_{\text{пред}}^{\text{сл}} &= \pm \left[ a^2 \cdot [(\delta \varphi_{\text{с}}^{\text{сл}})^2 + (\delta p_{\text{к пред}}^{\text{сл}})^2 + (\delta F_{\text{кр}}^{\text{сл}})^2 + (\delta \Phi_{\text{пред}}^{\text{сл}})^2] \right. \\
&\quad \left. + (b \cdot \delta F_{\text{а}}^{\text{сл}})^2 \right]^{0,5} = \\
&= \pm \left[ 1,013^2 \cdot [(0,002)^2 + (0,11)^2 + (0,029)^2 + (0,0027)^2 \right. \\
&\quad \left. + (0,031 \cdot 0,03)^2 \right]^{0,5} = \pm 0,031
\end{aligned}$$

### 1.6.3 Отклонения, вызванные неслучайными отклонениями параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда

Отклонения из-за разных начальных температур заряда

$$\bar{u}_{1\min} = 1 + 0,002(T_{\min} - T_{\text{н}}) = 1 + 0,002(-40 - 20) = 0,88$$

$$\bar{u}_{1\max} = 1 + 0,002(T_{\max} - T_{\text{н}}) = 1 + 0,002(50 - 20) = 1,06$$

$$\delta u_{1\min} = \bar{u}_{1\min} - 1 = 0,88 - 1 = -0,12$$

$$\delta u_{1\max} = \bar{u}_{1\max} - 1 = 1,06 - 1 = 0,06$$

$$\delta p_{\text{ку}}^{\min} = [\bar{u}_{1\min}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = [0,88]^{\frac{1}{1-0,579}} - 1 = -0,262$$

$$\delta p_{\text{ку}}^{\max} = [\bar{u}_{1\max}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 = [1,06]^{\frac{1}{1-0,579}} - 1 = 0,148$$

$$\delta P_u^{min} = \left( [\bar{u}_{1min}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 \right) (1 + b) = -0,262 \cdot 1,013 = -0,265$$

$$\delta P_u^{max} = \left( [\bar{u}_{1max}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 \right) (1 + b) = 0,148 \cdot 1,013 = 0,149$$

Отклонения, вызванные разгаром сопла отсутствуют ( $\nu = 0$ ;  $\Delta \nu = 0$ ):

$$\delta p_{kv} = 0; \delta \dot{m}_v = 0; \delta P_v = 0$$

#### 1.6.4 Предельные отклонения параметров

$$\delta p_{k\Sigma}^{max} = 0,11 + 0,148 = 0,258$$

$$\delta p_{k\Sigma}^{min} = -0,11 - 0,262 = -0,372$$

$$\delta P_{\Sigma}^{max} = 0,031 + 0,149 = 0,18$$

$$\delta P_{\Sigma}^{min} = -0,031 - 0,265 = -0,296$$

#### 1.7 Прочностной расчет корпуса

Цель проектировочного прочностного расчёта состоит в определении толщины стальной обечайки корпуса стартового РДТТ исходя из условия обеспечения прочности стенки при известном давлении в камере.

Допущение: расчёт на прочность корпуса камеры выполняется без учёта краевого эффекта. Это допущение будет учитываться коэффициентом запаса прочности. Принимаем, что камера работает в области упругих деформаций.

В качестве материала для изготовления корпуса двигателя выбирается сталь 30ХГСА ГОСТ 4543 – 2016 с плотностью  $\rho_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$  и предельно допустимым напряжением (пределом пропорциональности)  $[\sigma] = 1078 \text{ МПа}$ .

Камера представляет собой полый цилиндр, с толщиной стенки  $\delta_{ст}$ .

Цилиндрическая часть камеры испытывает от давления газов двусосное напряжённое состояние:

$$\text{- напряжение в окружном направлении } \sigma_{\theta} = \frac{r_k \cdot p_k}{\delta_{ст}};$$

$$\text{- напряжение в осевом направлении } \sigma_{\varphi} = \frac{r_k \cdot p_k}{2 \cdot \delta_{ст}}.$$

Следовательно,  $\sigma_{\theta} = 2 \cdot \sigma_{\varphi}$ .



Число сочетаний между значениями  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_\varphi$  может быть бесчисленным множеством. Поэтому при наличии сложного напряжённого состояния используется теория эквивалентных напряжений, когда двuosное напряжённое состояние приводится к одноосному состоянию. Использование эквивалентных напряжений позволяет уменьшить количество экспериментальных данных и упростить оценку прочности рассчитываемых деталей, работающих при сложном напряжённом состоянии.

Для оценки запаса прочности наружной стенки используем энергетическую теорию прочности, согласно которой  $\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\varphi^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_\varphi}$ ;

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\left(\frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{\delta_{ст}}\right)^2 + \left(\frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{2 \cdot \delta_{ст}}\right)^2 - \frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{\delta_{ст}} \cdot \frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{2 \cdot \delta_{ст}}} = \sqrt{0,75} \cdot \frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{\delta_{ст}} = 0,87 \cdot \frac{p_{к.ст.} \cdot r_k}{\delta_{ст}};$$

$$\sigma_\Sigma < \sigma_\theta$$

В связи с этим можно оценить толщину наружной стенки только по напряжениям в окружном направлении, то есть оболочка камеры может рассматриваться с одноосным напряжением.

Поэтому толщина стенки определяется по следующей формуле

$$\delta_{ст} = \frac{K_{зап} \cdot d_m \cdot P_{кстmax}}{2 \cdot [\sigma]},$$

где  $K_{зап} = 1,3$  - коэффициент запаса прочности,

$d_m = 0,163 \text{ м}$  - диаметр миделя двигателя, наружный диаметр камеры,

$P_{к.ст. max} = 20,89 \text{ МПа}$  - максимальное давление в камере с обеспечением необходимого запаса прочности (данные расчета в подразделе 1.5.3 Предельные отклонения параметров).

Тогда толщина стенки камеры:

$$\delta_{ст} = \frac{K_{зап} \cdot d_m \cdot P_{кстmax}}{2 \cdot [\sigma]} = \frac{1,3 \cdot 0,163 \cdot 20,89}{2 \cdot 1078} = 0,00215(\text{м}) = 2,15(\text{мм})$$

Таким образом, получили толщину стенки камеры, исходя из условия обеспечения прочности, 2,15 мм.

Принимаем  $\delta_{\text{ст}} = 3(\text{мм})$ .

Прочность резьбовых соединений оценивается по следующим зависимостям:

$$F_p = \pi \cdot R^2 \cdot p_k^{\text{max}} = \pi \cdot 0,155^2 \cdot 22,29 = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_p = F_p \cdot k_n \cdot (1 - \chi) = 1,68 \cdot 10^6 \cdot 0,7 \cdot 1,1 = 1,293 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$N = F_{\text{зат}} + F_p = 1,68 \cdot 10^6 + 1,293 \cdot 10^6 = 2,97 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d_1} = \frac{4 \cdot 2,97 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,152} = 163 \cdot 10^6 \text{ МПа};$$

Предел прочности материала крышек и трубы – Сталь 30ХГСА составляет  $1078 \cdot 10^6$  МПа, что обеспечивает нераскрытие стыка с коэффициентом запаса 6,61.

Схема нагружения передней и задней крышек одинаковая.

### **1.8 Выбор и обоснование конструкции воспламенителя**

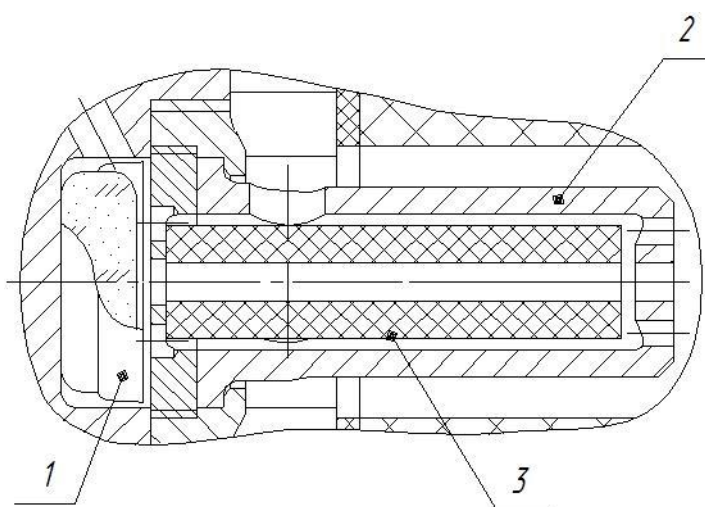
Конструкция воспламенителя выбирается с учетом условий:

- воспламенитель должен располагаться в переднем объеме герметичного корпуса двигателя;
- воспламенитель должен надежно зажигаться от одного пиропатрона типа ДП4-3;
- воспламенитель должен надежно зажигать заряд в заданном ТЗ температурном диапазоне эксплуатации;

Для зажигания заряда принята широко распространенная и проверенная конструкция комбинированного воспламенителя, состоящая из воспламенителя в виде перкалевого картуза с навеской КЗДП-2, размещенного в специальном углублении переднего дна и заряда форкамеры в виде одноканальной небронированной шашки из БРТТ марки БМС, размещенного в форкамере (рисунок 1.6), конструкция которой обеспечивает распределение потоков продуктов сгорания в канал и застойную зону заряда.

Преимуществами применения данной конструкции воспламенителя по сравнению с воспламенителями в виде алюминиевого футляра с навеской дымного пороха являются:

- небольшая масса навески;
- более плавный выход двигателя на режим;
- меньшие нагрузки на заряд при срабатывании воспламенителя;
- повышенная надежность за счет улучшенного подвода тепла продуктов сгорания к воспламененным поверхностям заряда.



- 1 – воспламенитель;
- 2 – форкамера;
- 3 – заряд форкамеры.

Рисунок 1.10 – Узел воспламенения

Масса навески КЗДП-2 воспламенителя в сочетании с размерами, скоростью горения и массой заряда форкамеры выбраны из условия обеспечения безотказного воспламенения заряда в составе РДТТ в диапазоне температур от минус 40 °С до плюс 50 °С.

Технические характеристики воспламенителя представлены в таблице 1.8.1.

Таблица 1.8.1 – Технические характеристики воспламенителя

| Наименование  | Значение                            |
|---|-------------------------------------|
| Воспламенитель:<br>– марка пороха навески<br>– масса навески, $\omega_{\text{в}}$ , кг                                    | КЗДП-2 ГОСТ 1028<br>0,005           |
| Заряд форкамеры:<br>– марка БРТТ<br>– масса, $\omega_{\text{т}}$ , кг<br>– размеры $D_{\text{нар}}/d_{\text{кан}}-L$ , мм | БМС ОСТ В84-439<br>0,015<br>15/5-60 |

Для хранения до сборки и межзаводской перевозки воспламенители и заряды форкамеры упаковываются предприятиями-изготовителями в герметичную тару, вставленную в деревянные ящики. Данный способ упаковывания широко применяется в отрасли предприятиями-изготовителями воспламенителей и зарядов различного назначения для транспортировки любым видом наземного и водного транспорта, а также в герметичных кабинах воздушного транспорта до предприятий, осуществляющих сборку изделий.

### 1.9 Расчет сопловой заглушки

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

Важным контролируемым параметром для неразрушающихся сопловых заглушек является давление вылета  $p_{\text{выл}}$ .

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

$$p_{\text{выл}} = 3 \cdot 10^6 \text{ (Па)}$$

$$D_y = 0,0233 \text{ (м)}$$

$S_{\text{загл}} = 426 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}$  – площадь поверхности заглушки, на которую действует усилие вылета.

Поскольку конструктивная схема двигателя предполагает использование 6 сопл, то  $S_{\text{загл.}\Sigma} = 6 \cdot 426 \cdot 10^{-6} = 2557 \cdot 10^{-6} (\text{м}^2)$ .

Сила, действующая на заглушки со стороны камеры при вылете

$$F_{\text{выл}} = p_{\text{выл}} \cdot S_{\text{загл}} = 3 \cdot 10^6 \cdot 2557 \cdot 10^{-6} = 7671 \text{ Н}$$

Потребная сила трения, необходимая для удержания заглушки:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{выл}} / \cos(\beta) = 7671 / \cos 15^\circ = 7941 \text{ Н}$$

Сопловая заглушка (мембрана) крепится к сопловому блоку за счет конструктивного выступа.

Материал заглушки – алюминиевый сплав.

Принимаем толщину стенки сопловой заглушки  $\delta = 0,5 \text{ мм}$

## **1.10 Расчёт и проектирование соплового блока**

### **1.10.1 Профилирование сужающейся части сопла**

Профиль утопленной части сопла выполнен поверхностью, образованной вращением эллипса с полуосями ***a*** и ***b*** относительно оси сопла, где

$$a/b = 3/2.$$

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

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

$$R_{\text{кр}} = 8,75 \text{ мм.}$$

$$\text{Примем } R_{\text{вх}} = 12 \text{ мм, тогда } R_{\text{вх}} / R_{\text{кр}} = 12 / 8,75 = 1,37 > 1,25;$$

$$b = R_{\text{вх}} - R_{\text{кр}} = 12 - 8,75 = 3,25 \text{ мм;}$$

$$a = \frac{3 \cdot b}{2} = \frac{3 \cdot 3,25}{2} = 4,875 \text{ мм.}$$

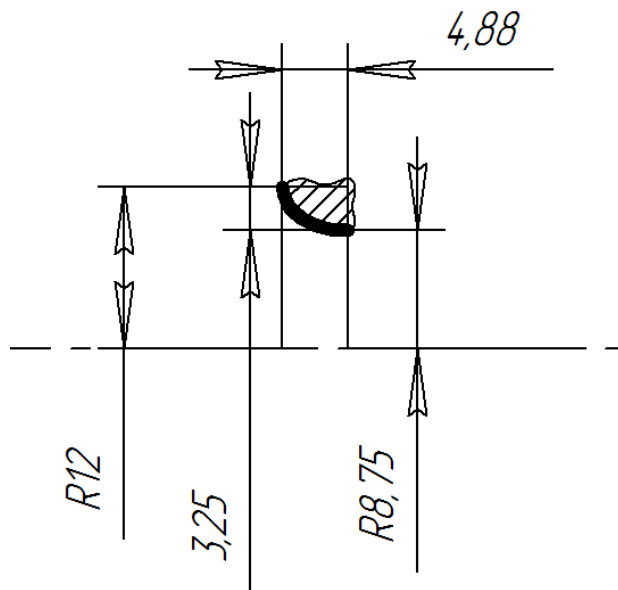


Рис.1.11 Контур сужающейся части сопла

### 1.10.2 Профилирование трансзвуковой части сопла

Неоптимальный профиль в районе критического сечения сопла, как и неверный профиль сужающейся части, могут привести к возникновению системы скачков уплотнения, которые приводят к потерям энергии и уменьшению удельного импульса.

Минимальную длину расширяющейся части сопла обеспечивает сверхзвуковой контур с «угловой точкой», в котором сопряжение дозвукового и сверхзвукового участков сопла выполнено с изломом. Но при наличии «угловой точки» возникает скачок уплотнения и унос материала.

Из технологических соображений критическое сечение выполнено в виде ленты шириной 3,6 мм.

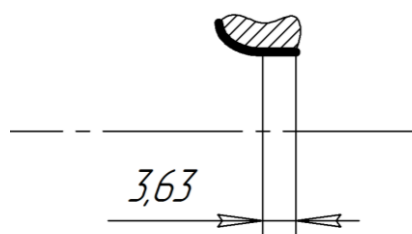


Рис.1.12 Контур трансзвуковой части сопла

### 1.10.3 Профилирование расширяющейся части сопла

Из внутрибаллистического расчёта известны следующие геометрические характеристики и заданы параметры ПС:

$$R_{KP} = \frac{D_{KP}}{2} = \frac{17,5}{2} = 8,75 \text{ мм};$$

$$R_a = \frac{D_a}{2} = \frac{38,4}{2} = 19,2 \text{ мм};$$

На основании технологических решений, принятых в уже отработанном прототипе ДМ-70 конструкция расширяющейся части сопла выполняется в виде конуса с  $\beta_a = 24^\circ$ . Данное значение находится в оптимальном диапазоне значений угла выхода.

Тогда,

$$L_{\text{р.части}} = \frac{19,2 - 8,75}{\tan \beta_a} = 49,16 \text{ мм.}$$

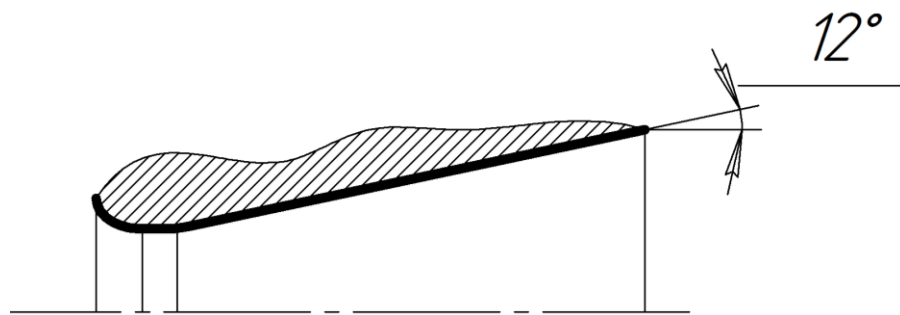


Рис. 1.13 Контур расширяющейся части сопла

### 1.11 Оценка потерь удельного импульса

Реальное значение удельного импульса РДТТ отличается от величины, полученной в результате термодинамического расчёта и проводимого, как правило, при упрощающих допущениях. В качестве таких допущений могут приниматься предположения:

- истечение из сопла – одномерное и равномерное;

- течение продуктов сгорания в сопле адиабатическое без теплообмена с материалом стенок сопла;
- химические реакции между различными компонентами ПС идут равновесно;
- в двухфазных потоках имеет место тепловое и динамическое равновесие между фазами и т.п.

Учёт отличия значений удельного импульса, полученного в результате термодинамического расчёта при использовании упрощающих допущений, от реальных значений на практике выполняется расчётом коэффициентов потерь  $\xi_i$ .

При оценке потерь полагается, что различные составляющие независимы и аддитивны:

$$\xi_{\Sigma} = \sum_i \xi_i$$

В данном дипломном проекте в расчётах учитывают следующие составляющие потерь удельного импульса:

- $\xi_{\text{рас}}$  – потери из-за рассеяния;
- $\xi_{\text{тр}}$  – потери из-за трения;
- $\xi_{\text{хн}}$  – потери из-за химической неравновесности;

Для конических сопел величина потерь из-за рассеяния может определяться зависимостью:

$$\xi_{\text{рас}} = \frac{1 - \cos \beta_a}{2} = \frac{1 - \cos 24^\circ}{2} = 0,043$$

Потери удельного импульса из-за трения потока рассчитываются по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = 0,00272 \cdot \sqrt{\frac{d_a}{d_{\text{кр}}} - 1} \cdot \left( \frac{2,62}{k^2 \cdot \bar{T}_{\text{ст}}^{0,33}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{k_s}{d_{\text{кр}}} \right)^{0,3} \right) =$$



$$= 0,00272 \cdot \sqrt{\frac{0,0384}{0,0175}} - 1 \cdot \left( \frac{2,62}{1,19^2 \cdot 0,70,33} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,0175} \right)^{0,3} \right) \\ = 0,0073.$$

Здесь  $\bar{T}_{cm} = 0,7$  – температурный фактор,  $k_s = 0,4 \text{ мм}$  – параметр шероховатости внутренней поверхности сопла.

Потери из-за химической неравновесности потока определяем по формуле:

$$\xi_{xn} = 0,333 \cdot \left( 1 - \frac{I_{yz}}{I_y} \right) \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{p_k} = 0,333 \cdot \left( 1 - \frac{2878,73}{2954,14} \right) \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{16,61 \cdot 10^6} = 0,001.$$

Значения удельных импульсов получены из программного комплекса «Астра».

Определим суммарные потери:

$$\xi_{\Sigma} = \sum_i \xi_i = \xi_{\text{рас}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_s + \xi_{\text{хн}} = 0,043 + 0,0073 + 0,001 = 0,0513.$$

## 1.12 Тепловой расчет двигателя

### 1.12.1 Задачи расчета

1. Определение распределения температур в расчётных сечениях сборочных единиц корпуса двигателя (далее по тексту – корпус), нагруженного внутренним давлением и работающего при заданных внутренних тепловых воздействиях.

2. Определение среднеинтегральных температур силовых деталей корпуса при нагружении в соответствии с п. 1.

### 1.12.2 Исходные данные для расчета

1. Номинальные расчётные условия соответствуют среднеобъёмным начальным температурам корпуса:

$$- t_{\text{нач1}} = -40 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$- t_{\text{нач2}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

2. Схемы расположения расчетных сечений корпуса приведены на рисунках 1.10. Конструкция корпуса в местах расчетных сечений принята в соответствии с чертежом общего вида.

3. Теплофизические характеристики материалов, входящих в расчетные сечения корпуса представлены в таблице 1.12.1.

4. Полное время работы  $\tau_{п}$ , с:

–  $\tau_{п1} = 5,5$  при  $t_{нач1} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

–  $\tau_{п2} = 4,5$  при  $t_{нач2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

5. Термодинамические и максимальные газодинамические параметры продуктов работы заряда в расчётных сечениях приведены в таблице 1.12.2, теплофизические характеристики продуктов работы – в таблице 1.12.3.

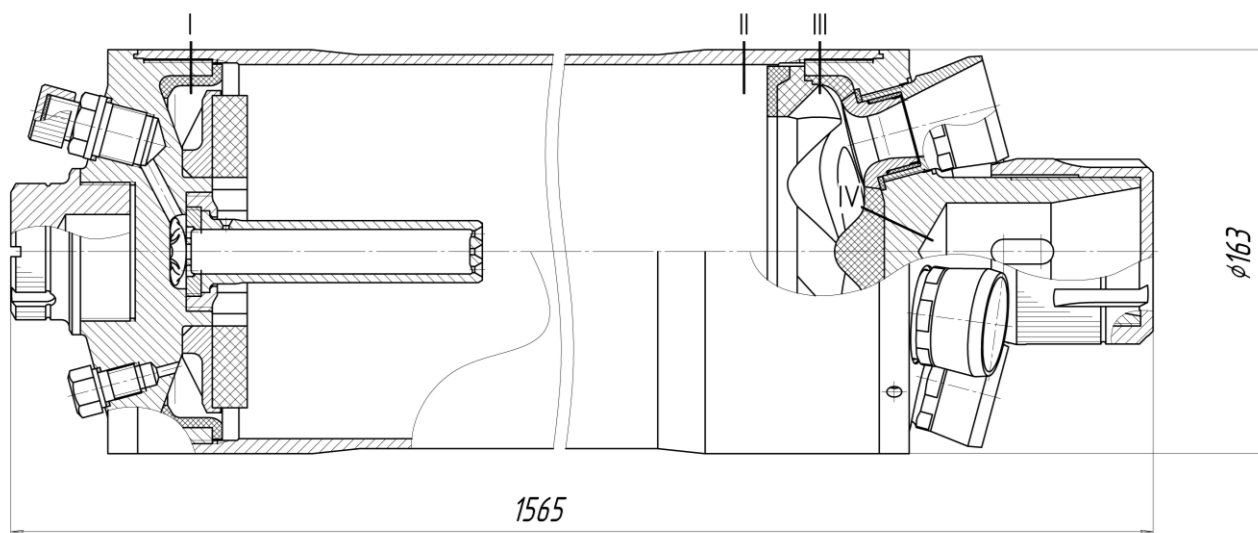


Рисунок 1.14 – Схема расположения расчётных сечений в корпусе

Таблица 1.12.1– Теплофизические характеристики материалов, входящих в расчётные сечения корпуса

| Материал | t, °C | $\lambda$ , Вт/(м·К) | c,<br>Дж/(кг·К) | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|----------|-------|----------------------|-----------------|----------------------------|
| П-5-2М   | – 40  | 0,6                  | 2270,0          | 1640,0                     |
|          | 50    | 0,4                  | 1900,0          | 1640,0                     |
| 30ХГСА   | – 40  | 38,0                 | 496,0           | 7850,0                     |
|          | 50    | 32,0                 | 693,0           | 7610,0                     |
| М-МП     | – 40  | 138,0                | 255,0           | 9590,0                     |
|          | 50    | 138,0                | 255,0           | 9590,0                     |

Таблица 1.12.2 – Термодинамические и максимальные газодинамические параметры ГС заряда в заданных расчётных сечениях корпуса

| № сечения | $t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$ | $v_{\text{зв}}, \text{м/с}$ | $k$ | $R, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $T, \text{К}$ |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------|-----|---|---------------|
| I – IV    | – 40                             | 1047,3                      | 1,2 | 326,9                                   | 2851,0        |
|           | 50                               | 1061,3                      | 1,2 | 326,9                                   | 2993,0        |

Таблица 1.12.3 – Теплофизические характеристики ПС заряда в заданных расчётных сечениях корпуса

| № сечения | $t_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{м}^2/\text{с}$ | $c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | $Pr$ |
|-----------|----------------------------------|----------------------------|---|--|------|
| I – IV    | – 40                             | 1,0e-5                     | 1771,6                                  | 0,2  | 0,6  |
|           | 50                               | 6,7e-6                     | 1775,5                                  | 0,2  | 0,6  |

### 1.12.3 Расчет

Тепловые расчёты проведены по методике , основанной на решении уравнения теплопроводности в многослойной стенке методом конечных разностей. Температурные поля рассчитываются по программе “UNOS”, написанной на языке TURBO PASCAL, в которой для каждого из расчётных сечений решается уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}.$$

Начальное условие задается в виде температуры в слоях в начале процесса теплообмена:

$$T_{\text{нач}} = T(r, \tau = 0).$$

Граничные условия задаются на внутренней и наружной поверхностях твердого тела по закону Фурье:

$$Q = -\lambda \cdot (\partial T / \partial r)_c.$$

При проведении настоящего расчёта со стороны внутренней поверхности расчётного сечения задавалось граничное условие третьего рода, которым описывается конвективный теплообмен между окружающей средой и внутренней поверхностью расчётного сечения:

$$Q_k = \alpha \cdot (T_{\text{нач}} - T_c).$$

Дифференциальное уравнение теплоотдачи конвективного теплообмена:

$$\alpha \cdot (T_{\text{нач}} - T_c) = -\lambda \cdot (\partial T / \partial r)_c.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычислялся как:

$$\alpha = (Nu \cdot a) / l.$$

Критерий Нуссельта рассчитывается по уравнению:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}.$$

Лучистый тепловой поток от окружающей среды вычислялся как:

$$Q_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot [T_{\text{нач}}^4 - T_{\text{с}}^4].$$

В процессе теплообмена в камере происходит нагрев ТЗП, и при достижении на поверхности температуры деструкции 550 °С происходит унос слоёв ТЗП с интенсивностью, зависящей от давления, температуры и параметров омывающего потока.

При теплообмене в застойной зоне температура в расчётном сечении  $l_r$  определяется как:

$$T_z = T_k \exp(-h \cdot l_r^{0,5}),$$

где

$$h = (\ln(T_k) - \ln(T_{\text{нач}})) / l_z.$$

В расчёте учитывается толщина застойной зоны, а также теплоотвод в стенку корпуса и заряда.

Уравнение теплопроводности является дифференциальным уравнением в частных производных относительно температуры. Это уравнение не имеет аналитического решения и решается численным методом путем замены производных их разностными аналогами.

Время процесса разбивается на временные шаги  $\Delta\tau^k$ :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{\Delta T}{\Delta \tau},$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{(T^k - T^{k-1})}{\Delta \tau}.$$

Расчётное сечение разбивается на элементы с размером  $\Delta r_i$ .

Для получения устойчивого решения связь между временными шагами и элементами  $\Delta r$  устанавливается через критерий Фурье:

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2}.$$

Соотношение временных и линейных шагов ограничено условием:

$$Fo < 1/2.$$

Решение уравнения теплопроводности осуществляется методом «прогонки». Для этого используется рекуррентная формула:

$$T(i) = M(i) \cdot T(i+1) + L(i).$$

### 1.12.4 Результат расчета

Таблица 1.12.4 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса в свободном объеме дна переднего (сечение I)

*Сталь 30ХГСА*

*Материал П-5-2М*

$$t_1 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| X <sub>i</sub> , MM | τ, с  |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 5,5   |
| 0,0 (Т.1)           | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 4,0 (Т.2)           | -40,0 | -39,9 | -39,8 | -39,2 | -38,2 | -37,6 |
| 9,0 (Т.3)           | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,6 | -39,5 |
| 13,0 (Т.4)          | -39,8 | -39,7 | -39,6 | -39,5 | -39,4 | -39,3 |

Среднеинтегральные температуры корпуса t<sub>cp</sub>, °C

|           |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Т.2 – Т.4 | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

$$t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| X <sub>i</sub> , MM | τ, с  |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 3,8   |
| 0,0 (Т.1)           | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 4,0 (Т.2)           | 50,0  | 49,9  | 49,9  | 49,9  |
| 9,0 (Т.3)           | 50,0  | 49,8  | 49,6  | 49,6  |
| 13,0 (Т.4)          | 49,6  | 49,5  | 49,3  | 49,2  |

Среднеинтегральные температуры корпуса t<sub>cp</sub>, °C

|           |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|
| Т.2 – Т.4 | 49,9 | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
|-----------|------|------|------|------|



Таблица 1.12.5 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса на расстоянии 7,4 мм от заднего торца шашки (сечение II)

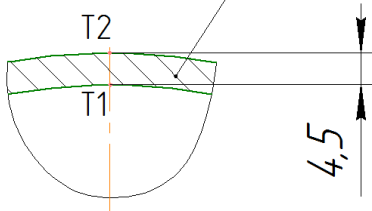
|   |                   |       |       |       |       |       |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <div><div><div>Сталь 30ХГСА</div><div></div></div></div> |                   |       |       |       |       |       |
| $t_1 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$   |                   |       |       |       |       |       |
| $x_i, \text{ мм}$   | $\tau, \text{ с}$ |       |       |       |       |       |
|   | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 5,5   |
| 0,0 (Т.1)   | -39,6             | -39,0 | -38,5 | -37,9 | -37,4 | -37,2 |
| 4,5 (Т.2)   | -39,1             | -38,5 | -37,9 | -37,4 | -36,9 | -36,7 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$  |                   |       |       |       |       |       |
| Т.1 – Т.2   | -39,4             | -38,9 | -38,3 | -37,8 | -37,2 | -37,0 |
| $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  |                   |       |       |       |       |       |
| $x_i, \text{ мм}$   | $\tau, \text{ с}$ |       |       |       |       |       |
|   | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 3,8   |       |       |
| 0,0 (Т.1)   | 49,4              | 48,6  | 47,7  | 47,1  |       |       |
| 4,5 (Т.2)   | 48,5              | 47,6  | 46,7  | 46,2  |       |       |
| Среднеинтегральные температуры корпуса $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$  |                   |       |       |       |       |       |
| Т.1 – Т.2   | 49,1              | 48,2  | 47,4  | 46,8  |       |       |

Таблица 1.12.6 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса в свободном объеме дна заднего (сечение III)

The diagram illustrates a cross-section of a ship's hull. A semi-circular section is shown with four horizontal lines representing temperature measurement points labeled T1, T2, T3, and T4 from bottom to top. A vertical line passes through the center of this section. To the left, a dimension line labeled '4' indicates a distance from the centerline to the left edge. To the right, a dimension line labeled '5' indicates a distance from the centerline to the right edge. The material is identified as 'Сталь 30ХГСА' (Steel 30XGSA) and 'Материал П-5-2М' (Material P-5-2M).

$t_1 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

| $X_i, \text{ MM}$ | $\tau, \text{ c}$ |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 5,5   |
| 0,0 (Т.1)         | 550,0             | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 4,0 (Т.2)         | -40,0             | -39,9 | -39,8 | -39,2 | -38,2 | -37,6 |
| 9,0 (Т.3)         | -39,9             | -39,9 | -39,8 | 39,7  | -39,6 | -39,5 |
| 13,0 (Т.4)        | -39,8             | -39,7 | -39,6 | 39,5  | -39,4 | -39,3 |

Среднеинтегральные температуры корпуса  $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$

|           |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Т.2 – Т.4 | -40,0 | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

$t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

| $X_i, \text{ MM}$ | $\tau, \text{ c}$ |       |       |       |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|
|                   | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 3,8   |
| 0,0 (Т.1)         | 550,0             | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 4,0 (Т.2)         | 50,0              | 49,9  | 49,9  | 50,1  |
| 9,0 (Т.3)         | 49,9              | 49,8  | 49,6  | 49,6  |
| 13,0 (Т.4)        | 49,6              | 49,4  | 49,3  | 49,2  |

Среднеинтегральные температуры корпуса  $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$

|           |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|
| Т.2 – Т.4 | 49,9 | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
|-----------|------|------|------|------|

Таблица 1.12.7 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса в зоне лобового натекания (сечение IV)

$$t_1 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| $X_i, \text{ мм}$  | $\tau, \text{ с}$ |       |       |       |       |       |
|--|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 5,5   |
| 0,0 (Т.1)  | 550,0             | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 9,0 (Т.2)  | -40,0             | -40,0 | -40,0 | -40,0 | -40,0 | -39,9 |
| 27,0 (Т.3)   | -39,7             | -39,6 | -39,5 | -39,5 | -39,4 | -39,4 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$ |                   |       |       |       |       |       |
| Т.2 – Т.4  | -40,0             | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,8 | -39,7 |

$$t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| $X_i, \text{ мм}$  | $\tau, \text{ с}$ |       |       |       |
|--|-------------------|-------|-------|-------|
|  | 1,0               | 2,0   | 3,0   | 3,8   |
| 0,0 (Т.1)  | 550,0             | 550,0 | 550,0 | 550,0 |
| 9,0 (Т.2)  | 50,0              | 50,0  | 50,0  | 50,0  |
| 27,0 (Т.3)   | 49,6              | 49,4  | 49,2  | 49,1  |
| Среднеинтегральные температуры корпуса $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$ |                   |       |       |       |
| Т.2 – Т.4  | 49,9              | 49,8  | 49,8  | 49,7  |

Таблица 1.12.8 – Среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса при начальной температуре  $t_{нач1} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Расчётные<br>Сечения | Время воздействия, с              |       |       |       |       |       |
|----------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 1,0                               | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 5,5   |
|                      | $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$ |       |       |       |       |       |
| I                    | -39,9                             | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
| II                   | -39,4                             | -38,9 | -38,3 | -37,8 | -37,2 | -37,0 |
| III                  | -40,0                             | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
| IV                   | -40,0                             | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,8 | -39,7 |

Таблица 1.12.9 – Среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса при начальной температуре  $t_{нач2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Расчётные<br>Сечения | Время воздействия, с              |      |      |      |
|----------------------|-----------------------------------|------|------|------|
|                      | 1,0                               | 2,0  | 3,0  | 3,8  |
|                      | $t_{cp},\text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |
| I                    | 49,9                              | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
| II                   | 49,1                              | 48,2 | 47,4 | 46,8 |
| III                  | 49,9                              | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
| IV                   | 49,9                              | 49,8 | 49,8 | 49,7 |

### 1.13 Расчет толщины бронирующего покрытия заряда

Для бронирования плоских торцов и наружной поверхности заряда предлагается надёжно используемая и освоенная технология бронирования методом намотки армирующей хлопчатобумажной пряжей плотностью 60 и 56 текс, пропитанной связующим ЭТАЛ-148ТГ-2Н-1, которое имеет хорошую совместимость с выбранными топливами. Рецепт бронепокртия ЭТАЛ-148ТГ-2Н-1 приведена в таблице 1.12.1, а основные свойства в таблице 1.12.2.

Таблица 1.13.1 – Рецепт бронепокртия ЭТАЛ-148ТГ-2Н-1

| Наименование компонентов                              | Массовое содержание |      |
|---|---------------------|------|
|   | часть               | %    |
| Основа - модифицированная эпоксидная смола ЭТАЛ-148ТГ | 100                 | 63,9 |
| Наполнитель АМ  | 30                  | 19,2 |
| Отвердитель ЭТАЛ-0638/2                               | 25                  | 16,0 |
| Ускоритель отверждения - бензойная кислота            | 1,5                 | 0,9  |

Отверждение бронирующего покрытия при температуре от 291 до 308 К (от 18 до 35 °С) происходит в течение 24 часов.

Для бронирования торцов заряда методом намотки потребуются разработка и изготовление специальной технологической оснастки. Для обеспечения собираемости заряда с корпусом геометрические размеры заряда заданы с повышенной точностью, что потребует дополнительной механической обработки.

Таблица 1.13.2 – Основные свойства бронепокровтия ЭТАЛ-148ТГ-2Н-1

| Наименование характеристик   | Значение   |
|--|--|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> (г/см <sup>3</sup> )  | от 1270 до 1300<br>(от 1,27 до 1,30)   |
| Температурная область структурного стеклования, К (°С)   | от 273 до 283<br>(от 0 до 10)  |
| Температурная область механического стеклования, К (°С)  | от 273 до 308<br>(от 0 до 35)  |
| Влагопоглощение, %, при<br>φ = 65 %<br>φ = 90 %  | 2,5<br>12,0  |
| Скорость газовыделения, определённая по количеству газов, выделившихся за 30 суток при температуре 333 К (60 °С), см <sup>3</sup> /(г·ч):<br>– из бронирующего покрытия<br>– из смеси покрытия с баллиститным топливом в соотношении 1:1 | от 0,8·10 <sup>-4</sup> до 1,9·10 <sup>-4</sup><br>от 6,7·10 <sup>-4</sup> до 9,4·10 <sup>-4</sup> |

Таблица 1.13.2 – продолжение

|   |   |
|---|---|
| <p>Теплофизические характеристики:</p> <p>– удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)</p> <p>при температурах:</p> <p>223 К (минус 50 °С)</p> <p>273 К (0 °С)</p> <p>293 К (20 °С)</p> <p>323 К (50 °С)</p> <p>– теплопроводность, Вт/(м·К)</p> <p>при температурах:</p> <p>223 К (минус 50° С)</p> <p>273 К (0 °С)</p> <p>293 К (20 °С)</p> <p>323 К (50 °С)</p> <p>– температуропроводность, а, <math>\times 10^7</math>, м<sup>2</sup>·с</p> <p>при температурах:</p> <p>223 К (минус 50 °С)</p> <p>273 К (0 °С)</p> <p>293 К (20 °С)</p> <p>323 К (50 °С)</p> | <p>1,17</p> <p>1,57</p> <p>1,77</p> <p>2,11</p><br><p>0,274</p> <p>0,290</p> <p>0,288</p> <p>0,275</p><br><p>1,85</p> <p>1,45</p> <p>1,28</p> <p>1,03</p> |
| <p>– коэффициент линейного расширения, 1/град <math>\times 10^{-4}</math></p> <p>при температурах:</p> <p>223 К (минус 50 °С)</p> <p>273 К (0 °С)</p> <p>293 К (20 °С)</p> <p>323 К (50 °С)</p>   | <p>0,77</p> <p>0,77</p> <p>0,77</p> <p>2,09</p>   |

Толщина бронирующего покрытия определяется исходя из условия нагрева поверхностного слоя топлива, находящегося под бронепокрытием до температуры, не превышающей температуру воспламенения топлива. При выводе расчетной зависимости принимаются допущения, что унос бронепокрытия за все время горения заряда отсутствует и количество тепла, поглощенное бронепокрытием, должно быть на порядок больше количества тепла, поглощенного топливом.

$$\delta_{\text{бп}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{\text{бп}} \cdot \tau_p}{C_{\text{бп}} \cdot \rho_{\text{бп}} \cdot \ln\left(\frac{T_{\text{к}} - T_{\text{т}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{т.доп}}}\right)}}$$

Для бронирующего покрытия на номинальном режиме работы двигателя:

$$\lambda_{\text{бп}} = 0,288 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

$$C_{\text{бп}} = 1770 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

$$\rho_{\text{бп}} = 1270 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$$

$$T_{\text{т}} = 293 \text{ (К)}$$

$$T_{\text{к}} = 2818 \text{ (К)}$$

$$T_{\text{т.доп}} = 1200 \text{ (К)} < T_{\text{вспышки}} \approx 1300 \text{ К}$$

$$\tau_p = 4,65 \text{ (с)}$$

$$\delta_{\text{бп}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,288 \cdot 4,65}{1770 \cdot 1270 \cdot \ln\left(\frac{2818 - 293}{2818 - 1200}\right)}} = 0,00163 \text{ (м)} = 1,63 \text{ (мм)}$$

Принимаем толщину бронепокровтия на торцах заряда  $\delta_{\text{бп}} = 2 \text{ (мм)}$ .

### 1.14 Расчет заряда на прочность

Расчёт заряда на прочность состоит из следующих этапов:

1. установление перечня зон, напряжения в которых могут достигать опасных уровней.
2. определение максимальных значений напряжений  $\sigma$ .
3. сравнение возникающих напряжений с предельно допустимыми и определение коэффициента запаса.

Физико-механические характеристики топлива указаны в таблице 1.14.1.

Максимальное давление в камере сгорания –  $p_k^{\max} = 13,91 \text{ МПа}$ .

Нагружение статическое.

Таблица 1.14.1 Физико-механические характеристики топлива

| Параметр | $[\sigma_B]$ , МПа |        | $E$ , МПа | $\lambda_T, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ | $\alpha_T, \text{К}^{-1}$ | $\mu$ |
|----------|--------------------|--------|-----------|--|---------------------------|-------|
|          | растяжение         | сжатие |           |  |                           |       |
| БТРТ     | 7,45               | 34     | 22        | 0,265  | 0,000122                  | 0,41  |

Для расчета заряда на прочность приняты следующие допущения:

1. Обечайка и бронировка считаются абсолютно жесткими
2. Материал заряда упругий и изотропный.

Расчёт заряда на прочность проводился в программном комплексе SolidWorksSimulation, результаты приведены в табл. 1.14.2.

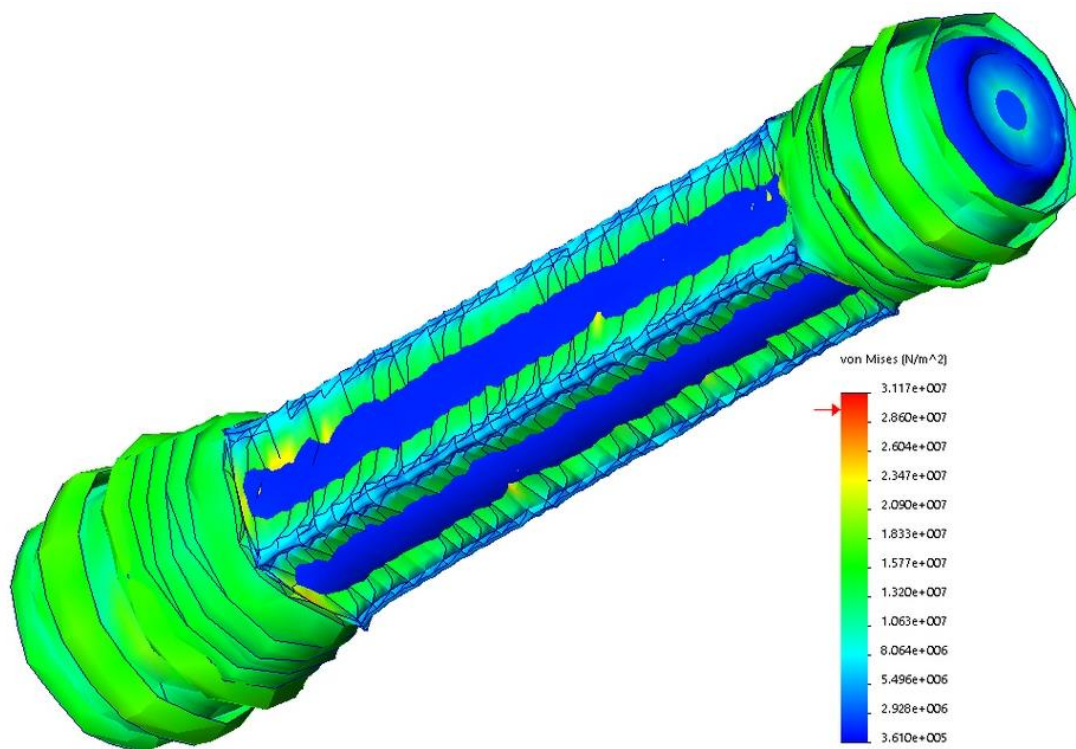
Таблица 1.14.2 Результаты расчёта заряда на прочность

|                | Минимальное значение | Максимальное значение |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| Напряжение, Па | $0,036 \cdot 10^6$   | $31,7 \cdot 10^6$     |

Коэффициент запаса будет равен:

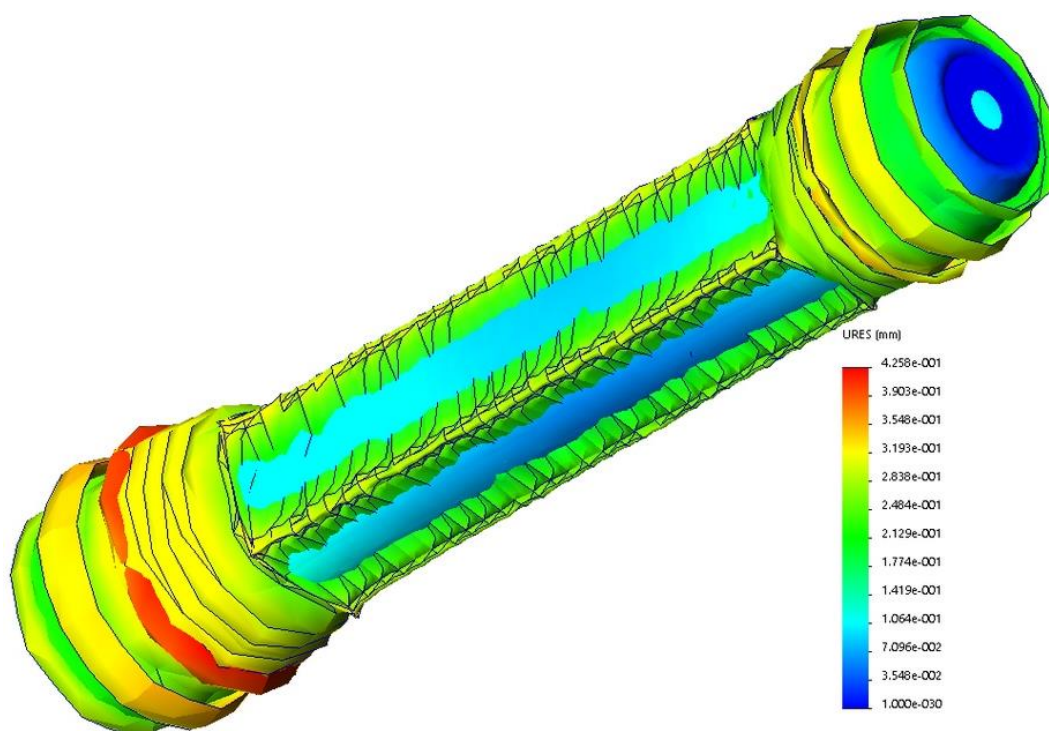
$$K_{\text{зап}} = \frac{[\sigma_B]}{\sigma_{\text{вmax}}} = \frac{34 \cdot 10^6}{31,7 \cdot 10^6} = 1,072.$$





SOLIDWORKS для учебных заведений. Только для обучающих целей.

Рисунок 1.15 – Исследование на прочность



SOLIDWORKS для учебных заведений. Только для обучающих целей.

Рисунок 1.16 – Исследование на деформацию

## **Заключение к конструкторской части**

Конструкторская часть дипломного проекта состоит из 4 листов формата А1 графической части и пояснительной записки. В процессе ее выполнения было сделано следующее:

На основании представленного технического задания был выбран прототип, спроектирован ракетный двигатель твердого топлива для реактивного снаряда установки разминирования. Результат работы удовлетворяет условиям технического задания, что подтверждают расчеты внутрибаллистических параметров и энергетических характеристик двигателя.

В процессе проектирования проведены первичные оценочные расчеты толщин корпуса, расчет температурных полей в процессе работы изделия.

Так же конструкция изделия предусматривает возможность попарно-последовательного соединения двух двигателей для увеличения дальности полета. Для обеспечения стыковки был спроектирован узел стыковки.

## **2 Исследовательская часть. Экспериментальное подтверждение требований технического задания**

### **Введение**

Недостаточно полные знания о закономерностях протекания рабочих процессов в РДТТ, сложность прогнозирования свойств конструкционных материалов в условиях конкретных РДТТ, высокие требования к надежности функционирования систем – все это обуславливает необходимость их экспериментальной отработки.

Так же, во многом, сдача в эксплуатацию РДТТ, разработанного в короткие сроки и с минимальными экономическими затратами, определяется экспериментальной отработкой, которая проводится на специальных комплексах и станциях, основу которых составляют испытательные стенды, стапельное оборудование, средства для определения управляющих и возмущающих сил, возникающих в процессе работы двигателя.

ОСИ РДТТ проводятся на горизонтальных, вертикальных, либо наклонных стендах.

Для испытания двигателей с опытными или малоизученными топливами, либо для проведения комплексных испытаний РДТТ используют открытые горизонтальные стенды.

Для экспериментального подтверждения характеристик разработанного двигателя было спроектировано стапельное оборудование, рассмотрены система измерения и система регистрации.

### **2.1 Стапельное оборудование**

Стапель – конструкция для крепления и ориентации двигателя на испытательном стенде. Стапель является важнейшим техническим средством при испытании РДТТ, поскольку он оказывает прямое влияние на качество измерения силовых характеристик двигателя – тяги. В зависимости от требований программы испытаний конструкция стапеля должна

обеспечивать изменение ряда других параметров, например, параметров узлов отсечки тяги, разделения ступеней и т.д. Ниже приведены основные требования к конструкции стапелей для испытания РДТТ.

1. Конструкция стапеля должна обеспечивать необходимое число степеней свободы двигателя в направлении действия измеряемых сил.

2. Кинематическая связь между подвижными и неподвижными элементами стапеля не должна влиять на характер возможного перемещения двигателя под действием силы тяги.

3. Конструкция стапеля должна позволять так монтировать измерительные звенья, чтобы сила, прикладываемая вдоль линии действия измерительного элемента, не вызывала реакции в других элементах.

4. Сила трения в подвижных элементах должна быть минимальной.

5. Величина массы присоединенных к двигателю подвижных частей стапеля должна быть минимальной, чтобы уменьшить влияние сил инерции на точность измерения сил на нестационарных участках работы двигателя.

6. Жесткость силовых элементов стапеля, передающих усилия на измерительный преобразователь тяги, должна быть такой, чтобы частота собственных колебаний всей стендовой системы (двигатель, стапель, измерительные звенья) была в несколько раз больше собственной частоты контролируемого процесса.

7. Конструкция стапеля должна обеспечивать стабильность динамических характеристик в процессе работы двигателя независимо от внешних условий.

8. Стапель должен обеспечивать надежное крепление двигателя на стенде и быть удобным в эксплуатации.

В зависимости от характера кинематических связей и специфических особенностей выполнения конструкции различают следующие виды стапелей:

– горизонтально-ориентируемые стапели: кареточные, на упругих подвесах, люнетные, на гидростатичных опорах;

- вертикально-ориентируемые стапели: подвесного типа, упорного типа;
- наклонные стапели.

Для испытаний выбран горизонтально-ориентируемый стапель, преимуществом которого типа перед вертикально-ориентированным является возможность исключения влияния массы и силы тяжести испытываемого двигателя в процессе его работы на точность измерения тяги.

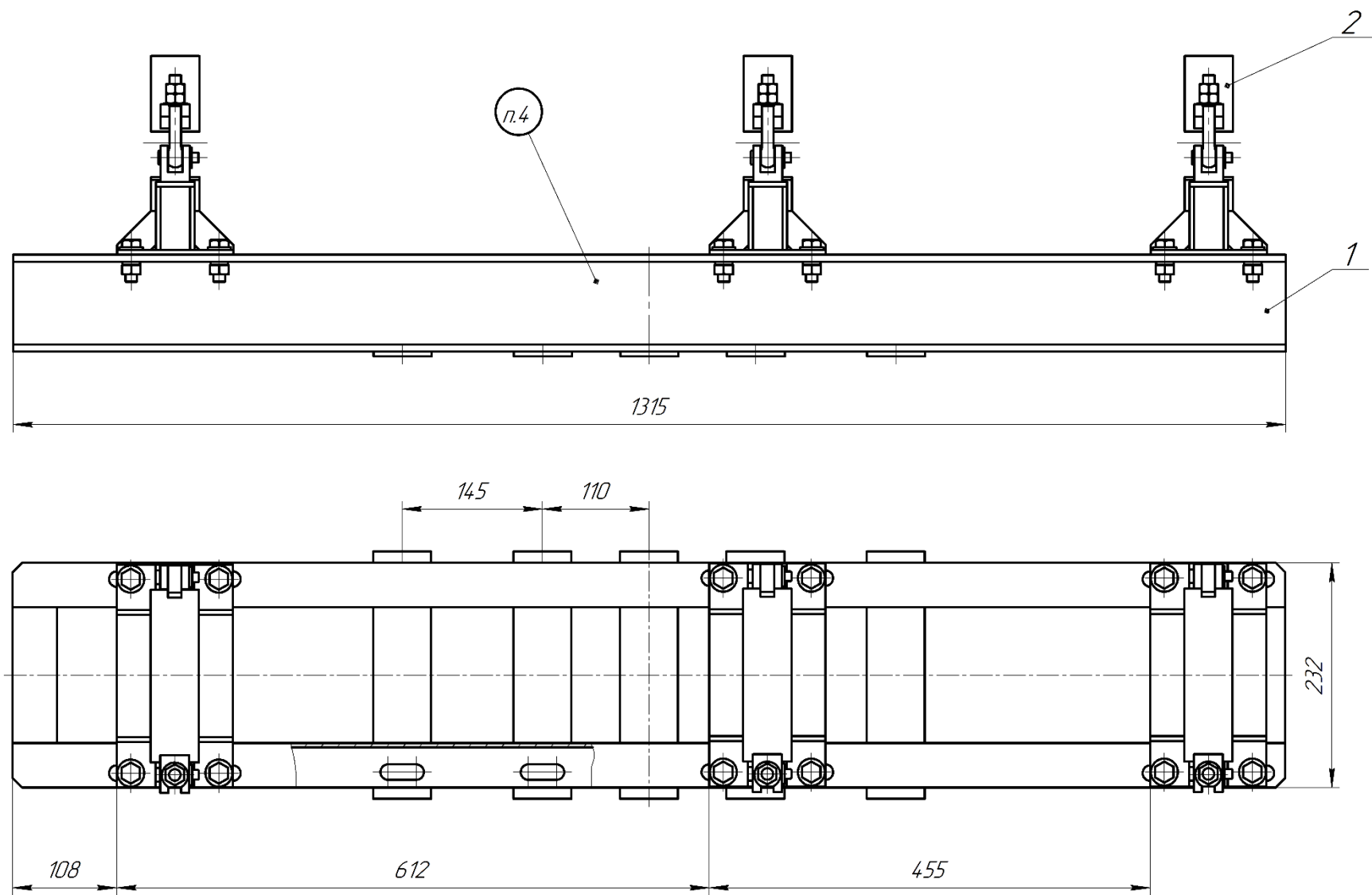


Рис. 2.1 – Схема разработанного стапельного оборудования

## 2.2 Программа и методика проведения испытаний

### 2.2.1 Перечень обозначений и сокращений

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| $\tau_{\partial в}$              | — полное время работы, с;   |
| $\tau_{в.р}$                     | — время выхода на режим, с;   |
| $\tau_{з.т}$                     | — время задержки появления тяги, с;   |
| $\tau_{p_{max1}}$                | — время достижения максимального давления на начальном участке работы двигателя, с;   |
| $\tau_{p_{max2}}$                | — время достижения максимального давления на конечном участке работы двигателя, с;  |
| $\tau_i$                         | — текущее время, с;   |
| $D_k$                            | — внутренний диаметр (диаметр критического сечения) вкладыша, мм;   |
| $I_{p, \tau_{\partial в}}^{ПО}$  | — полный импульс давления в переднем объёме двигателя за полное время его работы, кгс·с/см <sup>2</sup> ;                         |
| $I_{p, \tau_{\partial в}}^{PCO}$ | — полный импульс давления в предсопловом объёме двигателя за полное время его работы, кгс·с/см <sup>2</sup> ;                     |
| $I_{R, \Sigma}$                  | — полный импульс тяги, кгс·с/(Н·с);   |
| $h_n$                            | — атмосферное давление, измеренное на стенде перед запуском двигателя, мм рт. ст.;  |
| $p(\tau)$                        | — текущее осреднённое измеренное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );  |
| $p_{изб}(\tau)$                  | — избыточное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );  |
| $p^{OFK}(\tau)$                  | — текущее осреднённое измеренное давление в объёме форкамеры воспламенительного устройства двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ); |
| $p_{max}^{OFK}$                  | — максимальное давление в объёме форкамеры воспламенительного устройства двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );                   |
| $p^{ПО}(\tau)$                   | — текущее осреднённое измеренное давление в переднем объёме двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );                                |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $p_{max1}^{ПО}$         | – максимальное давление в переднем объёме двигателя на начальном участке его работы, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );     |
| $p_{max2}^{ПО}$         | – максимальное давление в переднем объёме двигателя на конечном участке его работы, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );      |
| $p^{PCO}(\tau)$         | – текущее осреднённое измеренное давление в предсопловом объёме двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );               |
| $p_{max1}^{PCO}$        | – максимальное давление в предсопловом объёме двигателя на начальном участке его работы, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ); |
| $p_{max2}^{PCO}$        | – максимальное давление в предсопловом объёме двигателя на конечном участке его работы, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );  |
| $p^{H33}(\tau)$         | – текущее осреднённое измеренное давление в начале застойной зоны двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );             |
| $p^{K33}(\tau)$         | – текущее осреднённое измеренное давление в конце застойной зоны двигателя, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );              |
| $\Delta p_{осев}(\tau)$ | – осевой перепад статического давления по длине заряда, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );                                  |
| $p_n$                   | – давление окружающей среды на момент проведения ОСИ изделия, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );                            |
| $p_n^N$                 | – нормальное атмосферное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );   |
| $p_{в.р}$               | – давление выхода на режим, МПа (кгс/см <sup>2</sup> );  |
| $R(\tau)$               | – текущая осреднённая измеренная тяга, кгс;  |
| $R_{max1}$              | – максимальная тяга двигателя на начальном участке его работы, кгс;  |
| $R_{max2}$              | – максимальная тяга двигателя на конечном участке его работы, кгс.   |
| ВБП                     | – внутрибаллистические параметры;  |
| КЗЗ                     | – конец застойной зоны двигателя;  |
| НЗЗ                     | – начало застойной зоны двигателя;   |



- ОСИ – огневое стендовое испытание;
- ОТК – отдел технического контроля;
- ОФК – объём форкамеры воспламенительного устройства двигателя;
- ПД ИТР – противодействие иностранным техническим разведкам;
- ПО – передний объём камеры сгорания двигателя;
- ПСО – предсопловой объём камеры сгорания двигателя;
- СТИ – система телеметрических измерений;
- ЭП – энергетические параметры.

Программа испытаний

Объект испытаний – маршевый ракетный двигатель или телеметрическое исполнение двигателя.

При проведении ОСИ использование штатного или телеметрического исполнения двигателя определяется соответствующим видом испытания.

Штатное и телеметрическое исполнения двигателя предусматривают возможность использования датчиков давления и тяги СТИ и предназначены для определения ВБП и ЭП при проведении ОСИ.

Целями ОСИ являются:

- определение ВБП и ЭП двигателя;
- подтверждение выполнения требований технических условий для каждой изготовленной партии двигателей, зарядов и воспламенителей.

Задачи испытаний:

- обеспечение заданной среднеобъёмной температуры основного и инициирующего изделий перед ОСИ;
- проведение ОСИ;
- регистрация и обработка информации СТИ.

Работы с двигателем, проводимые после ОСИ:

- транспортирование;
- дефектация.

Режимы термостатирования:

- режим 1 – минус 40 °С;
- режим 2 – плюс 50 °С.

Двигатель на стенде устанавливается в испытательной оснастке в горизонтальном положении. До и после испытаний проводится фотографирование объекта испытания на стенде.

В процессе испытаний проводится видеосъемка.

При проведении испытаний предприятие-разработчик двигателя обеспечивает конструкторской и методической документацией.

При проведении испытаний предприятие-изготовитель двигателя обеспечивает

- объектом испытаний;
- испытательной оснасткой.

При проведении испытаний предприятие (организация), проводящие ОСИ, обеспечивает

- датчиками СТИ;
- фото- и видеоаппаратурой (при необходимости);
- средствами регистрации и обработки информации;
- межоперационное транспортирование;
- термостатирование;
- подготовку испытательного стенда;
- установку объекта испытаний на стенде;
- предпусковые проверки;
- пуск на стенде;
- обработку и анализ результатов.

Результаты ОСИ фиксируются в программе на проведение испытаний (протоколе).

По результатам ОСИ выпускается протокол испытания с приложениями к нему:

- технологический паспорт;
- результаты испытания;

– другие рабочие материалы, оформленные в течение испытания.

#### Методика испытаний

Испытания проводятся методом ОСИ в соответствии с настоящей программой и методикой испытаний.

Оцениваемые характерные значения ВБП и ЭП, определяемые по данной программе и методике испытаний, в зависимости от исполнения двигателя приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Оцениваемые характерные значения ВБП и ЭП

| Оцениваемые характерные значения <a href="#">ВБП</a> и <a href="#">ЭП</a> | Исполнение двигателя |                 |
|---|----------------------|-----------------|
|   | штатное              | телеметрическое |
| $\tau_{\partial\theta}$   | +                    | +               |
| $\tau_{\theta,p}$   | +                    | +               |
| $\tau_{3,m}$  | +                    | +               |
| $\tau_{p_{max1}}$   | +                    | +               |
| $\tau_{p_{max2}}$   | +                    | +               |
| $p_{max}^{ОФК}$   | –                    | +               |
| $p_{max1}^{ПО}$   | +                    | +               |
| $p_{max1}^{ПСО}$  | –                    | +               |
| $p_{max2}^{ПО}$   | +                    | +               |
| $p_{max2}^{ПСО}$  | –                    | +               |
| $I_{p, \tau_{\partial\theta}}^{ПО}$                                       | +                    | +               |
| $I_{p, \tau_{\partial\theta}}^{ПСО}$                                      | –                    | +               |
| $R_{max1}$  | +                    | +               |
| $R_{max2}$  | +                    | +               |
| $I_{R, \Sigma}$   | +                    | +               |

Требования к СТИ, в зависимости от исполнения двигателя, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Требования к системе измерения для штатного исполнения двигателя

| Параметр   | Значение, тип  |                  |                  |
|--|--|------------------|------------------|
|  | Давление   | Тяга             |                  |
| 1 Количество датчиков                            | 2  | 2                |                  |
| 2 Тип датчика                                    | ЛХ412/250  | ТПА-6            | М50              |
| 3 Частота опроса, Гц, не менее                   | 1000   | 1000             |                  |
| 4 Диапазон измерения                             | от 0 до 250 кгс/см <sup>2</sup>                              | от 0 до 6000 кгс | от 0 до 5000 кгс |
| 5 Длительность регистрации процесса, с, не менее | 11   |                  |                  |
| 6 Средства регистрации и обработки               | Цифровые средства регистрации и автоматизированная обработка |                  |                  |

Таблица 2.3 – Требования к системе измерения для телеметрического исполнения двигателя

| Параметр   | Значение, тип  |                  |                  |
|--|--|------------------|------------------|
|  | Давление   | Тяга             |                  |
| 1 Количество датчиков                            | 10   | 2                |                  |
| 2 Тип датчика                                    | ЛХ412/250  | ТПА-6            | М50              |
| 3 Частота опроса, Гц, не менее                   | 1000   | 1000             |                  |
| 4 Диапазон измерения                             | от 0 до 250 кгс/см <sup>2</sup>                              | от 0 до 6000 кгс | от 0 до 5000 кгс |
| 5 Длительность регистрации процесса, с, не менее | 11   |                  |                  |
| 6 Средства регистрации и обработки               | Цифровые средства регистрации и автоматизированная обработка |                  |                  |

Схемы размещения датчиков рис.2.2, рис 2.3.

Все измеренные значения избыточного давления  $p_{изб}(\tau)$  приводить к их абсолютным значениям  $p(\tau)$  по формуле

$$p(\tau) = p_{изб}(\tau) + p_n, \quad (1)$$

где  $p_n$ , вычисленное по формуле

$$p_h = \frac{h_h}{760} p_h^N. \quad (2)$$

Примечание – Давление  $p_h^N = 0,1013$  МПа (1,033 кгс/см<sup>2</sup>).

Определить осреднённые зависимости от времени:

- $p^{PO}(\tau)$  по параметрам  $p_1, p_2$  ([ПО1](#), [ПО2](#));
- $p^{PCO}(\tau)$  по параметрам  $p_3, p_4$  ([ПСО1](#), [ПСО2](#));
- $p^{OFK}(\tau)$  по параметрам  $p_5, p_6$  ([ОФК1](#), [ОФК2](#));
- $p^{H33}(\tau)$  по параметрам  $p_7, p_8$  ([НЗ31](#), [НЗ32](#));
- $p^{K33}(\tau)$  по параметрам  $p_9, p_{10}$  ([КЗ31](#), [КЗ32](#));
- $R(\tau)$  по параметрам  $R_1, R_2, R_3$ .

Определяемые осреднённые зависимости от времени для соответствующего исполнения (штатное, телеметрическое) двигателя приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Определяемые осреднённые зависимости от времени

| Осреднённая зависимость<br>от времени | Исполнение двигателя |                 |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------|
|                                       | штатное              | телеметрическое |
| $p^{PO}(\tau)$                        | +                    | +               |
| $p^{PCO}(\tau)$                       | –                    | +               |
| $p^{OFK}(\tau)$                       | –                    | +               |
| $p^{H33}(\tau)$                       | –                    | +               |
| $p^{K33}(\tau)$                       | –                    | +               |
| $R(\tau)$                             | +                    | +               |

В дальнейших расчётах использовать только осреднённые зависимости давления и тяги.

При обработке, анализе и оценке результатов ОСИ использовать

- объём обрабатываемой информации – см. таблицу 2.1;
- порядок и последовательность проведения анализа результатов.

В зависимости от исполнения (штатное, телеметрическое) двигателя, определяемые ВБП и ЭП приведены в таблице 2.4.

Для определения ВБП использовать зависимости давления от времени в переднем объёме двигателя – параметры  $p_1, p_2$ .

Для определения ВБП в форкамере воспламенительного устройства использовать зависимости давления от времени в объёме форкамеры – параметры  $p_5, p_6$ .

Для определения осевого перепада  $\Delta p_{осев}(\tau)$  статического давления по длине заряда использовать осреднённые зависимости давления от времени  $p^{ПО}(\tau), p^{ПСО}(\tau)$  по формуле

$$\Delta p_{осев}(\tau) = p^{ПО}(\tau) - p^{ПСО}(\tau).$$

Для определения ЭП двигателя использовать зависимости тяги от времени – параметры  $R_1, R_2, R_3$ .

#### Определение ВБП и ЭП двигателя

За начало отсчёта времени  $\tau = 0$  принять момент подачи импульса тока на мостики пиропатрона.

Определить следующие характерные значения):

- $\tau_{в.р}$  – время выхода на режим определять от момента подачи импульса тока на мостики пиропатрона до момента достижения давления  $p_{в.р} = 0,9 \cdot p_{max1}^{ПО}$  на участке выхода на режим;

- $\tau_{з.м}$  – время задержки появления тяги определяется от момента подачи импульса тока на мостики пиропатрона до момента появления тяги;

- $\tau_{ог}$  – полное время работы двигателя определяется от момента подачи импульса тока на мостики пиропатрона до момента достижения давления  $p^{ПО}(\tau) = 0,49 \text{ МПа (5 кгс/см}^2\text{)}$  на участке спада;

- $\tau_{p_{max1}}$  – время достижения максимального давления  $p_{max1}^{ПО}$  на начальном участке работы определять от момента подачи импульса тока на мостики пиропатрона;

–  $\tau_{p_{max2}}$  – время достижения максимального давления  $p_{max2}^{ПО}$  на конечном участке работы определять от момента подачи импульса тока на мостики пиропатрона;

–  $p_{max1}^{ПО}$  и  $p_{max2}^{ПО}$  (по параметрам  $p_1, p_2$ ) – максимальные значения давления на начальном и конечном участках работы двигателя в переднем объёме;

–  $p_{max1}^{ПСО}$  и  $p_{max2}^{ПСО}$  (по параметрам  $p_3, p_4$ ) – максимальные значения давления на начальном и конечном участках работы двигателя в предсопловом объёме;

–  $p_{max}^{ОФК}$  (по параметрам  $p_5, p_6$ ) – максимальное значение давления в объёме форкамеры воспламенительного устройства двигателя;

–  $I_{p, \tau_{\partial\phi}}^{ПО}$  – импульс давления в переднем объёме за полное время работы двигателя по формуле

$$I_{p, \tau_{\partial\phi}}^{ПО} = \int_0^{\tau_{\partial\phi}} p^{ПО}(\tau) d\tau ;$$

–  $I_{p, \tau_{\partial\phi}}^{ПСО}$  – импульс давления в предсопловом объёме за полное время работы двигателя по формуле

$$I_{p, \tau_{\partial\phi}}^{ПСО} = \int_0^{\tau_{\partial\phi}} p^{ПСО}(\tau) d\tau ;$$

–  $R_{max1}$  – максимальное значение тяги на начальном участке работы двигателя в момент времени, соответствующий  $\tau_{p_{max1}}$  ;

–  $R_{max2}$  – максимальное значение тяги на конечном участке работы двигателя в момент времени, соответствующий  $\tau_{p_{max2}}$  ;

–  $I_{R, \Sigma}$  – импульс тяги за полное время работы двигателя по формуле

$$I_{R, \Sigma} = \int_0^{\tau_{\partial\phi}} R(\tau) d\tau .$$

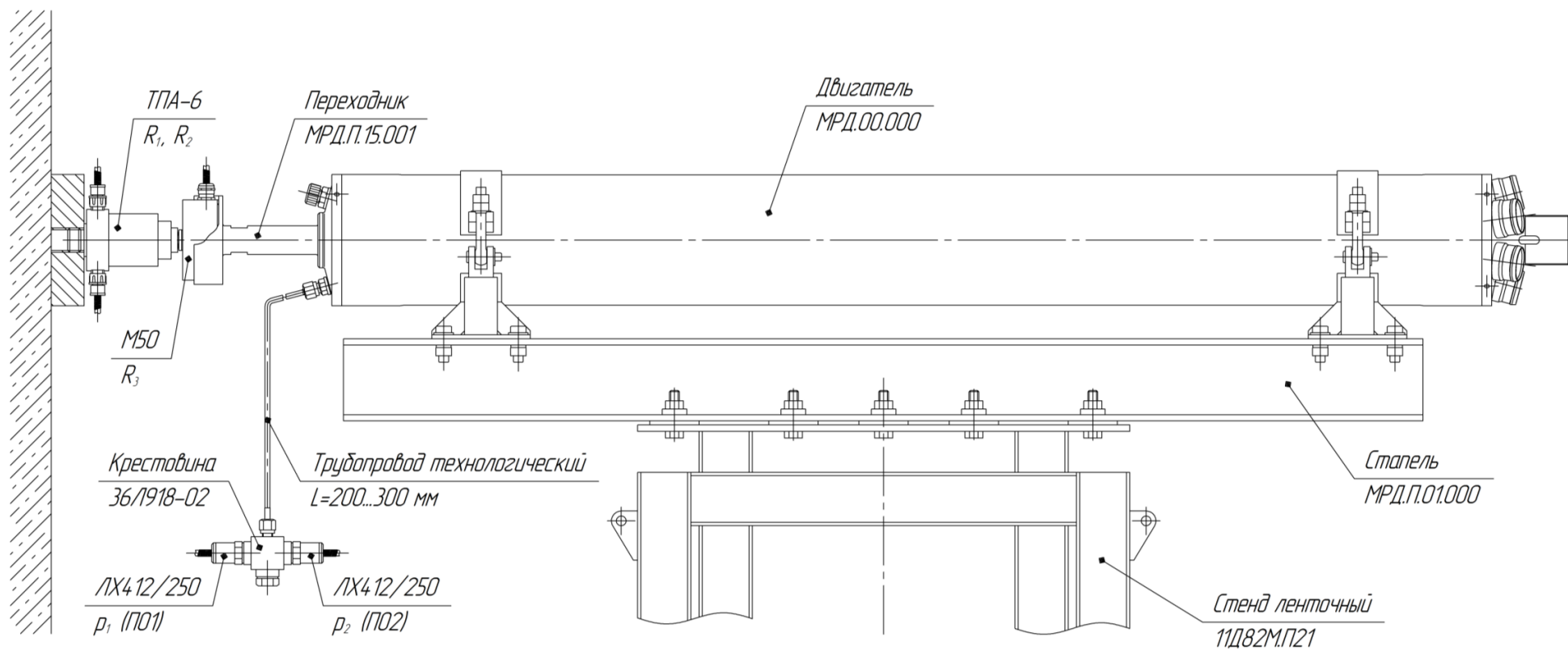


Рис. 2.2 – Монтаж двигателя на станцию



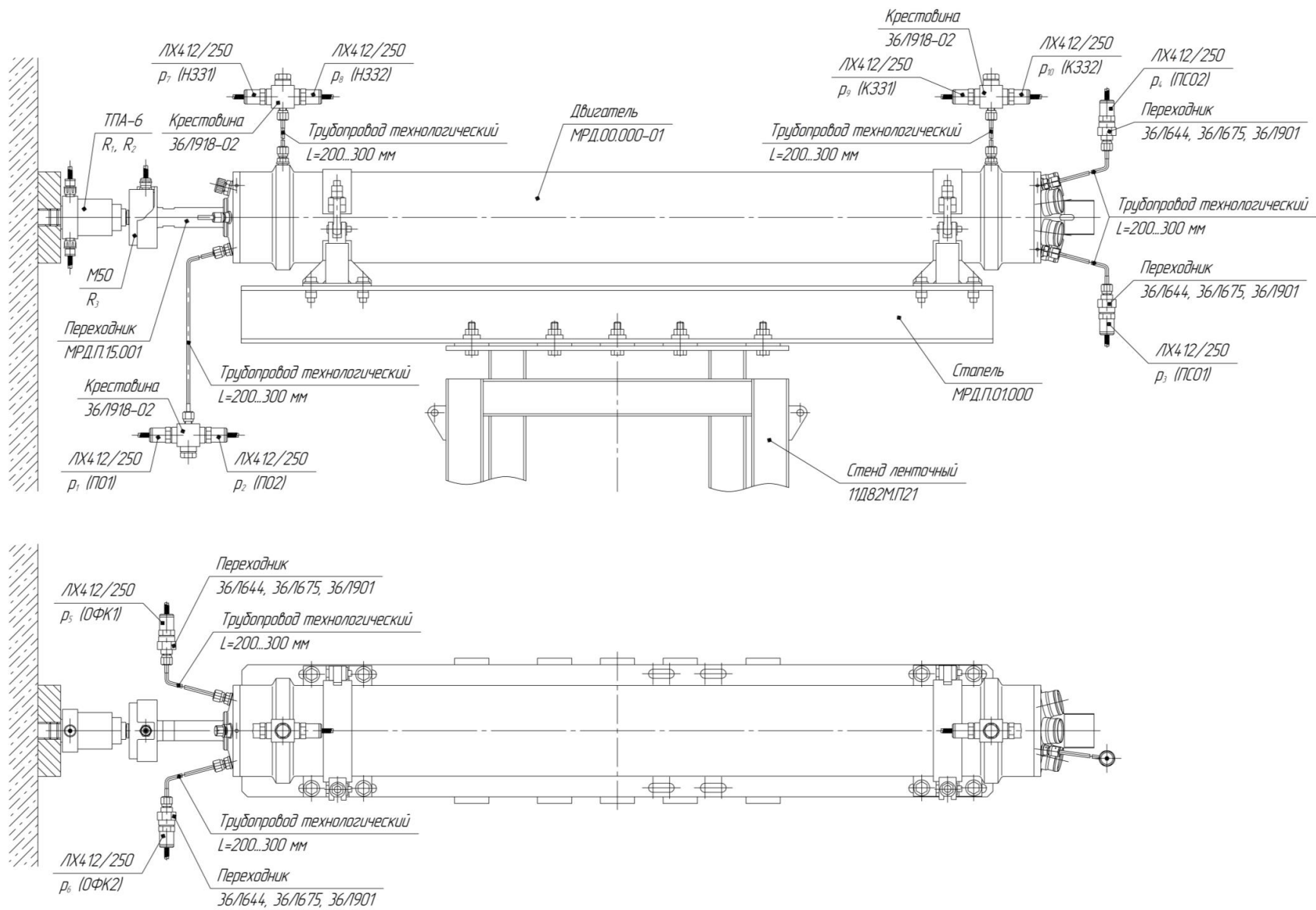


Рис. 2.3 – Монтаж телеметрического исполнения двигателя на станцию

## 2.3 Программа на проведение испытаний

На основании приведенной выше программы и методики испытаний разработана программа на проведение испытаний.

### 1. Задание на испытание

#### 1.1 Цель испытаний:

1.1.1 Сборка изделий для проведения предварительных испытаний (ОСИ).

1.1.2 Проведение ОСИ изделия с целью оценки соответствия ВБП и ЭП требованиям ТЗ согласно программы и методики

1.1.3 Разборка, осмотр и дефектация изделия (6 шт.) после ОСИ в соответствии с программой и методикой.

#### 1.2 Мат. часть

Телеметрическое исполнение двигателя, в количестве – 6 шт., особенности конструкции - нет.

#### 1.3 Основное изделие

Заряд ТРТ, состав №2, покрытие ЭТАЛ-148-ТГ-2Н-1 (заряд, бронированный по наружному диаметру и торцам, 149/40-1313 мм), в количестве - 6 шт. (1 шт. на одно изд.), особенности конструкции - нет.

#### 1.4 Дополнительное изделие

Воспламенитель, марка состава КЗДП-2 / БРТТ БМС, кол-во 6 комплектов (1 комплект на одно изд.), особенности конструкции – нет.

#### 1.5 Средство инициирования

Пиропатрон ДП4-3, кол-во - 6 шт. (1 шт. на одно изд.).

#### 1.6 Документация

1.6.1 Программа и методика предварительных испытаний;

1.6.2 Комплект КД.;

#### 1.7 Сборка

1.7.1 Сборку изделия проводить в соответствии с КТД и учетом КД по п. 1.6.

1.7.2 Установку датчиков давления ЛХ на изделие производить в соответствии с программой и методикой.

1.7.3 Установку датчиков тяги на изделие производить на стенде.

## 1.8 Транспортирование и погрузочно-разгрузочные работы

Транспортирование и погрузочно-разгрузочные работы на территории ИС-36 производить в соответствии с инструкциями технологическими картами. Допускается транспортирование изделия производить в стапеле.

## 1.9 Термостатирование

1.9.1 Для ОСИ №№ 1, 3, 5 изделия термостатировать при температуре плюс 50 С,с выдержкой не менее 36 часов.

1.9.2 Для ОСИ №№ 2, 4, 6 изделия термостатировать при температуре минус 40 С,с выдержкой не менее 36 часов.

### Примечания

1 Время от момента выгрузки изделия из термостата до начала испытания - не более 30 минут.

2 При превышении этого времени не более чем в два раза, изделие повторно термостатировать не менее 6 часов, а более чем в два раза - не менее 12 часов.

## 1.10 Испытание

1.10.1 ОСИ изделия проводить на стенде с применением системы ПУЗ12. Сценарии испытаний должны быть согласованы с ведущим исполнителем.

1.10.2 Датчики тяги установить на изделие в соответствии с программой и методикой.

1.10.3 Стапель с изделием установить на стенд ленточный и закрепить.

1.10.4 Стапель с изделием, закрепленный на стенде ленточном, расположить в соответствии с программой и методикой и закрепить на столе испытательном стенда.

1.11 Измеряемые параметры, кол-во датчиков, места их установки, расчетные значения измеряемых параметров

1.11.1 Измеряемые параметры - давления ( $P_1 \dots P_{10}$ ), тяга ( $R_1, R_2$ ).  
Количество - десять датчиков давления ЛХ-412/250, датчики тяги: ТПА-6 (1 шт.) и М50 (1 шт.), три крестовины 36Л918-02, четыре переходника под датчики давления ЛХ-412/250, семь трубопроводов  $L=(200 - 300)$  мм.

1.11.2 Ожидаемые значения -  $P_{\max} = 180$  кгс/см,  $R_{\max} = 3750$  кгс.

1.11.3 Частота опроса - 1000 Гц.

1.11.4 Длительность регистрации процесса не менее 11 секунд.

1.12 Ожидаемые аномалии при проведении испытаний

Аномалий не ожидается.

1.13 Требования к обработке параметров, интервал и шаг выдачи результатов

В соответствии с программой и методикой.

1.14 Требования к осмотру после испытаний

Разборку, осмотр и дефектацию производить в соответствии с программой и методикой.

1.15 Отчетность по результатам испытаний

По результатам проведения каждого ОСИ выпустить протокол в соответствии с требованиями программы и методики.

1.16 Требования ТБ и ПБ

Работы проводить в соответствии с "Положением о производственном контроле за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах предприятия" , работниками, обученными и аттестованными в установленном порядке в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности - "Правила безопасности при взрывных работах".

## **2.4 Опытные данные**

В результате обработки опытных данных, полученных в результате проведения ОСИ в соответствии с ПМ «Подтверждение ВБП и ЭП» получены кривые тяги и давления в температурном диапазоне эксплуатации. Численные значения ВБП представлены в таблицах 1.1 и 1.2 приложения Б.

Для нижнего и верхнего температурного уровня эксплуатации (от минус 40°C до плюс 50°C) получены следующие кривые:

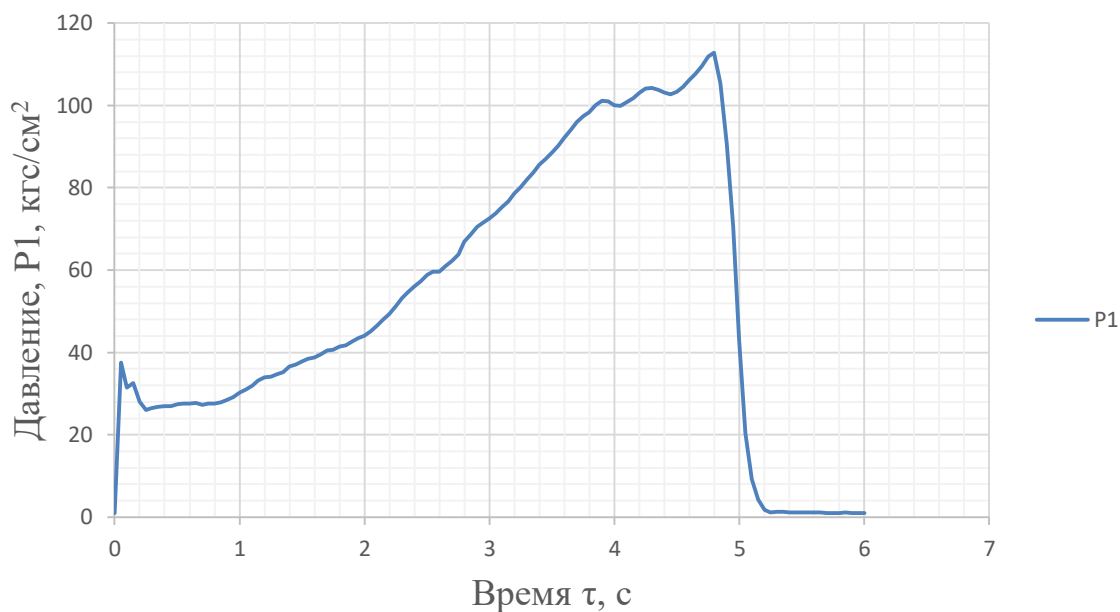


Рисунок 2.4 – зависимость давления от времени работы при  $T=-40^{\circ}\text{C}$

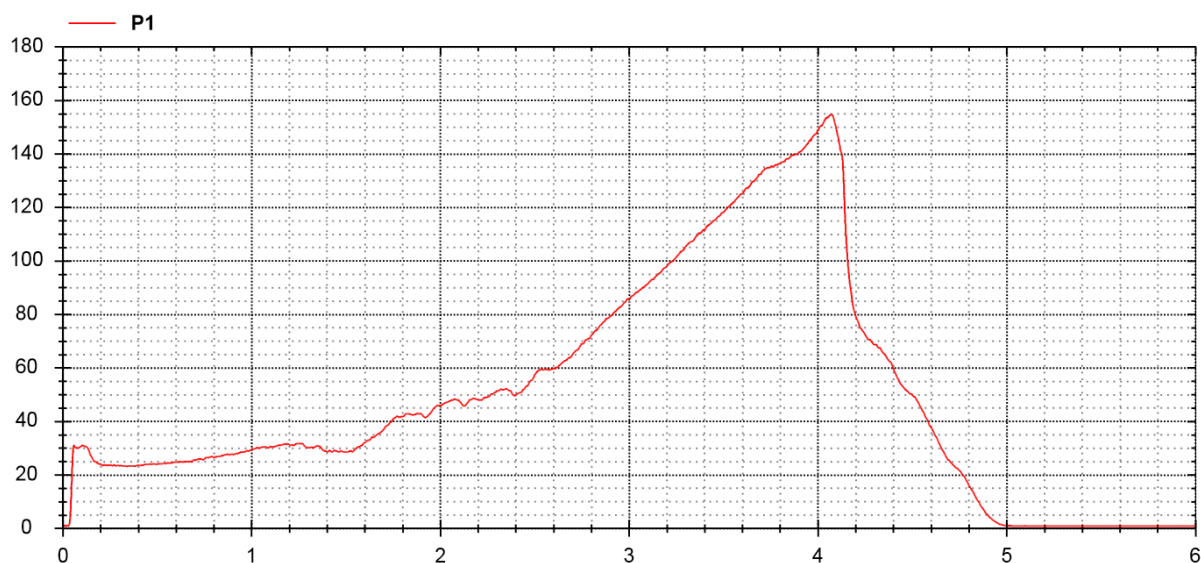


Рисунок 2.5 – зависимость давления от времени работы при  $T=+50^{\circ}\text{C}$

### Закключение к исследовательской части

В результате обработки ряда экспериментальных данных были получены кривые тяги и давления двигателя в эксплуатационном диапазоне температур. Оценка результатов произведена на основании программы и

методики огневых стендовых испытаний, предназначенной для определения внутрибаллистических и энергетических параметров.

Полученные кривые соответствуют требованиям технического задания.

### **3 Технологическая часть**

#### **Введение**

В данном разделе рассмотрен технологический процесс изготовления передней крышки ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) путем механической обработки. Конструктивное исполнение изделия подразумевает наличие разъемных соединений с последующей установкой иницирующего изделия и штуцера.

Крышка предназначена для работы в термонапряженных условиях и в условиях высокого давления:

- давление в камере достигает 16,61 МПа;
- температура в камере достигает 2750 К;

Крышка должна иметь минимальную массу. Предназначена как для отработки РДТТ, так и для непосредственного производства РДТТ. В разделе представлены технические требования на изготовление детали; данные по материалу детали – марка, свойства, основные операции технологического процесса изготовления детали.

#### **3.1 Проектирование технологического процесса изготовления детали**

##### **3.1.1 Назначение детали, анализ технических требований**

Деталь – крышка передняя предназначена для

Рабочий чертеж детали содержит все данные, необходимые для ее изготовления: проекции, разрезы, сечения, обеспечивающие полное освещение конструкторской формы детали; размеры с указанием допустимых отклонений; параметры шероховатости обрабатываемых поверхностей; допустимые пространственные отклонения во взаимном положении элементарных поверхностей детали; материал, применяемый для изготовления детали; прочие технические требования, предъявляемые к детали и ее элементам.

### 3.1.2 Анализ технологичности

1. Анализ конструкции по геометрической форме поверхностей. Деталь состоит из различных поверхностей, таких как плоские, цилиндрические, фасонные и резьбовые поверхности. Фасонные поверхности присутствуют. Конструкция детали препятствует обработке наиболее точных поверхностей, требуется проектирование специальных приспособлений для изготовления определенных поверхностей (условия врезания и выхода режущего инструмента обеспечены).

Качественная оценка – допустимо.

2. Удобство установки на станке. Имеются удобные базовые поверхности:

- наружная цилиндрическая;
- внутренняя цилиндрическая;
- плоские (торцевые поверхности);
- предусмотрены радиальные отверстия для монтажа изделия в кондукторе.

Качественная оценка – хорошо.

3. Удобство обработки. Обеспечен свободный подвод (отвод) инструмента. Однако, наличие сквозного отверстия под углом к оси детали осложнено, что предполагает сверление его с использованием кондуктора, закрепленном в универсальной делительной головке.

Качественная оценка – допустимо.

4. Оценка технологичности конструкции по простановке размеров.

Простановка некоторых размеров на чертеже детали не обеспечивает возможность выполнения обработки по принципу автоматического получения размеров на настроенных на размер станках, также на чертеже детали измерительная и технологическая базы не для всех размеров совмещены. То есть для обработки на настроенных на размер станках требуется выполнить расчеты и посчитать технологические размерные цепи. Допустимые предельные отклонения размеров, а также допускаемые



отклонения формы и расположения поверхностей не завышены и вполне выполнимы. Качественная оценка – допустимо.

5. Материал детали «Крышка передняя» - сталь 30ХГСА. Данный материал легко подвергается обработке резанием. Качественная оценка – хорошо.

### **3.1.3 Выбор метода изготовления**

Днища подразумевают установку специальных изделий, необходимых для работы РДТТ, то изготовление их из композиционных материалов представляет собой сложную и комплексную задачу. В условиях ТЗ разрабатываемого двигателя применяются конструкционные материалы.

В зависимости от инструмента, используемого для механической обработки металла, выделяют такие виды обработки резанием: точение, фрезерование, сверление, строгание, долбление, шлифование.

Для изготовления крышки используются такие операции как точение и сверление.

Для получения необходимых параметров детали важны элементы резания:

1. Скорость резания – это скорость перемещения режущей кромки инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Скорость резания складывается из окружной скорости вращения заготовки и скорости подачи, последней пренебрегают.

2. Подача – величина перемещения резца за один оборот обрабатываемой заготовки. Различают продольную, поперечную и наклонную подачи в зависимости от перемещения резца параллельно, перпендикулярно и под углом к линии центров.

3. Глубина резания – толщина снимаемого за один рабочий ход (проход) слоя металла, измеряемая по перпендикулярному к обрабатываемой поверхности заготовки.

### 3.1.4 Выбор материала

Прогресс РКТ привел к существенному снижению массы конструкции двигателя. Значительную роль в этом сыграли композиционные материалы. Однако, по причинам, описанным в выборе метода изготовления, повсеместное применение композиционных материалов на данный момент недоступно. Помимо этого, стоимость производства ответственных деталей сложной геометрической формы высока, по сравнению с применением конструкционных материалов.

В результате выбрана сталь 30ХГСА.

### 3.1.5 Свойства материала

Конструкционная сталь 30ХГСА относится к группе легированных сталей. Представляет собой сплав в состав которого входят следующие легирующие элементы: хром, марганец и кремний. Она является улучшенной сталью, прошедшей закалку в масле и высокий отпуск с температурой от 550 °С до 660 °С в воде или масле.

Сталь 30ХГСА устойчива к коррозии и ударам, обладает умеренной вязкостью. Недостатком данной стали является относительно небольшая прокалываемость и чувствительность к отпускной хрупкости 1 и 2 рода.

Таблица 3.1 – Процентный химический состав стали

| Углерод   | Кремний | Марганец | Никель | Сера     | Фосфор   | Хром    | Медь   | Железо |
|-----------|---------|----------|--------|----------|----------|---------|--------|--------|
| 0,28-0,34 | 0,9-1,2 | 0,8-1,1  | до 0,3 | до 0,025 | до 0,025 | 0,8-1,1 | до 0,3 | ~96    |

Таблица 3.2 – Свойства материала

| $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , ГПа | $\rho/\sigma_B$ |
|----------------------------|------------------|-----------------|
| 7,85                       | 1,08             | 137,58          |

Сочетание таких свойств обуславливает применение стали 30ХГСА в промышленности для различных улучшаемых деталей: валы, оси, зубчатые колеса, фланцы, корпуса обшивки, лопатки компрессорных машин, рычаги,

толкатели, ответственные сварные конструкции, работающие при знакопеременных нагрузках, крепежные детали.

### 3.2 Технологический процесс

Таблица 3.3 – технологический процесс производства детали «Крышка передняя»

| №  | Наименование и содержание перехода                                 | Оборудование                | Режущий инструмент  | Измерительный инструмент                  |
|--|--|-----------------------------|---|---|
| Операция 005. Отрезная   |  |                             |   |   |
| 01   | Отрезать заготовку Ø170 длиной 60 для изготовления детали          | Пила режущая Jet HVBS-812RK | Полотно - 3/4, комбинированные зубья с положительным уклоном 9°-10° | -   |
| Операция 010. Токарная предварительная с припуском 2 мм на сторону |  |                             |   |   |
| 01   | Установить заготовку в трехкулачковый патрон с обратными кулачками | 16K20                       | -   | -   |
| 02   | Обработать торцевую поверхность                                    | 16K20                       | Резец проходной отогнутый (T15K6)                                   | -   |
| 03   | Обработать наружную поверхность Ø156 на длину 30                   | 16K20                       | Резец проходной упорный (T15K6)                                     | Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 04   | Обработать наружную поверхность Ø164 на длину 18                   | 16K20                       | Резец проходной упорный (T15K6)                                     | Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89 |

Таблица 3.3 –продолжение

|   |   |       |                                   |   |
|---|---|-------|-----------------------------------|---|
| 05  | Обработать отверстие Ø20 на длину 20                        | 16K20 | Сверло Ø20 (P18)                  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89                                     |
| 06  | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø137х Ø65 с углом 20° | 16K20 | Резец расточной фасонный (T15K6)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1<br>Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89 |
| 07  | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø137х Ø64 с углом 20° | 16K20 | Резец расточной фасонный (T15K6)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1<br>Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89 |
| 08  | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø137х Ø82 с углом 20° | 16K20 | Резец расточной фасонный (T15K6)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1<br>Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89 |
| 09  | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø137х Ø82 с углом 20° | 16K20 | Резец расточной фасонный (T15K6)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1<br>Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89 |
| Операция 015. Токарная предварительная с припуском 2мм на сторону |   |       |                                   |   |
| 01  | Установить деталь за обработанный торец Ø156                | 16K20 | -                                 | -   |
| 02  | Обработать торцевую поверхность в размер 57                 | 16K20 | Резец проходной отогнутый (T15K6) | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89                                  |
| 03  | Обработать Ø140 на длину 11                                 | 16K20 | Резец подрезной (T15K6)           | Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89                                |

Таблица 3.3 –продолжение

|                                      |   |   |                                 |  |
|--------------------------------------|---|---|---------------------------------|--|
| 04                                   | Расточить отверстие Ø20 на длину 20   | 16K20                                   | Сверло Ø20 (P18)                | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89                      |
| 05                                   | Расточить отверстие Ø44 на длину 20   | 16K20                                   | Резец расточной упорный (T15K6) | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89                      |
| 06                                   | Расточить отверстие Ø50 на длину 20   | 16K20                                   | Резец расточной упорный (T15K6) | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89                      |
| Операция 020. Термическая            |   |   |                                 |  |
| 01                                   | Закалить заготовку HRC 36...38. Закалку проводить при температуре 870-890°C в масле. Проводить совместно с образцами. | Каменная печь для термообработки ПКЭ-25 | -                               | -  |
| 02                                   | Отпуск проводить при температуре 520-550°C в воде или масле. Проводить совместно с образцами.                         | Каменная печь для термообработки ПКЭ-25 | -                               | Твердомер ТР по ГОСТ 23677-79. Наконечник НК по ГОСТ 9377-81 |
| Операция 025. Токарная окончательная |   |   |                                 |  |
| 01                                   | Установить заготовку в трехкулачковый патрон с обратными кулачками  | 16K20                                   | -                               | -  |

Таблица 3.3 –продолжение

|    |  |       |  |  |
|----|--|-------|--|--|
| 02 | Обработка торцевой поверхности                   | 16K20 | Резец проходной отогнутый (Т5К10)                | -  |
| 03 | Обработать наружную поверхность Ø153 на длину 30 | 16K20 | Резец проходной упорный (Т5К10)                  | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 04 | Обработать наружную поверхность Ø152 на длину 30 | 16K20 | Резец проходной упорный (Т5К10)                  | -  |
| 05 | Обработать наружную поверхность Ø161 на длину 12 | 16K20 | Резец проходной упорный (Т5К10)                  | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 06 | Обработать наружную поверхность Ø160 на длину 12 | 16K20 | Резец проходной упорный (Т5К10)                  | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 07 | Обработать кольцевую канавку                     | 16K20 | Резец канавочный специальный с радиусами (Т5К10) | Шаблон кольца                            |
| 08 | Нарезать резьбу Сп М152х2-6g                     | 16K20 | Резец резьбовой наружный с углом 60° (Т5К10)     | Шаблон 60°                               |
| 09 | Расточить Ø32 на глубину 22                      | 16K20 | Резец расточной упорный (Т5К10)                  | Штангенциркуль ШЦ-І-125-0,1 ГОСТ 166-89  |

Таблица 3.3 –продолжение

|    |  |       |   |   |
|----|--|-------|---|---|
| 10 | Расточить Ø33 на глубину 22,5                                  | 16K20 | Резец расточной упорный с радиусом при вершине R2 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 11 | Торцевать от Ø33 на глубину 22,5 (поперечная подача)           | 16K20 | Резец расточной упорный с радиусом при вершине R2 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 12 | Расточить Ø45 на глубину 10,5                                  | 16K20 | Резец расточной упорный (T5K10)                           | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 13 | Расточить Ø46,9 на глубину 10,5                                | 16K20 | Резец расточной упорный (T5K10)                           | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 14 | Снять фаску 1x45°  | 16K20 | Резец расточной отогнутый (T5K10)                         | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 15 | Точить канавку Ø48,5 шириной 4                                 | 16K20 | Резец расточной канавочный (T5K10)                        | -   |
| 16 | Нарезать резьбу М48х1-7Н                                       | 16K20 | Резец резьбовой внутренний с углом 60° (T5K10)            | Шаблон 60° Калибр – пробка М48х1-7Н       |
| 17 | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø64х Ø61 на глубину 11,5 | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10)                     | Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 18 | Торцевать Ø69х Ø90 на глубину 11,5                             | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10)                     | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |

Таблица 3.3 – продолжение

|                                      |  |       |                                       |  |
|--------------------------------------|--|-------|---------------------------------------|--|
| 19                                   | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø61х Ø60 на длину 12     | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 20                                   | Торцевать Ø64х Ø90 на глубину 12                               | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-И-125-0,1 ГОСТ 166-89  |
| 21                                   | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø141 на глубину 20,5     | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 22                                   | Торцевать Ø141х Ø80 под углом 20°                              | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 23                                   | Обработать фасонную кольцевую канавку Ø142 на глубину 21       | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 24                                   | Торцевать Ø142х Ø80 под углом 20°                              | 16K20 | Резец расточной фасонный с R4 (T5K10) | Штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 25                                   | Снять фаску 1,6х45°  | 16K20 | Резец расточной отогнутый (T5K10)     | Штангенциркуль ШЦ-И-125-0,1 ГОСТ 166-89  |
| 26                                   | Снять фаску 2х45°  | 16K20 | Резец расточной отогнутый (T5K10)     | Штангенциркуль ШЦ-И-125-0,1 ГОСТ 166-89  |
| Операция 030. Токарная окончательная |  |       |                                       |  |
| 01                                   | Установить деталь в обратные сырые кулачки за резьбу СП М152х2 | 16K20 | -                                     | -  |



Таблица 3.3 –продолжение

|    |  |       |                                    |   |
|----|--|-------|------------------------------------|---|
| 02 | Торцевать в размер L=53,5                    | 16K20 | Резец проходной отогнутый (T5K10)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 03 | Торцевать в размер L=53                      | 16K20 | Резец проходной отогнутый (T5K10)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 04 | Торцевать в размер L=51 до Ø67 с R2          | 16K20 | Резец радиусной с R2 (T5K10)       | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 05 | Обработка конической поверхности 105°        | 16K20 | Резец радиусной с R10 (T5K10)      | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 06 | Торцевать на L=10,5 с обработкой конуса 105° | 16K20 | Резец радиусной с R10 (T5K10)      | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 07 | Торцевать на L=11 с обработкой конуса 105°   | 16K20 | Резец радиусной с R10 (T5K10)      | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 08 | Обработать Ø158 и конус 10°                  | 16K20 | Резец проходной упорный (T5K10)    | Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89 |
| 09 | Расточить отверстие Ø53 на L=20              | 16K20 | Резец расточной упорный (T5K10)    | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 10 | Расточить отверстие Ø53,8 на L=20            | 16K20 | Резец расточной упорный (T5K10)    | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |
| 11 | Расточить канавку b=4 до Ø57                 | 16K20 | Резец расточной канавочный (T5K10) | -   |
| 12 | Снять фаску 2x45°                            | 16K20 | Резец расточной отогнутый (T5K10)  | Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89   |

Таблица 3.3 – продолжение

|                           |   |  |   |   |
|---------------------------|---|--|---|---|
| 13                        | Нарезать резьбу<br>М56х2-7Н   | 16К20  | Резец резьбовой<br>наружный с<br>углом 60°<br>(Т5К10) | Шаблон 60°<br>Калибр – пробка<br>М56х2-7Н       |
| Операция 035. Контрольная |   |  |   |   |
| Операция 040. Слесарная   |   |  |   |   |
| 01                        | Разметить<br>центра<br>отверстий с<br>резьбами<br>М22х1,5-7Н,<br>М12х1-7Н и 4<br>отверстия Ø6 | Универсальная<br>делительная<br>головка<br>УДГ-200<br>ГОСТ 8615-89 | -   | Штангенциркуль<br>ШЦ-II-250-0,05<br>ГОСТ 166-89 |
| 02                        | Просверлить 4<br>отверстия Ø6 на<br>глубину 5±0,5   | Вертикально-<br>сверлильный<br>станок 2Н135                        | Сверло Ø6<br>(Р6М5)                                   | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| Операция 045. Контрольная |   |  |   |   |
| Операция 050. Расточная   |   |  |   |   |
| 01                        | Расточить<br>отверстие Ø18<br>на глубину 23   | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Сверло Ø18<br>(Р6М5)                                  | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| 02                        | Расточить<br>отверстие Ø20,1<br>на глубину 23   | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Резец расточной<br>упорный (Т5К10)                    | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| 03                        | Расточить Ø20,3<br>на глубину 21  | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Резец расточной<br>упорный (Т5К10)                    | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| 04                        | Расточить Ø26<br>на глубину 3   | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Резец расточной<br>упорный (Т5К10)                    | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| 05                        | Расточить Ø22,2<br>на глубину 3   | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Резец расточной<br>упорный (Т5К10)                    | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89   |
| 06                        | Расточить<br>канавку<br>шириной 3 до<br>Ø22,7   | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А                         | Расточной<br>канавочный<br>(Т5К10)                    | -   |

Таблица 3.3 – продолжение

|  |   |  |   |   |
|--|---|--|---|---|
| 07                                     | Нарезать резьбу<br>М22х1,5-7Н   | -  | Метчик<br>М22х1,5-7Н                    | Калибр – пробка<br>М22х1,5-7Н                 |
| 08                                     | Обработать<br>отверстие Ø4<br>насквозь  | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А | Сверло Ø4<br>(Р6М5)                     | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89 |
| 09                                     | Обработать<br>отверстие Ø10,9<br>на глубину 28                                  | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А | Сверло Ø10,9<br>(Р6М5)                  | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89 |
| 10                                     | Расточить<br>отверстие Ø12,2<br>на глубину 6                                    | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А | Резец расточной<br>отогнутый<br>(Т5К10) | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89 |
| 11                                     | Расточить<br>отверстие Ø16<br>на глубину 2                                      | Координатно-<br>расточной<br>станок 2Е440А | Резец расточной<br>упорный (Т5К10)      | Штангенциркуль<br>ШЦ-I-125-0,1<br>ГОСТ 166-89 |
| 12                                     | Нарезать резьбу<br>М12х1-7Н   | -  | Метчик<br>М12х1-7Н                      | Калибр – пробка<br>М12х1-7Н                   |
| Операция 055. Слесарная                |   |  |   |   |
| 01                                     | Сверлить<br>отверстие Ø6<br>под углом<br>62°30',<br>используя<br>приспособление | Радиально<br>сверлильный<br>станок 2Л53У   | Сверло Ø6<br>(Р6М5)                     | -   |
| Операция 060. Контрольная              |   |  |   |   |
| Операция 065. Гальваническая обработка |   |  |   |   |
| 01                                     | Покрытие<br>хим.фос.  | -  | -                                       | -   |

### 3.3 Расчет режимов резания. Техническое нормирование

При назначении элементов режимов резания учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования, его возможности.

Скорость резания – обозначается  $v$ , измеряется в метрах в минуту (м/мин) рассчитывается по формуле:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000};$$

где D – диаметр обрабатываемой заготовки, мм; n – частота вращения заготовки, об/мин.

Подача – обозначается буквой s. При черновой обработке выбирается максимально возможная подача, исходя из жесткости и прочности системы (станок - приспособление - инструмент - деталь) мощности привода станка, прочности твердосплавной пластинки и других ограничивающих факторов. При чистовой обработке выбирается в зависимости от степени точности и шероховатости обработанной поверхности.

Глубина резания – обозначается t, измеряется в миллиметрах и вычисляется по формуле:

$$t = \frac{D - d}{2};$$

где D – диаметр детали до обработки, d – диаметр после снятия резцом 1 слоя.

#### Расчет режимов резания для операции 010:

Операция 010 Токарная. Материал заготовки сталь 30ХГСА.

Паспортные данные станка 16К20:

Частота вращения шпинделя  $n=12,5 \dots 2000$  об/мин.

Диапазон подач S, мм/об:

- по оси координат x –  $0,7 \dots 4,16$ ;
- по оси координат z –  $0,035 \dots 2,08$ .

Мощность привода главного движения – 10 кВт.

Диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя с постоянной мощностью (в об/мин) –  $1500 \dots 4500$ .

Для обработки стали выбираем резцы:

- проходной отогнутый (Т15К6);
- проходной упорный (Т15К6);
- расточной фасонный (Т15К6).
-

## Переход 2.

Обработка торца и получение длины детали 59h11.

Припуск составляет 1 мм, глубина резания  $t = 1$  мм, число рабочих ходов  $i = 1$ .

Обработка

$$t = 1$$

Подача на оборот  $S_0 = 0,5$  мм/об. Табличное значение скорости для подрезания

Поправочные коэффициенты для подачи.

$K_{S_u} = 0,8$  – поверхность с коркой

$K_{S_H} = 1$  – материал инструмента – твердый сплав

$K_{S_{\text{ж}}} = 1$  – диаметр обрабатываемой поверхности

$K_{S_u} = 1,25$  – коэффициент обрабатываемого материала

$$S = s \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,25 = 0,32 \text{ мм/об}$$

Согласно таблице при  $t = 1$  и  $S = 0,32$  мм/об скорость  $V_1 = 186$  м/мин

Поправочные коэффициенты на скорость резания при точении

на обрабатываемость  $K_{V_M} = 0,8$

на материал инструмента (Т5К10)  $K_{V_u} = 0,65$

на главный угол в плане ( $75^\circ$ )  $K_{V_\phi} = 0,86$

на отношение диаметров  $K_V = 1,2$

на состояние поверхности (с коркой)  $K_{V_M} = 0,85$

на условие обработки (со смазывающее-охлаждающей жидкостью)

$$K_{V_O} = 1$$

Расчетное значение скорости резания

$$V_p = V_T \cdot K_V = V_T \cdot K_{V_M} \cdot K_{V_u} \cdot K_{V_\phi} \cdot K_{V_1} \cdot K_{V_{II}} \cdot K_{V_O}$$

$$V_p = 186 \cdot 0,8 \cdot 0,65 \cdot 0,86 \cdot 1,2 \cdot 0,85 = 85 \text{ м/мин};$$

Расчетная частота вращения

$$n_p = \frac{1000 \cdot 85}{45 \cdot \pi} = 601 \text{ об/мин}$$

Основное время резания

$$t_0 = \frac{45 \cdot 1}{45 \cdot 186} = 0,23 \text{ мин.}$$

Дальнейшие расчеты производились аналогично, численные значения результатов расчета приведены в соответствующих таблицах на листах графической части выпускной квалификационной работы.

*Производительность труда* определяется количеством деталей, изготавливаемых в единицу времени, или количеством времени, затрачиваемым на выполнение заданной работы.

Время, в течении которого должна быть выполнена определенная работа, называется *нормой времени*.

Количество продукции, которое должно быть изготовлено в единицу времени – называется *нормой выработки*.

Норму времени подсчитывают, исходя из наилучшей организации труда и рабочего места, наиболее эффективного использования станка и инструмента, применения наиболее производительных режимов резания и учета опыта передовых токарей. Такая норма называется *технической нормой времени*.

Техническая норма времени на выполнение токарной операции складывается из подготовительно-заключительного времени на партию деталей или штучного времени на изготовление одной детали.

Основным  $T_{\text{осн}}$  называется время, на протяжении которого происходит резание. Оно может быть машинным, если вращение заготовки и подача инструмента осуществляется станком, машинно-ручным, если вращение осуществляется станком, а подача инструмента ручная, и ручным.

$$T_{\text{осн}} = \frac{L \cdot i}{s \cdot n} \text{ мин}$$

где  $s$  – подача инструмента, мм/об;  $n$  - частота вращения шпинделя, об/мин;  $L$  - расчетная длина обработки, мм;  $i$  - число рабочих ходов.

Вспомогательным  $T_{\text{всп}}$  называется время, затрачиваемое на выполнение действий, обеспечивающих выполнение основной работы и повторяющихся

при обработке каждой заготовки (установка, закрепление, снятие заготовки, управление станком, перестановка инструментов и т.д.).

Сумма основного и вспомогательного времени образуют оперативное время  $T_{оп}$ .

$$T_{оп} = T_{осн} + T_{всп}.$$

Рассмотрим расчет технической нормы времени для операции 010, перехода 02:

$$T_{осн} = \frac{L \cdot i}{s \cdot n} = \frac{85 \cdot 1}{0,3 \cdot 500} = 0,566 \text{ мин} = 34 \text{ с}$$

$$T_{всп} = 120 \text{ с}$$

$$T_{оп} = T_{осн} + T_{всп} = 34 + 120 = 154 \text{ с}$$

### 3.4 Приспособление

Рассматриваемое в данном разделе приспособление – кондуктор.

Кондуктор – это устройство, служащее для направления инструмента, либо положения деталей. Часто он применяется при сверлении отверстий в деталях. Однако, существуют кондукторы для сборки (сварки), фрезерования и др.

Деталь располагается в кондукторе или под кондуктором. Направляющие втулки кондуктора определяют положение режущего инструмента относительно корпуса и, следовательно, относительно обрабатываемой детали. Положение оси отверстия каждой втулки отвечает положению оси отверстия в детали, а диаметр отверстия втулки соответствует диаметру инструмента. Использование кондуктора исключает операцию разметки и позволяет вести обработку одновременно двух и более отверстий, повышая, при этом, производительность труда.

Конструкция кондуктора зависит от размеров ,числа отверстий, их расположения, формы и назначения детали.

С целью снижения стоимости изготовления кондуктора проводится широкая нормализация деталей и основных узлов кондуктора.

Основные виды кондуктора: коробчатый, накладной, комбинированный.

Важный элемент – кондукторная втулка. Это элемент устройства для направления сверла. Конец втулки должен быть как можно ближе к детали для уменьшения погрешности.

Различают следующие виды стандартных втулок:

1. постоянные;

1.1 без бурта

1.2 с буртом

2. сменные

3. быстросменные.

Сама втулка должна быть достаточно прочной и износостойкой, например, из закаленной стали 40Х. Выбрана постоянная втулка без бурта, подобрана по ГОСТ 18429-73. Они применяются тогда, когда отверстие на операции обрабатывается лишь одним инструментом (сверлом или зенкером), как и в нашем случае. При установке в кондукторную плиту они запрессовываются Н7/п6.

Кондуктор является необходимым приспособлением, определяющим точность, качество и возможность изготовления детали в конечном виде.

Необходимость его использования связана с сверлением внутреннего сквозного отверстия в цилиндрической поверхности под углом, не соответствующим углу подачи режущего инструмента.



## **4 Охрана труда и экология**

### **4.1 Экологическая безопасность разрабатываемого двигателя**

#### **4.1.1 Анализ неблагоприятных факторов при испытаниях**

Работы, выполняемые в процессе подготовки и проведения испытаний, являются огне- и взрывоопасными, поэтому на испытательных участках необходимо осуществлять специальный режим техники безопасности.

При проведении испытаний изделия возможны следующие факторы, загрязняющие окружающую среду и представляющие опасность для персонала:

1. Выброс продуктов сгорания в атмосферу, загрязнения почвы;
2. Акустическое воздействие;
3. Вибрация;
4. Возможные возгорания в процессе работы;
5. В процессе эксплуатации изделия может произойти воздействие

потока продуктов сгорания на взрывчатые вещества.

#### **4.1.2 Общие требования экологической безопасности**

В связи с разработкой принципиально новых систем техники представляется важным обеспечение экологической безопасности при проведении работ на этапах изготовления, хранения, испытания и эксплуатации изделий, а также утилизации зарядов после истечения сроков их технической пригодности.

Производство изделий, их испытание, уничтожение отходов производства, а также утилизации зарядов после истечения сроков их технической пригодности на открытых площадках методом сжигания являются источниками загрязнения окружающей среды токсичными веществами.

Проведение открытых огневых испытаний заряда и уничтожение отходов производства на площадках сопровождаются выбросами сложного комплекса химических соединений в газоаэрозольной фазе, загрязняющих окружающую среду.

Экологическая безопасность обеспечивается соблюдением следующих требований:

1 В процессе изготовления и хранения изделий не должны выделяться в производственные помещения вредные вещества с превышением предельно-допустимых концентраций для воздуха рабочей зоны.

2 В процессе испытаний изделия и его уничтожения методом сжигания не должны превышать требования предельно-допустимых выбросов (ПДВ), установленных для предприятия. При соблюдении этих требований на границе санитарно-защитной зоны предприятия предельно-допустимые концентрации вредных веществ не превышают норм, установленных для воздуха населенных пунктов.

Исследования по обеспечению экологической безопасности при производстве и эксплуатации изделия включают следующие этапы:

- оценка количественного и качественного состава веществ, выделяющихся при производстве и хранении изделия; токсикологическая оценка продуктов газовой выделения в процессе хранения и эксплуатации;

- разработка мероприятий по обеспечению безопасных условий труда персонала в процессе сборки, хранения и обслуживания изделий;

- определение состава продуктов сгорания изделия на воздухе при испытаниях и эксплуатации;

- токсикологическая оценка продуктов сгорания изделия на воздухе, составление прогноза отрицательного воздействия продуктов сгорания на объекты окружающей среды и разработка рекомендаций по обеспечению экологической безопасности на этапах изготовления, испытания и утилизации.

#### **4.1.3 Обеспечение экологической безопасности персонала при работе с изделием**

Оценка возможного отрицательного воздействия на обслуживающий персонал и объекты окружающей среды проводилась на основании анализа используемого в заряде баллиститного состава.

Большинство компонентов состава используются в обычных баллиститных твердых топливах, их токсикологические характеристики, а также мероприятия по защите персонала и охране окружающей среды при изготовлении, хранении и испытании изделий хорошо изучены и приведены в соответствующей технологической документации.

В таблице 4.1 приведены токсикологические характеристики для основных компонентов состава №1

Таблица 4.1 – Токсикометрические\* характеристики основных компонентов состава №1

| Вещество                        | Воздух          |   |  |   |   | Вода водоемов     |            | Ссылка на источник    |
|---------------------------------|-----------------|---|--|---|---|-------------------|------------|-----------------------|
|                                 | Класс опасности | Воздух атмосферный                                  |  | Воздух рабочей зоны                               |   | Класс опасности   | ПДКв, мг/л |                       |
|                                 |                 | ПДК <sub>атм.в</sub> мг/м <sup>3</sup> (с/суточная) | ПДК <sub>атм.в</sub> мг/м <sup>3</sup> (разовая макс.) | ПДК <sub>р.з.</sub> мг/м <sup>3</sup> (с/сменная) | ПДК <sub>р.з.</sub> мг/м <sup>3</sup> (разовая макс.) |                   |            |                       |
| Коллоксилин                     | 4               | -   | -  | -   | -   | -                 | -          | [25]                  |
| Нитроглицерин                   | 1               | 0,001   | 0,004  | 0,02  | -   | 0,01              | -          | [18], [19]            |
| Дифениламин                     | 3               | -   |  | -   | 5,0   | 0,05              | 3          | [16],[18], [19], [21] |
| Централит (диэтилфенилмочевина) | 3               | -   | -  | -   | -   | 0,5               | 4          | [17], [26],[28]       |
| Гексоген                        | 2               | -   |  | 1,0   |   | 0,1               | -          | [19]                  |
| Дазин                           | 2               | -   |  | 0,3   |   | -                 | -          | [30]                  |
| Оксись свинца                   | 1               | 0,0003  | 0,001  | 0,005   | 0,01  | 0,03 (по иону Pb) | 2          | [23], [31]            |
| Оксись кобальта                 | 2               | 0,001   | -  | 0,5   | -   | 1,0               | -          | [18],[19], [24]       |
| Титана двуокись                 | 4               | -   | -  | 10  | -   | 0,1               | 4          | [32]                  |
| Индустриальное масло            | 3               | -   | -  | 5,0   | -   | -                 | -          | [16], [23]            |

\* « - » - норматив и класс опасности не разработаны

Таблица 4.2 – Токсикологические характеристики компонентов состава

| Вещество        | Характер действия  |
|-----------------|--|
| Нитроглицерин   | Высокотоксичное соединение. Оказывает преимущественное влияние на тонус сосудов, функцию ЦНС, гемодинамику. Обладает раздражающим действием на кожу и слизистые. Возможно острое отравление при любом пути поступления в организм: ингаляционно, через кожу и т.д. Острое отравление проявляется головной болью, головокружением, болью в области сердца, нарушением зрения, светобоязнью, жжением в горле, тошнотой, судорожными сокращениями мышц. При хроническом отравлении наблюдаются головные боли, скачки артериального давления, слабость, нарушение сна. |
| Гексоген        | Токсичен. При контакте с гексогеном отмечаются головные боли, головокружения, тошнота и сухость во рту, жажда, слабость. В более тяжелых случаях отравления возможна потеря сознания, цианоз, судороги, многократная рвота.  |
| Дазин           | Токсичен. Вызывает изменения в центральной нервной системе и в крови. Оказывает местное раздражающее действие на слизистые оболочки и кожу.  |
| Оксид свинца    | Яд, действующий на нервную систему, кровь, сосуды. Вызывает денатурацию белков и инактивацию ферментов в организме. Тяжелые отравления возникают при концентрации (9-12) мг/м <sup>3</sup> во вдыхаемом воздухе.   |
| Оксид кобальта  | Токсична. При поступлениях внутрь в количествах 20-60 мг в сутки вызывает нарушения деятельности щитовидной железы, отеки, нарушения слуха. Хроническое отравление приводит к хроническим бронхитам, пневмониям, поражениям щитовидной железы, аллергическим реакциям.   |
| Титана двуокись | Малотоксична. При длительном воздействии вызывает изменения со стороны дыхания, накапливается в тканях легких, в редких случаях вызывая диффузный пневмосклероз и фиброзы.   |

Таблица 4.2 – продолжение

|                      |  |
|----------------------|--|
| Индустриальное масло | Умеренно токсичное соединение. При длительном вдыхании паров и аэрозоли возможны развитие пневмонии и ограниченные затемнения в легких. При контакте с кожей оказывает раздражающее действие и вызывает «масляный фолликулит» в виде угрей, контактный дерматит. |
| Централит            | Умеренно опасное вещество. Действует на ЦНС, кровь, печень, щитовидную железу. Кумулятивные свойства выражены умеренно. Обладает раздражающим действием на кожу и слизистые оболочки глаз.   |
| Дифениламин          | Умеренно токсичное вещество. Поражает нервную, сердечно-сосудистую системы и систему крови. Способен проникать через кожу. Характеризуется слабыми раздражающими свойствами.   |

Наиболее опасным из указанных компонентов является нитроглицерин. Нитроглицерин (и другие нитроэфиры) относятся к 1 классу опасности. НГЦ является токсичным соединением, оказывающим преимущественное влияние на тонус сосудов, гемодинамику, функцию центральной нервной системы; при острой интоксикации – метгемоглобинемии, анемию.

Окислы свинца и кобальта, входящие в состав ЭКС, представляют собой значительно меньшую опасность в связи с низкой летучестью.

Основными рекомендациями по обеспечению экологической безопасности при производстве изделий являются: герметизация оборудования, сокращение доли ручного труда, контроль содержания вредных веществ в воздухе и сточных водах, использование общеобменной и, при необходимости, местной вытяжной вентиляции, очистка сточных вод и газовых выбросов, использование средств индивидуальной защиты.

При длительном хранении изделий на стеллажах или в закрытых контейнерах в рабочую зону практически не выделяются токсичные газы. В объеме контейнера (корпуса) при длительном хранении могут выделяться

пары нитрооксида,  $\text{NO}_2$ , а также азот и  $\text{CO}_2$ . Для нитроглицерина ПДК (воздуха рабочей зоны) составляет  $0,02 \text{ мг/м}^3$ , для воздуха населенных пунктов ПДК составляет  $0,004$  и  $0,001 \text{ мг/м}^3$  (максимально разовая и среднесуточная). Регламентировано ГН 2.1.6.716-98. Для  $\text{NO}_2$  ПДК (воздуха рабочей зоны) составляет  $9 \text{ мг/м}^3$ , для воздуха населенных пунктов ПДК максимально разовая и ПДК (средне – суточная) одинаковы и составляют  $0,085 \text{ мг/м}^3$ . При разгерметизации контейнера для осмотра необходимо, чтобы помещение, где проводятся эти работы, было снабжено вытяжной вентиляцией. Дополнительных мер по защите органов дыхания не требуется.

#### **4.1.4 Предложения по утилизации зарядов после истечения сроков их технической пригодности**

В настоящее время утилизация зарядов небольшой массы производится исключительно методом сжигания. При этом выделяется умеренное количество продуктов сгорания, которые рассеиваются в атмосфере.

#### **4.1.5 Эколого-гигиеническая характеристика продуктов сгорания изделия**

Воздействие продуктов сгорания на окружающую среду определяется следующими факторами:

- токсичностью продуктов сгорания;
- количеством образующихся продуктов сгорания;
- последующей трансформацией продуктов сгорания в атмосфере;
- параметрами рассеивания вредных выбросов.

При горении состава, используемого в изделии ОИ700, образуются в основном те же вещества, что и при горении штатных составов баллистических топлив.

В таблице 4.3 предоставлены результаты расчета массовых долей продуктов сгорания изделия, в программном комплексе «ASTRA».

Таблица 4.3 – Компонентный состав продуктов сгорания, образующихся при сжигании изделия

| Вещество                               | Массовая доля |            | Масса, т, кг (с учетом массы изделия 58,9 кг) |            |
|--|---------------|------------|---|------------|
|  | Камера        | Срез сопла | Камера  | Срез сопла |
| H                                      | 0,0001        | -          | 0,0058  | -          |
| H <sub>2</sub>                         | 0,0113        | 0,0161     | 0,6565  | 0,9354     |
| OH                                     | 0,0005        | -          | 0,0291  | -          |
| H <sub>2</sub> O                       | 0,1652        | 0,1238     | 9,5981  | 7,1928     |
| N <sub>2</sub>                         | 0,1919        | 0,1919     | 11,1494                                       | 11,1494    |
| NO                                     | 0,0001        | -          | 0,0058  | -          |
| CO                                     | 0,4245        | 0,3602     | 24,6635                                       | 20,9276    |
| CO <sub>2</sub>                        | 0,1663        | 0,2674     | 9,6620  | 15,5359    |
| Pb                                     | 0,0155        | 0,0155     | 0,9006  | 0,9005     |
| PbO                                    | 0,0008        | -          | 0,0465  | -          |
| PbH                                    | 0,0004        | -          | 0,0232  | -          |
| SOH <sub>2</sub>                       | 0,0002        | 0,0002     | 0,0116  | 0,0116     |
| Co                                     | 0,0013        | -          | 0,0755  | -          |
| CoH                                    | 0,0016        | -          | 0,0929  | -          |
| CoO <sub>2</sub> H <sub>2</sub>        | 0,0012        | -          | 0,0697  | -          |
| Pb (конд.)                             | -             | 0,0012     | -   | 0,0697     |
| Co (конд.)                             | -             | 0,0037     | -   | 0,2149     |
| Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (конд.) | 0,0189        | -          | 1,0981  | -          |
| TiO <sub>2</sub> (конд.)               | -             | 0,02       | -   | 1,162      |

При температуре горения топлива (около 2000°С) все способные гореть соединения догорают на воздухе: так водород на воздухе догорает до H<sub>2</sub>O, CO - до CO<sub>2</sub>, аэрозоли металлов окисляются до соответствующих окислов.



Поэтому реальное воздействие при стендовых испытаниях на персонал и окружающую среду оказывают, в основном, окись свинца и окись кобальта.

Окись титана является малотоксичным веществом, оценка его воздействия не проводилась.

Основным требованием, обеспечивающим экологическую безопасность является то, что на границе санитарно – защитной зоны не было превышения ПДК атм. воздуха.

Таблица 4.4 – Токсикологические характеристики продуктов догорания на воздухе газов, образующихся при сжигании изделия

| Вещество                               | Воздух             |   |   |  |  | Вода водоемов      |               | Ссылка<br>на<br>источник  |
|--|--------------------|---|---|--|--|--------------------|---------------|---------------------------|
|  | Класс<br>опасности | Воздух атмосферный  |   | Воздух рабочей зоны                                      |  | Класс<br>опасности | ПДКв,<br>мг/л |                           |
|  |                    | ПДК <sub>атм.в</sub><br>мг/м <sup>3</sup><br>(среднесуточная) | ПДК <sub>атм.в</sub><br>мг/м <sup>3</sup> (разовая<br>максимальная) | ПДК <sub>р.з.</sub> мг/м <sup>3</sup><br>(среднесменная) | ПДК <sub>р.з.</sub> мг/м <sup>3</sup><br>(разовая<br>максимальная) |                    |               |                           |
| PbO                                    | 1                  | 0,0003  | 0,001   | 0,005  | 0,01   | Не<br>установлен   | 0,01          | [16], [17],<br>[22], [24] |
| Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 2                  | 0,001   | -   | 0,5  | Не установлен  | Не<br>установлен   | 1,0           | [22]                      |
| Титана<br>двуокись                     | 4                  | -   | -   | 10   | Не установлен  | 4                  | 0,1           |                           |
| Диоксид<br>углерода<br>CO <sub>2</sub> | 4                  | -   | -   | 9000   | 27000  | -                  | -             | [15], [22],<br>[23]       |
| Pb (конд.)                             | 1                  | 0,0003  | 0,001   | 0,005  | 0,01   |                    |               | [16]                      |
| Co (конд.)                             | 2                  | 0,001   | -   | 0,5  | Не установлен  |                    |               | [16]                      |

Учитывая относительно небольшую массу топлива в изделии ~ 58,9 кг – при его сжигании практически не возникает реальной опасности загрязнения окружающей среды. Такая опасность существует, в основном, при утилизации больших количеств отходов топлива на открытых площадках и при неблагоприятных метеоусловиях, способствующих локальному осаждению выбросов.

При систематических (массовых) сжиганиях изделий (испытаниях и утилизации) должны быть предусмотрены мероприятия по улову и обезвреживанию аэрозоля тяжелых металлов, например, путем улова их с помощью мокрого фильтра.

Такая технология используется, например, на стенде ИС-36 ФГУП «ФЦДТ «Союз» при исследовании скоростей горения образцов и на участке утилизации спецотходов. Для защиты органов дыхания работников, у которых возможен контакт с конденсированными продуктами сгорания изделия, в обязательном порядке должны использоваться одноразовые респираторы типа «Лепесток» или противогаз марки «СО» или «М», защищающие органы дыхания от окиси углерода и аэрозолей.

Данные о токсичности продуктов сгорания (после догорания газовых выбросов в атмосфере), а именно, окислов свинца, кобальта, а также  $\text{CO}_2$ , приведены в таблице 4.4. Газовые выбросы при сгорании изделия, содержат окись свинца и конденсированные частицы свинца, которые относятся к веществам 1 класса опасности (чрезвычайно опасные по ГОСТ 12.1.007). Воздействие вредных веществ на персонал и окружающую среду более полно характеризуется соотношением массы выделившихся продуктов и ПДК, которое можно определить как объём воздуха, необходимый для разбавления вредных выбросов до безопасного уровня.

Определим количество вышеназванных веществ, образующееся при сгорании изделия (исходя из термодинамического расчета):

Масса изделия – 58,9 кг

Расчетная масса образующихся соединений свинца в пересчете на металлический свинец  $\sim 970$  гр.

Расчетная масса соединений кобальта в пересчете на металлический кобальт составляет  $\sim 214$  гр.

ПДК свинца для атмосферного воздуха составляет  $0,001 \text{ мг/м}^3$ , определяем, что объём воздуха, необходимый для разбавления аэрозоля образующихся соединений свинца до нормативного уровня, составляет:

$$970000 \text{ мг} : 0,001 \text{ мг/м}^3 = 970000000 \text{ м}^3 \text{ или } 9,7 \times 10^8 \text{ м}^3.$$

Для окиси кобальта ПДК для атмосферного воздуха не разработана. Имеется ПДК<sub>атм.в</sub> для металлического кобальта, составляющая  $0,001 \text{ мг/м}^3$ . Исходя из этой величины, рассчитываем объём воздуха, необходимый для разбавления окиси кобальта до нормативного уровня.

$$214000 \text{ мг} : 0,001 \text{ мг/м}^3 = 214000000 \text{ м}^3 \text{ или } 2,14 \times 10^8 \text{ м}^3.$$

Оценим ориентировочный радиус рассеивания в объеме полушария с центром расположенным в месте проведения стендовых (наземных) испытаний

$$V_{\text{для свинца}} = \frac{2}{3} \pi R^3 \text{ отсюда } R_{\text{свинца}} = \sqrt[3]{V * 0,477} = 773,4 \text{ м}$$

$$V_{\text{для кобальта}} = \frac{2}{3} \pi R^3 \text{ отсюда } R_{\text{кобальта}} = \sqrt[3]{V * 0,477} = 467,4 \text{ м}$$

Таким образом, расстояние до ближайшего населенного пункта (санитарно – защитная зона) от периметра предприятия (стенда) на котором будут осуществляться наземные испытания изделия, должен составлять не менее  $647,7$  м без учета возможной ветровой нагрузки.

ПДК окиси титана для атмосферного воздуха составляет  $10 \text{ мг/м}^3$ , определяем, что объём воздуха, необходимый для разбавления до нормативного уровня, составляет  $3140 \text{ м}^3$ . Ориентировочный радиус рассеивания в объеме полушария с центром расположенным в месте проведения стендовых (наземных) испытаний равен  $31,14$  м. Вкладом окиси титана, являющейся малотоксичным веществом, можно пренебречь.

Учитывая, что размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятий спецхимии, полигонов и воинских частей составляет не менее  $1000$  м

(СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03) от границы охраняемого периметра, при стендовых наземных испытаниях происходит достаточное разбавление продуктов сгорания до уровня ПДК<sub>атм. воздуха</sub> на границе СЗЗ.

При термическом воздействии на бронировку изделия образуются шлаки. Состав шлаков при сгорании различных изделий исследовался во ФГУП «ФЦДТ «Союз». Установлен класс опасности шлаков от сгорания изделий – 4 класс опасности (малоопасные). Утилизация шлаков производится специализированной организацией в соответствии с требованиями по утилизации отходов 4-го класса опасности и осуществляется путем захоронения на полигонах ТБО.

#### **4.1.6 Оценка озоноразрушающего действия продуктов сгорания состава**

В соответствии с международной конвенцией от 1989 г. (Монреальский протокол) Россия обязуется принимать меры по контролю выброса озоноразрушающих соединений. В Монреальском протоколе, подписанном Россией, содержится перечень галоген-содержащих озоноразрушающих соединений (приложение А протокола). [35] Так как в состав топлива не входят галогены, при их горении озоноразрушающих соединений не образуется.

В связи с вышеизложенным, изделия являются озоно - безопасными и не подпадают под действие международной конвенции (Монреальского протокола).

#### 4.1.7 Эколого-гигиеническая характеристика компонентов дымного пороха (воспламенителя)

В таблице 4.4 приведены токсикологические характеристики компонентов дымного пороха входящего в состав воспламенителя.

Таблица 4.4 – токсикологические характеристики компонентов дымного пороха

| Вещество                          | Воздух рабочей зоны                     |                 | Атмосферный воздух                     |                 | Вода водоёмов             |                 | Ссылка на источник |
|-----------------------------------|---|-----------------|--|-----------------|---------------------------|-----------------|--------------------|
|                                   | ПДК <sub>р.з.</sub> , мг/м <sup>3</sup> | Класс опасности | ПДК <sub>сс.</sub> , мг/м <sup>3</sup> | Класс опасности | ПДК <sub>в.</sub> , мг/л  | Класс опасности |                    |
| Селитра калиевая KNO <sub>3</sub> | 5,0                                     | 3               | 0,085 (по NO <sub>2</sub> )            | -               | 3,8 (по NO <sub>2</sub> ) | -               | [16], [17], [24],  |
| Сера техническая                  | 6,0                                     | 3               | -                                      | -               | -                         | -               | [16]               |
| Уголь древесный                   | 4,0                                     | 3               | 0,05                                   | 3               |                           |                 | [16], [24]         |

В состав дымного пороха не входят высокотоксичные соединения 1 и 2 класса опасности.

Основными рекомендациями по обеспечению экологической безопасности при производстве изделий, содержащих дымный порох, являются: герметизация оборудования, сокращение доли ручного труда, контроль содержания вредных веществ в воздухе, использование общеобменной и, при необходимости, местной вытяжной вентиляции, очистка газовых выбросов, использование средств индивидуальной защиты.

Учитывая небольшую массу воспламенителя (18 г) и то, что при его сжигании не образуется высокотоксичных соединений - практически не возникает реальной опасности загрязнения окружающей среды при испытании и использовании изделий.

## 4.2 Заключение

Несмотря на тот факт, что основной задачей РДТТ является обеспечение энергетических характеристик (уровень реактивной тяги, массовый расход ПС, суммарный импульс тяги), в процессе его эксплуатации и испытаний возникает опасность также с точки зрения экологического воздействия, которое особо выражено в области рабочей зоны человека.

При проведении испытаний и утилизации РДТТ необходимо соблюдать ряд предупредительных и защитных мер, обеспечивающих защиту окружающей среды и безопасность персонала, занятого на производстве и испытательных станциях.

Кроме того, размещение испытательных станций, лабораторий, отдельных испытательных установок должны выполняться с учетом определенных требований. Необходимо обеспечение безопасности жизнедеятельности местных жителей в районах расположения предприятий.

В результате проведенного анализа состава продуктов сгорания определено:

1 При хранении, перемещении и регламентном обслуживании основных изделий на составе ТРТ с бронировочным покрытием загрязнение окружающей среды практически отсутствует.

2 Рекомендуются уничтожение основного изделия на составе ТРТ с бронировочным покрытием методом сжигания на открытых площадках или стендах.

3 При уничтожении основного изделия с бронировочным покрытием и его стендовых испытаниях основное воздействие на окружающую среду оказывает окись свинца (1 класс опасности). Количество выделяющихся загрязняющих веществ при разовом использовании изделия не приводит к превышению норм ПДК<sub>атм. воздуха</sub> указанных веществ на границах типовой санитарно – защитной зоны (1000 м) предприятий и полигонов.

4 По озоноразрушающему действию продукты сгорания изделия относятся к безопасным веществам и не входят в перечень контролируемых веществ по Монреальскому протоколу от 1989 г.

5 Для защиты органов дыхания работников, у которых возможен контакт с газами, выделяющимися при сгорании изделия, в обязательном порядке, должен использоваться респиратор «Лепесток» или противогаз марки «М», защищающий органы дыхания от окиси углерода и аэрозолей.



## **5 Экономическая часть**

### **Введение**

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

Если это касается разработчиков всего комплекса изделий, то необходимо рассматривать ряд схемных решений с точки зрения структуры разрабатываемого объекта: системы измерения, принципа управления, применения различных видов топлив, типа воспламенения, методики пересчета и определения конечных зависимостей и параметров.

Выбрав конструктивное исполнение, систему измерения, методику расчета, дают технико-экономическую оценку изделия в целом и отдельных его элементов. Сравнительный технико-экономический анализ выдвигает как обязательное требование обоснованное приведение рассматриваемых вариантов техники к сопоставимому виду. Речь идет обычно о необходимости приведения сравниваемых изделий по эксплуатационно-техническим параметрам (мощность, производительность, габаритные характеристики, комплекс задач и операции, показатели по качеству – надежность, долговечность и т.д.).

В выпускной квалификационной работе рассматривается разработка маршевого РДТТ, предназначенного для модульного удлиненного заряда разминирования.

#### Особенности обоснования затрат на разработку изделия.

При оценке затрат на разработку РДТТ необходимо исходить не из традиционного подхода – численности разработчиков и сроков возможного окончания работ, а из необходимого объема огневой стендовой отработки и, следовательно, количества испытываемых изделий, темпа нарастания коэффициента их использования при испытаниях и определения производственной базы (заводов и стендов).

Как показывает опыт, основные затраты при создании ракетных двигателей определяются не затратами на этап проектирования и изготовления головного образца, а количеством необходимых изделий и испытаний каждого изделия для подтверждения заданных требований по ТЗ – специфическая особенность высоконапряженных энергетических машин.

Для РДТТ к исходу отработки обеспечивается максимально достижимая для современного уровня развития техники и технологии надежность, гарантирующая безопасность обслуживающего персонала и заданную вероятность решения целевой задачи, для которой создается изделие. В нашем случае, ограничимся определением затрат на проектирование, изготовление образцов и отработку РДТТ.

### **5.1 Исходные данные для проведения расчета затрат на создание РДТТ**

Для определения затрат на разработку и проведения испытаний до этапа сдачи заказчику РДТТ необходимо рассчитать затраты, связанные с:

- разработкой проектной и конструкторской документацией;
- ее последующим освоением по результатам технологического освоения и доводки;
- подготовкой производства по всему циклу (создание технологической документации, чертежей на оснастку и инструмент);
- изготовлением первых партий РДТТ;
- проведением ОСИ;
- отработки РДТТ с подтверждением заданных характеристик и точности, соответствующих требованиям ТЗ применительно к задачам дальнейшего использования.

Выполнение данных проектно-экономических расчетов представляет собой систему прогнозируемых оценок на базе опытно-статических данных, накопленных к настоящему времени в проектных организациях и в промышленности, при условии окончания этапа проектирования.

Для выполнения работ по расчету затрат на создание РДТТ необходимо иметь два массива ИД: технические характеристики изделия и проект графика разработки с указанием сроков выполнения работ.

Таблица 5.1. Технические характеристики изделия

|                                    |                     |              |
|------------------------------------|---------------------|--------------|
| Габариты изделия                   | Длина, мм, не более | 1546         |
|                                    | Диаметр, мм         | 163          |
| Диаметр критического сечения, мм   |                     | 17,5         |
| Давление в камере сгорания, МПа    |                     | 16,61        |
| Давление на срезе сопла, МПа       |                     | 0,01         |
| Тип топлива                        |                     | Баллиститное |
| Полное номинальное время работы, с |                     | 4,5...5,5    |

## 5.2 Основные этапы НИОКР

Проведение экономического расчета начинается с определения основных этапов работ, связанных с проектированием двигателя. В перечень этих этапов входят:

1. фундаментальные поисковые научно-исследовательские работы;
2. техническое предложение (аванпроект);
3. разработка технического задания;
4. эскизное проектирование;
5. техническое проектирование;
6. подготовка стендовой установки;
7. рабочий проект;
8. изготовление опытных образцов;
9. конструкторско-доводочные ОСИ опытных образцов;
10. корректировка конструкторской документации;
11. изготовление натурных образцов;
12. натурные испытания;
13. подготовка серийного производства.

Стоимость разработки нового двигателя будет определена этими этапами. График работ представлен в таблице 1.

Таблица 5.2 План работ по разработке двигателя

| Наименование этапа                | Месяцы |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------------------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                                   | 1      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| ФПНИР                             | ■      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Техническое предложение           |        | ■ |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Разработка ТЗ                     |        |   | ■ |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Эскизное проектирование           |        |   | ■ | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Техническое проектирование        |        |   |   | ■ | ■ |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Подготовка стенда                 |        |   |   |   | ■ | ■ |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Рабочий проект                    |        |   |   |   |   | ■ | ■ |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Изготовление опытных образцов     |        |   |   |   |   |   | ■ | ■ | ■ | ■  |    |    |    |    |    |    |
| ОСИ                               |        |   |   |   |   |   |   | ■ | ■ | ■  | ■  |    |    |    |    |    |
| Корректировка РКД                 |        |   |   |   |   |   |   | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  |    |    |    |    |
| Изготовление натуральных образцов |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | ■  |    |    |    |    |
| Натурные испытания                |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ■  |    |    |    |
| Подготовка производства           |        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | ■  | ■  | ■  |

### 5.3 Сетевая модель

На первом этапе следует установить зависимость между этапами согласно плану работ (таблица 5.2).

Таблица 5.3 Основные события и работы проекта

| Событие                               | Код работы | Работа                            | Трудоемкость |         |
|---------------------------------------|------------|-----------------------------------|--------------|---------|
|                                       |            |                                   | чел/дни      | чел/час |
| Начало работ                          | 0-1        | ФПНИР                             | 20           | 160     |
| Окончание НИР                         | 1-2        | Аванпроект                        | 20           | 160     |
| Подготовка аванпроекта                | 2-3        | Разработка ТЗ                     | 20           | 160     |
|                                       | 2-4        | Эскизное проектирование           | 40           | 320     |
| Подготовка ТЗ                         | 3-5        | Техническое проектирование        | 40           | 320     |
| Начало подготовки стенда              | 4-6        | Подготовка стенда                 | 40           | 320     |
| Окончание технического проектирования | 5-6        | Рабочий проект                    | 40           | 320     |
| Готовность рабочего проекта           | 6-7        | Изготовление опытных образцов     | 80           | 640     |
|                                       | 6-8        | ОСИ                               | 80           | 640     |
|                                       | 6-9        | Корректировка РКД                 | 100          | 800     |
| Готовность опытных образцов           | 7-9        | Изготовление натуральных образцов | 20           | 160     |
| Получение результатов ОСИ             | 8-9        | -                                 | -            | -       |
| Подготовка натуральных образцов       | 9-10       | Натурные испытания                | 20           | 160     |
| Окончание проектирования              | 10-11      | Подготовка производства           | 60           | 480     |
| Окончание работ                       | -          | -                                 | -            | -       |

### 5.4 Определение числа исполнителей

Для проектирования двигателя, изготовления опытных образцов, их отработки и запуска двигателя в производство понадобятся три вида специалистов: конструкторы, технологи и испытатели.

Занятость в течение проекта распределена следующим образом:

- 12 месяцев для конструкторов, что соответствует занятости от момента начала работ до окончания корректировки РКД;
- 10 месяцев для технологов, что соответствует занятости от момента начала разработки рабочего проекта до завершения всех испытаний;
- 8 месяцев для испытателей, что соответствует занятости от момента подготовки стенда, до завершения всех испытаний.

При этом численность персонала будет следующей: 4 конструктора, 2 технолога и 2 испытателя.

## 5.5 Затраты на проект

### 5.5.1 Затраты на проектирование

Заработная плата:

Будем считать, что на проектирование данного двигателя необходимо оплачивать работу, опираясь на величину недельного оклада и занятости:

$$C_{з.окл.} = T_{зан} \cdot O_{нед};$$

где  $T_{зан}$  приравнивается полному времени занятости работника в проекте, а  $O_{нед}$  соответствует окладу работника за неделю.

Увеличение оплаты за счет удержания подоходного налога:

$$C_{з.осн.} = C_{з.окл.} \cdot (1 + H_{дфл}).$$

Используя вышеописанные соотношения и зная численность работников следует рассчитать для каждого величину оплаты его труда. Результат расчета заработной платы приведен в таблице 5.4.

Таблица 5.4 Заработная плата работников

| №     | Должность   | Численность, чел. | Мес. оклад, руб. | Занятость, нед. | Оклад, руб. | Зарплата, руб. |
|-------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------|----------------|
| 1     | Конструктор | 4                 | 48 000           | 48              | 2 304 000   | 2 603 520      |
| 2     | Технолог    | 2                 | 40 000           | 40              | 800 000     | 904 000        |
| 3     | Испытатель  | 2                 | 52 000           | 20              | 520 000     | 587 600        |
| Итого |             |                   |                  |                 | 3 624 000   | 4 095 120      |

Дополнительная заработная плата:

$$C_{з.доп.} = 0,2 \cdot C_{з.осн.}$$

Отчисления с заработной платы:

$$C_{з.отч.} = (C_{з.осн.} + C_{з.доп.}) \cdot H_{соц}$$

Суммарные затраты на заработную плату:

$$C_{зп} = C_{з.осн.} + C_{з.доп.} + C_{з.отч.} = (1 + 0,2 + 1,2 \cdot 0,3) \cdot C_{з.осн.} = 1,56 \cdot C_{з.осн.}$$

Для всех работников в сумме:

$$C_{зп} = 1,56 \cdot \sum C_{з.осн.} = 1,56 \cdot 4\,095\,120 = 6\,388\,387 \text{ руб.}$$

Затраты на оборудование:

Для работы инженерам понадобятся персональные компьютеры (ПК), на которых будут производиться расчетные операции и выпуск КД. Допустим, что есть необходимость приобретения данного оборудования, тогда стоимость подходящего по техническим характеристикам ПК составит 120 000 руб. Также для печати всей документации понадобится принтер и плоттер стоимостью 15 000 руб. и 96 000 руб. соответственно. Затраты на оборудование представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 Стоимость оборудования

| Сотрудники             | Оборудование | Кол-во | Стоимость, руб | Итоговая стоимость, руб |
|------------------------|--------------|--------|----------------|-------------------------|
| Конструктор и технолог | Компьютер    | 6      | 120 000        | 720 000                 |
|                        | Принтер      | 2      | 15 000         | 30 000                  |
|                        | Плоттер      | 1      | 96 000         | 96 000                  |

Общая сумма затрат на оборудование:

$$C_{об} = C_{пк} + C_{пр} + C_{пл} = 120\,000 \cdot 6 + 15\,000 \cdot 2 + 96\,000 = 846\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию оборудования:

Определяются по формуле

$$C_{аморт} = \sum_i \left( \frac{C_{об\ i} \cdot \Delta t_i}{D_{раб\ i}} \right),$$



где  $C_{об i}$  – затраты на приобретение  $i$ -го средства производства,  $\Delta t_i$  – время использования  $i$ -го средства производства в днях,  $D_{РАБ i}$  – полный ожидаемый срок эксплуатации  $i$ -го средства в днях.

Принимаем полный срок эксплуатации приобретённых ПЭВМ 5 лет (с учётом морального старения), а для прочего оборудования – 10 лет, и учтываем, что в году приблизительно 250 рабочих дней рассчитываем ориентировочную стоимость амортизации оборудования. Результат расчета представлен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 Стоимость амортизации приобретенного оборудования

| Оборудование  | Количество,<br>шт. | Стоимость,<br>руб. | Срок<br>эксплуатации,<br>дн. | Стоимость<br>амортизации,<br>руб. |
|---|--------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Персональный компьютер<br>(конструктора)              | 4                  | 120 000            | 240                          | 153 600                           |
| Персональный компьютер<br>(технолога)                 | 2                  | 120 000            | 200                          | 64 000                            |
| Принтер   | 2                  | 15 000             | 320                          | 12 800                            |
| Плоттер   | 1                  | 96 000             | 320                          | 40 960                            |
| Итого, стоимость амортизации оборудования $C_{АМОТР}$ |                    |                    |                              | 271 360                           |

Определяют перечень минимально необходимых для организации работ расходных материалов. Данный перечень приведён в таблице 5.7.

Таблица 5.7 Затраты на расходные материалы

| №<br>п/п | Наименование материалов     | Цена,<br>руб. | Количество,<br>шт. | Сумма,<br>руб. |
|----------|-----------------------------|---------------|--------------------|----------------|
| 1        | Бумага Svetocopy 500 листов | 183           | 1000               | 183 000        |

|   |                                   |      |     |         |
|---|-----------------------------------|------|-----|---------|
| 2   | Рулон бумаги Promega для плоттера | 543  | 100 | 54 300  |
| 3   | Канцелярские принадлежности       | 8000 | 6   | 48 000  |
| Итого, затраты на расходные материалы ( $C_{\text{расх.мат}}$ ) |                                   |      |     | 285 300 |

Расчет стоимости вспомогательного ПО производится с условием установки на два персональных компьютера.

Таблица 5.8 Стоимость программного обеспечения

| Наименование  | Стоимость,<br>руб. | Количество,<br>шт | Итоговая<br>стоимость,<br>руб. |
|---|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| Microsoft Windows 10  | 14 199             | 6                 | 85 194                         |
| Microsoft Office Standard 2016                                | 5 199              | 6                 | 31 194                         |
| Mathcad Professional – Individual                             | 79 800             | 6                 | 478 800                        |
| Аскон КОМПАС-3D V18   | 157 000            | 6                 | 942 000                        |
| БД InterMech Search   | 63 774             | 6                 | 382 644                        |
| Итого, затраты на программное обеспечение ( $C_{\text{ПО}}$ ) |                    |                   | 1 919 832                      |

Стоимость 1 лицензии СУБД InterMech Search – 890 €. В соответствии с курсом ЦБРФ на 04.2019 – 63 774 руб.

Из расчета, что на одного человека необходима площадь 6 м<sup>2</sup> был произведен поиск по арендуемым помещениям в пределах г. Москва.

Таблица 5.5 Арендуемые рабочие места

| Район                   | Площадь, м. кв. | Стоимость, руб./мес. |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| ст. м. Волжская         | 12,5            | 14 000               |
| ст.м. Шоссе Энтузиастов | 12              | 12 000               |
| ст. м. Перово           | 12              | 12 500               |
| ст. м. Минская          | 12              | 22 008               |
| ст. м. Беговая          | 12              | 18 000               |
| ст. м. Дубровка         | 12,5            | 12 500               |

Выбираем вариант ст. м. Дубровка, географическое расположение и транспортная доступность (станции метрополитена и МЦК) которого обеспечат доступность для сотрудников, в то время как стоимость аренды снижает накладные расходы. При этом, для эффективной организации работы, требуется арендовать 3 смежных помещения, поскольку помимо расположения рабочих мест, так же потребуется место для хранения документации.

$$C_{\text{ОРГ}} = C_{\text{ар}} \cdot T_{\text{ар}} = 3 \cdot 12500 \cdot 16 = 600\,000 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

Предполагаем, что накладные расходы составят 60% от заработной платы:

$$C_{\text{НАКЛ}} = K_{\text{накл}} \cdot C_{\text{ЗП}} = 0,6 \cdot 6\,388\,387 = 3\,833\,032 \text{ руб}$$

Определение суммарных затрат на проектирование:

$$C_{\text{ПР}} = C_{\text{ЗП}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{АМОРТ}} + C_{\text{РАСХ.МАТ}} + C_{\text{ПО}} + C_{\text{ОРГ}} + C_{\text{НАКЛ}} = 6\,388\,387 + 846\,000 + 271\,360 + 285\,300 + 1\,919\,832 + 600\,000 + 3\,833\,032 = 14\,143\,911 \text{ руб.}$$

Структура затрат проиллюстрирована на диаграмме рис. 5.1

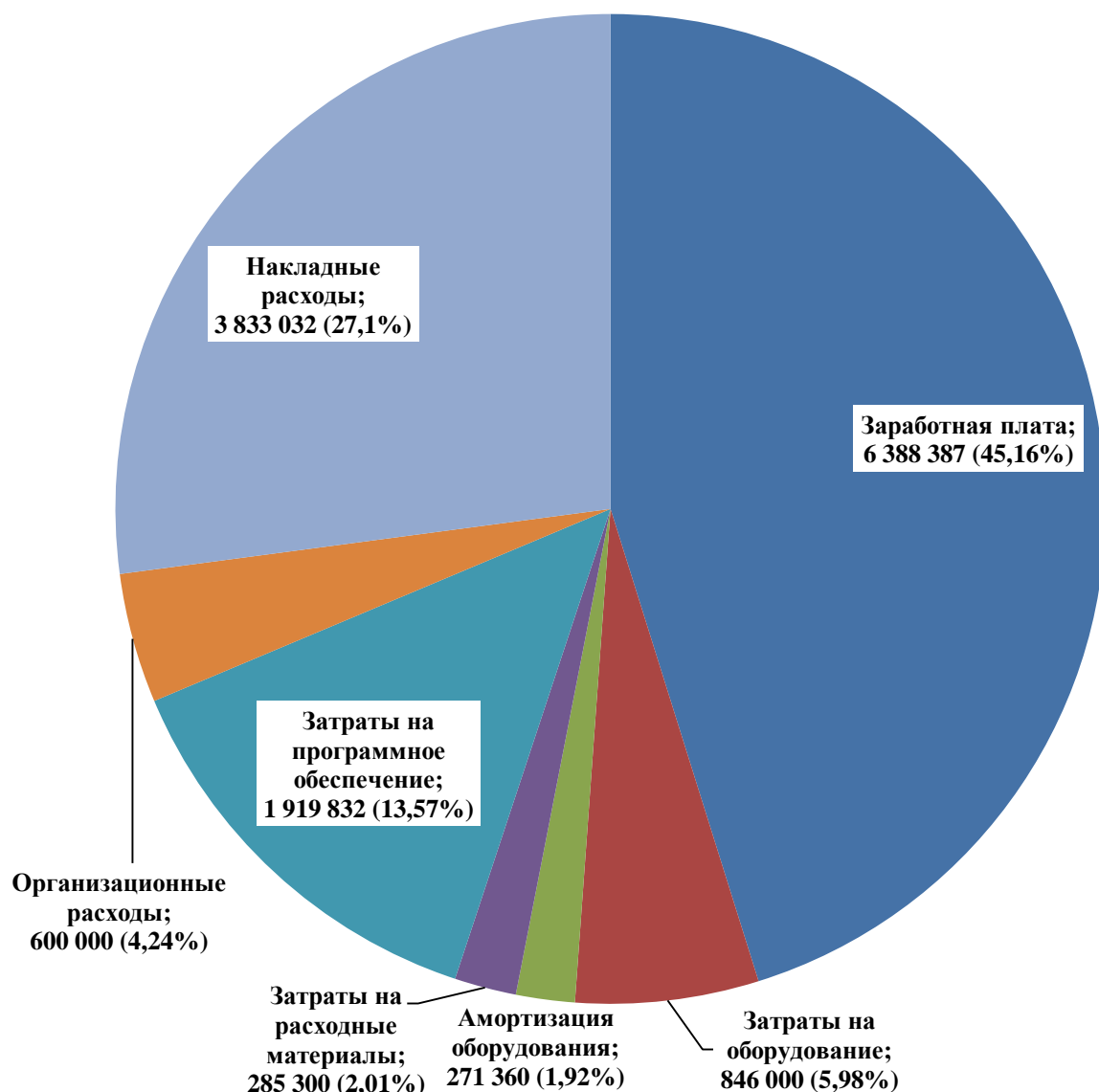


Рис 5.1 - Структура затрат на проектирование

### 5.5.2 Затраты на испытания

Оценка себестоимости производства двигателя, проведения огневых стендовых испытаний – сложный процесс, на который влияет больше количество факторов. Поэтому дальнейшие расчеты проводятся исходя из затрат чел/мес. Для ФГУП «ФЦДТ Союз» данный показатель вычисляется из средней заработной платы на предприятии и составляет 149 335,00 руб. Среднемесячный размер расходов на оплату труда – 5,2 %

Ориентировочная стоимость изготовления опытных образцов для предварительных испытаний, проведение предварительных испытаний, кор-

ректировка РКД по результатам предварительных испытаний, изготовление партии опытных образцов для проведения государственных испытаний составит 289 932 187,57 руб. (с учетом неучтенных затрат (10%) –318 925 406,33 руб.), в том числе:

1 Затраты на изготовление партии опытных образцов для предварительных (автономных) испытаний составят 49 248 046,92 руб., в том числе:

1.1 Ориентировочная стоимость технического контроля за изготовлением комплектующих и оснастки для проведения испытаний составит: 149 335,00 руб.  $\times$  20 чел/мес  $\times$  1,052 = 3 142 008,40 руб.

1.2 Ориентировочная стоимость изготовления корпусов опытного образца (для проведения гидроиспытания до разрушения) и поставки в АО «Композит» составит:

$$600\,000,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ шт.} \times 1,052 = 1\,262\,400,00 \text{ руб.}$$

1.3 Ориентировочная стоимость изготовления партии опытных образцов составит 36 104 138,78 руб. в том числе:

1.3.1 Ориентировочная стоимость изготовления корпусов опытных образцов составит: 600 000,00 руб.  $\times$  37 шт.  $\times$  1,052 = 23 354 400,00 руб.

1.3.2 Ориентировочная стоимость изготовления ОИ и ДИ составит:

$$266\,870,28 \text{ руб.} \times 37 \text{ шт.} \times 1,052 = 10\,387\,658,78 \text{ руб.}$$

1.3.3 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки составит:

$$63\,840,00 \text{ руб.} \times 37 \text{ шт.} = 2\,362\,080,00 \text{ руб.}$$

1.3.4 Ориентировочная стоимость покупки изделий ДП4-3 составит: 20 623,73 руб.  $\times$  37 шт. = 763 077,85 руб.

1.3.5 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки для поставки в АО «Композит» составит:

$$63\,840,00 \text{ руб.} \times 63\,840,0 \text{ руб.}$$

1.4 Ориентировочная стоимость изготовления габаритно-массового макета опытных образцов составит 847 150,00 руб., в том числе:

1.4.1 Ориентировочная стоимость реставрации корпуса опытного образца составит: 504 960,00 руб.  $\times$  1 шт. = 504 960,00 руб.

1.4.2 Ориентировочная стоимость изготовления инертных макетов ОИ и ДИ составит:  $252\,672,78 \text{ руб.} \times 1 \text{ шт.} = 252\,672,78 \text{ руб.}$

1.4.3 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки составит:  
 $63\,840,00 \text{ руб.} \times 1 \text{ шт.} = 63\,840,00 \text{ руб.}$

1.4.4 Ориентировочная стоимость сборочно-снаряжательных работ составит:  $25\,677,22 \text{ руб.} \times 1 \text{ шт.} = 25\,677,22 \text{ руб.}$

1.5 Ориентировочная стоимость изготовления оснастки для проведения предварительных (автономных) испытаний составит  $3\,677\,694,64 \text{ руб.}$

1.6 Ориентировочная стоимость покупки комплектующих для проведения предварительных (автономных) испытаний составит  $3\,387\,737,26$ , в том числе:

1.6.1 Ориентировочная стоимость покупки изделий ДП4-3 составит:  $20\,623,73 \text{ руб.} \times 10 \text{ шт.} = 206\,237,26 \text{ руб.}$

1.6.2 Ориентировочная стоимость покупки изделий ЛХ-412/250 составит:  $50\,500,00 \text{ руб.} \times 50 \text{ шт.} = 2\,525\,000,00 \text{ руб.}$

1.6.3 Ориентировочная стоимость покупки датчиков тяги составит:  
 $65\,650,00 \text{ руб.} \times 10 \text{ шт.} = 656\,500,00 \text{ руб.}$

2 Ориентировочная стоимость проведения предварительных (автономных) испытаний составляет  $34\,595\,431,47 \text{ руб.}$ , в том числе:

2.1 Ориентировочная стоимость проведения гидроиспытания опытного образца корпуса до разрушения в 2017 г. составляет  $393\,100,84 \text{ руб.}$ , в том числе:

2.1.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит  $78\,900,00 \text{ руб.}$

2.1.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализа результата составит:

$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 = 314\,200,84 \text{ руб.}$

2.2 Ориентировочная стоимость проведения 6 ОСИ по проверке работоспособности конструкции, определения ВБП и энергетических характеристик опытного образца 2017 г. составляет  $2\,564\,931,70 \text{ руб.}$ , в том числе:

2.2.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ исп.} \times 1,052 = 679\,726,66 \text{ руб.}$

2.2.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 12 \text{ чел/мес} \times 1,052 = 1\,885\,205,04 \text{ руб.}$$

2.3 Ориентировочная стоимость проведения испытаний по циклу: ускоренные климатические испытания корпусов, ОИ и ДИ, испытание переменным термостатированием с последующим проведением ОСИ опытного образца в 2018 г. составляет 8 694 645,20 руб. в том числе:

2.3.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $1\,512\,582,74 \text{ руб.} \times 4 \text{ исп.} = 6\,050\,330,96 \text{ руб.}$

2.3.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 16 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 2\,644\,314,24 \text{ руб.}$$

2.4 Ориентировочная стоимость проведения испытаний по циклу: виброиспытание, испытание сбрасыванием в упаковке с высоты 1,5 м на деревянное торцовое основание с последующим проведением ОСИ опытного образца в 2018 г. составит 4 950 453,20 руб., в том числе:

2.4.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $576\,534,74 \text{ руб.} \times 4 \text{ исп.} = 2\,306\,138,96 \text{ руб.}$

2.4.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 16 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 2\,644\,314,24 \text{ руб.}$$

2.5 Ориентировочная стоимость проведения испытаний сбрасыванием без упаковки с высоты 0,75 м на стальное основание с последующим проведением ОСИ опытного образца в 2018 г. составит 1 331 436,04 руб., в том числе:

2.5.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $335\,178,74 \text{ руб.} \times 2 \text{ исп.} = 670\,357,48 \text{ руб.}$

2.5.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 4 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 661\,078,56 \text{ руб.}$$

2.6 Ориентировочная стоимость проведения испытаний сбрасыванием в упаковке с высоты 6 м на бетонное основание в 2018 г. составит 573 551,71 руб., в том числе:

2.6.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $243\,012,43 \text{ руб.} \times 1 \text{ исп.} = 243\,012,43 \text{ руб.}$

2.6.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 330\,539,28 \text{ руб.}$$

2.7 Ориентировочная стоимость проведения испытаний сбрасыванием без упаковки с высоты 1,5 м на металлическое основание в 2018 г. составит 573 551,71 руб., в том числе:

2.7.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $243\,012,43 \text{ руб.} \times 1 \text{ исп.} = 243\,012,43 \text{ руб.}$

2.7.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 330\,539,28 \text{ руб.}$$

2.8 Ориентировочная стоимость проведения испытаний на прострел бронебойно-зажигательной пулей калибра 12,7 мм с расстояния 50 м в 2018 г. составит 1 930 617,36 руб., в том числе:

2.8.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний на территории предприятия ФКП «НИИ «Геодезия» составит 1 438 715,20 руб.

2.8.2 Транспортировка изделий на предприятие ФКП «НИИ «Геодезия» и обратно составит 107 338,02 руб.

2.8.3 Ориентировочная стоимость сборочно-снаряжательных работ составит:  $27\,012,43 \text{ руб.} \times 2 \text{ шт.} = 54\,024,86 \text{ руб.}$

2.8.4 Ориентировочная стоимость организации, проведения технического контроля и анализ результата составит:



$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 330\,539,28 \text{ руб.}$$

2.9 Ориентировочная стоимость проведения комплекса работ по оценке сохраняемости свойств материалов корпуса в условиях хранения, транспортирования и эксплуатации в составе изделия на территории предприятия АО «Композит» в 2018 г. составит 2 671 453,51 руб. в том числе:

2.9.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению комплекса работ по оценке сохраняемости свойств материалов корпуса в условиях хранения, транспортирования и эксплуатации в составе изделия на территории предприятия АО «Композит» составит 2 275 383,42 руб.

2.9.2 Транспортировка изделий на предприятие АО «Композит» и обратно составит 65 530,80 руб.

2.9.3 Ориентировочная стоимость организации, проведения технического контроля и анализ результата составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 330\,539,28 \text{ руб.}$$

2.10 Ориентировочная стоимость проведения 6 ОСИ по проверке работоспособности конструкции, определения ВБП и энергетических характеристик опытного образца в 2018 г. составляет 1 349 154,06 руб. в том числе:

2.10.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 3 \text{ исп.} \times 1,052 \times 1,052 = 357\,536,22 \text{ руб.}$

2.10.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 991\,617,84 \text{ руб.}$$

2.11 Ориентировочная стоимость разработки и согласования ПРП на инициирующее изделия с привлечением предприятия ФГУП «ЦНИИХМ» в 2018 г. составляет 1 267 265,33 руб. в том числе:

2.11.1 Затраты на выпуск ПРП на инициирующее изделия предприятием ФГУП «ЦНИИХМ» составят 936 726,05 руб.

2.11.2 Ориентировочная стоимость организации, проведения технического контроля и анализ результата составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 2 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 330\,539,28 \text{ руб.}$$

2.12 Ориентировочная стоимость изготовления 6 опытных образцов ОИ и проведение расчётно-экспериментальных исследований и испытаний для подтверждения выполнения требований ТЗ по гарантийному сроку ОИ в 2018 г. составляет 4 163 529,81 руб. в том числе:

2.12.1 Ориентировочная стоимость изготовления ОИ составит:

$266\,870,28 \text{ руб.} \times 6 \text{ шт.} \times 1,052 = 1\,684\,485,21 \text{ руб.}$

2.12.2 Ориентировочная стоимость проведения расчётно-экспериментальных исследований и испытаний для подтверждения выполнения требований ТЗ по гарантийному сроку ОИ составит:

$149\,335,00 \text{ руб.} \times 15 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 2\,479\,044,60 \text{ руб.}$

2.13 Ориентировочная стоимость выпуска научно-технического отчёта по этапу предварительных в 2018 г. составит

$149\,335,00 \text{ руб.} \times 25 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 4\,131\,741,00 \text{ руб.}$

3 Ориентировочная стоимость корректировка РКД по результатам предварительных испытаний, составит 9 322 338,84 руб., в том числе:

3.1 Затраты на корректировку РКД по результатам предварительных испытаний составят 3 578 747,54 руб., в том числе:

в 2017 г. –  $149\,335,00 \text{ руб.} \times 7 \text{ чел/мес} \times 1,052 = 1\,099\,702,94 \text{ руб.}$

в 2018 г. –  $149\,335,00 \text{ руб.} \times 15 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 2\,479\,044,60 \text{ руб.}$

3.2 Затраты на организацию и работы в комиссии по присвоению литеры "О" составят 5 743 591,30 руб. в том числе:

в 2017 г. –  $149\,335,00 \text{ руб.} \times 5 \text{ чел/мес} \times 1,052 = 785\,502,10 \text{ руб.}$

в 2018 г. –  $149\,335,00 \text{ руб.} \times 30 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 4\,958\,089,20 \text{ руб.}$

4 Ориентировочная стоимость присвоение РКД на двигатель литеры «О» в 2018 г. составит:

$149\,335,00 \text{ руб.} \times 10 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 1\,652\,696,40 \text{ руб.}$

5 Затраты на изготовление партии опытных образцов для МВИ и испытаний в составе заряда разминирования на предприятии ФГУП «ФЦДТ «Союз» в 2018 г. составят 98 308 031,64 руб., в том числе:

5.1 Ориентировочная стоимость технического контроля за изготовлением комплектующих составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 991\,617,84 \text{ руб.}$$

5.2 Ориентировочная стоимость изготовления партии образцов МРД, в том числе 6 изделий для ПСОСИ и 6 изделий для материально-технической приёмки (МТП) составит 86 609 403,36 руб. в том числе:

5.2.3 Ориентировочная стоимость изготовления партии корпусов опытных образцов МРД с учетом проведения прочностных испытаний составит:  $673\,797,70 \text{ руб.} \times 82 \text{ шт.} = 55\,192\,758,77 \text{ руб.}$

5.2.4 Ориентировочная стоимость изготовления ОИ и ДИ составит:  $266\,870,28 \text{ руб.} \times 82 \text{ шт.} \times 1,052 \times 1,052 = 26\,484\,821,43 \text{ руб.}$

5.2.5 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки составит:  $63\,840,00 \text{ руб.} \times 82 \text{ шт.} \times 1,052 = 5\,507\,093,76 \text{ руб.}$

5.2.6 Ориентировочная стоимость покупки изделий ДП4-3 составит:  $20\,623,73 \text{ руб.} \times 82 \text{ шт.} = 1\,691\,145,51 \text{ руб.}$

5.3 Ориентировочная стоимость проведения материально-технической приемки (МТП) в 2018 г. составляет 1 706 690,28 руб., в том числе:

5.3.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ исп.} \times 1,052 \times 1,052 = 715\,072,44 \text{ руб.}$

5.3.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 991\,617,84 \text{ руб.}$$

5.4 Ориентировочная стоимость проведения ОСИ в защиту поставки в 2018 г. и проведение комплекса работ по оценке сохраняемости свойств материалов корпуса в условиях хранения, транспортировки и эксплуатации в составе изделия составит 5 688 967,61 руб. в том числе:

5.4.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 20 \text{ исп.} \times 1,052 \times 1,052 = 2\,383\,574,81 \text{ руб.}$

5.4.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 20 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 3\,305\,392,80 \text{ руб.}$$

5.5 Ориентировочная стоимость сборочно-снаряжательных работ изделий с оформлением сопроводительных документов для поставки изделий, организация транспортирования изделий в 2018 г. составит 2 650 274,00 руб. в том числе:

5.5.1 Ориентировочная стоимость организации сборочно-снаряжательных работ изделий с оформлением сопроводительных документов для поставки изделий составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 4 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 661\,078,56 \text{ руб.}$$

5.5.3 Ориентировочная стоимость сборочно-снаряжательных работ составит:  $27\,012,43 \text{ руб.} \times 70 \text{ шт.} \times 1,052 = 1\,989\,195,44 \text{ руб.}$

6 Ориентировочная стоимость участия в МВИ и испытаний в составе заряда разминирования в 2018 г. составит 11 130 569,57 руб., в том числе:

6.1 Ориентировочная стоимость участия в МВИ, анализ результата составит:  $149\,335,00 \text{ руб.} \times 4 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 661\,078,56 \text{ руб.}$

6.2 Ориентировочная стоимость командировочных расходов для участия в МВИ составит 438 000,00 руб.

6.3 Ориентировочная стоимость корректировки КД по результатам МВИ составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 10 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 1\,652\,696,40 \text{ руб.}$$

6.4 Ориентировочная стоимость устранения замечаний по результатам МВИ (изготовление партии опытных образцов по откорректированной КД, проведение доводочных испытаний) составит 8 378 794,61 руб. в том числе:

6.4.1 Ориентировочная стоимость технического контроля за изготовлением комплектующих, участие в проведении доводочных испытаний (6 исп.) составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 8 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 1\,322\,157,12 \text{ руб.}$$

6.4.2 Ориентировочная стоимость изготовления корпусов опытных образцов с учетом проведения прочностных испытаний составит:

$$673\,797,70 \text{ руб.} \times 6 \text{ шт.} = 4\,042\,786,18 \text{ руб.}$$

6.4.3 Ориентировочная стоимость изготовления ОИ и ДИ составит:  
 $266\,870,28 \text{ руб.} \times 6 \text{ шт.} \times 1,052 \times 1,052 = 1\,772\,078,44 \text{ руб.}$

6.4.4 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки составит:  
 $63\,840,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ шт.} \times 1,052 = 402\,958,08 \text{ руб.}$

6.4.5 Ориентировочная стоимость покупки изделий ДП4-1 составит:  
 $20\,623,73 \text{ руб.} \times 6 \text{ шт.} = 123\,742,35 \text{ руб.}$

6.4.6 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ исп.} \times 1,052 \times 1,052 = 715\,072,44 \text{ руб.}$

7 Затраты на изготовление партии опытных образцов для проведения государственных испытаний заряда разминирования в количестве 70 шт. составят 85 675 072,73 руб., в том числе:

7.1 Ориентировочная стоимость изготовления партии образцов МРД составит 81 318 108,45 руб., в том числе:

7.1.1 Ориентировочная стоимость изготовления партии корпусов опытных образцов МРД с учетом проведения прочностных испытаний составит:  $673\,797,70 \text{ руб.} \times 76 \text{ шт.} = 51\,208\,624,90 \text{ руб.}$

7.1.2 Ориентировочная стоимость изготовления ОИ и ДИ составит:  
 $266\,870,28 \text{ руб.} \times 76 \text{ шт.} \times 1,052 \times 1,052 = 22\,446\,326,88 \text{ руб.}$

7.1.3 Ориентировочная стоимость изготовления укупорки составит:  
 $63\,840,00 \text{ руб.} \times 76 \text{ шт.} \times 1,052 = 5\,104\,135,68 \text{ руб.}$

7.1.4 Ориентировочная стоимость покупки изделий ДП4-1 составит:  
 $20\,623,73 \text{ руб.} \times 76 \text{ шт.} = 1\,567\,403,15 \text{ руб.}$

7.1.5 Ориентировочная стоимость технического контроля за изготовлением комплектующих МРД составит:

$149\,335,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 991\,617,84 \text{ руб.}$

7.2 Ориентировочная стоимость проведения ОСИ в защиту поставки в 2018 г. составит 1 706 690,28 руб. в том числе:

7.2.1 Ориентировочная стоимость работ по проведению испытаний составит:  $107\,688,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ исп.} \times 1,052 \times 1,052 = 715\,072,44 \text{ руб.}$

7.2.2 Ориентировочная стоимость проведения технического контроля, анализ результата и выпуск акт-отчета составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 6 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 991\,617,84 \text{ руб.}$$

7.3 Ориентировочная стоимость сборочно-снарядательных работ изделий с оформлением сопроводительных документов для поставки изделий, организация транспортирования изделий в 2018 г. составит 2 650 274,00 руб. в том числе:

7.3.1 Ориентировочная стоимость организации сборочно-снарядательных работ изделий с оформлением сопроводительных документов для поставки изделий составит:

$$149\,335,00 \text{ руб.} \times 4 \text{ чел/мес} \times 1,052 \times 1,052 = 661\,078,56 \text{ руб.}$$

7.3.2 Ориентировочная стоимость сборочно-снарядательных работ составит:  $27\,012,43 \text{ руб.} \times 70 \text{ шт.} \times 1,052 = 1\,989\,195,44 \text{ руб.}$

## Структура затрат на испытания

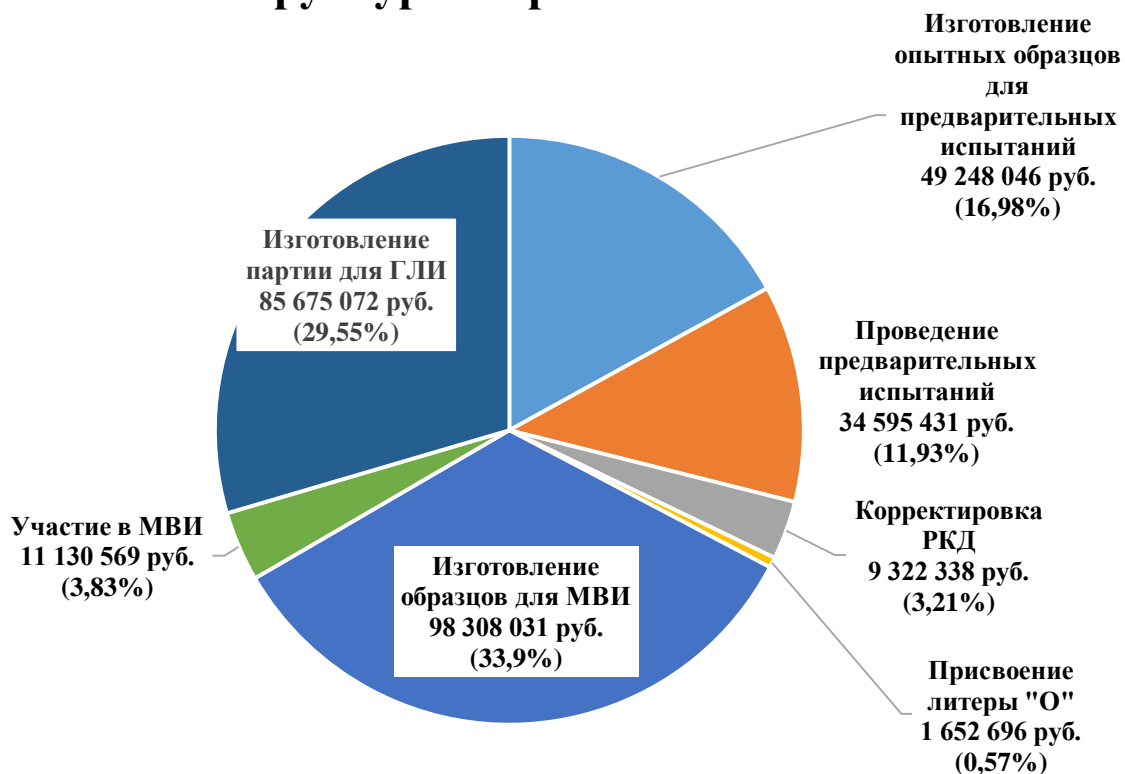


Рис. 1.1. Структура затрат на проведение испытаний

### 6.3 Выводы раздела

Итоговая ориентировочная стоимость СЧ ОКР составит 376 188 613,84 руб. (с учетом неучтенных затрат (10%) – 410 892 369,91 руб.) в том числе:

- по этапу 1 – 14 143 911,70 руб.,
- по этапу 3 – 289 932 187,57 руб.

Ориентировочная стоимость изготовления одного двигателя в условиях серийного производства на предприятии ФГУП «ФЦДТ «Союз» в 2019 году составит 1 381 997,153 руб., при условии поставочной партии 70 шт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения дипломного проекта был спроектирован маршевый реактивный двигатель на твердом топливе для установки разминирования, удовлетворяющий требованиям ТЗ. Были рассмотрены следующие аспекты:

1. Конструкторская часть:
  - Спроектирована форма основного изделия, удовлетворяющая требованиям ТЗ.
  - Подобранны материалы различных узлов и агрегатов двигателя, проведен тепловой расчет.
  - Выбрана и спроектирована конструкция соплового блока, выполнен подбор материалов.
  - Проведены прочностные расчеты разъемных соединений.
  - Рассчитана необходимая масса воспламенительного состава, определена конструкция ВУ.
  - Спроектирована оснастка для проведения ОСИ. Спроектировано стапельное оборудование, подобрана система измерения.
2. Исследовательская часть:
  - Проработана программа и методика проведения огневых стендовых испытаний, направленная на подтверждение ВБП и ЭП.
  - Обработаны опытные данные изделия-аналога.
3. Технологическая часть:
  - Произведена проработка технологического процесса изготовления передней крышки двигателя.
  - Спроектирован кондуктор и инструменты, необходимые для изготовления детали.
4. Охрана труда и экологическая безопасность:
  - Проведен анализ вредных и опасных факторов процесса проведения огневых стендовых испытаний.



- Рассмотрены НТД и законодательство РФ для проведения работ с РДТТ.

- Произведен расчет системы вентиляции, необходимой при работе персонала с основным изделием.

5. Экономико-организационная часть:

- Разработан план-график проведения НИОКР.

- Проведен расчет затрат на проект: затраты на проектирование, затраты на изготовление и затраты на испытания.

- Построены сетевой график и диаграмма Ганта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лавров Л.Н. Болотов А.А. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1993.- 215 с.
2. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива.- М.: Машиностроение, 1987.- 328 с.
3. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива.-М.: Машиностроение, 1995.- 400 с.
4. Панин С.Д., Шишков А.А., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива.-М.: Машиностроение, 1988.- 240 с.
5. Андреев Е.А., Ягодников Д.А. Расчёт предельных отклонений основных параметров РДТТ: Метод. указания. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 28с.: ил.
6. 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, 2009.- 112 с.
7. Дорофеев А.А. Проектирование и расчёт параметров и характеристик камеры ракетного двигателя: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2002. – 52 с.
8. Веницкий А.М. Ракетные двигатели на твёрдом топливе.- М. Машиностроение, 1973.- 327 с.
9. Колосков М.М., Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. – М.: «Машиностроение», 2001.
10. Зайцев Б.Г., Шевченко А.С. Справочник молодого токаря – М.: Высш. Школа, 1979. – 367 с., ил. – (Профтехобразование. Обработ. резанием.)
11. Байков Б.А. Атлас конструкций узлов и деталей машин: учеб. пособие/ Под ред. Ряховского О.А., Леликова О.П. – 2-е изд., перераб. И доп //М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана – 2009

12. ГОСТ 18429-73 Втулки кондукторные постоянные [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 08.04.2019).
13. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением №1) [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 08.04.2019).
14. Кубота Н. Твердые ракетные топлива и взрывчатые вещества. 2-е, расш. издание. Пермь, 2009. — 546 с. Пер. с англ. (изд-во Wiley-VCH Verlag GmbH, ФРГ, 2007. — 509 с.).
15. ГН 2.2.5.2100–06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны постоянные [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/90201567> (дата обращения: 08.04.2019).
16. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны постоянные [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 08.04.2019).
17. СанПиН 4630-88 Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения постоянные [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000155> (дата обращения: 08.04.2019).
18. Справочник по токсикологии и гигиеническим нормативам (ПДК) потенциально опасных химических веществ п/ред. В. С. Кушневой и Р. Б. Горшковой, М., ИздАТ, 1999.
19. Беспмятников Г. П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник.- Л.: Химия, 1985 г.
20. ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901865554> (дата обращения: 08.04.2019).
21. ОСТ В 84-2440-90 Коллоксилин марки Н. Технические условия.

22 Вредные вещества в промышленности п/ред. Э. Н. Левиной, И. Д. Гадаскиной. - Л.: Химия, 1985.

23 Грушко Я. М. Вредные органические соединения в промышленных выбросах в атмосферу. Справочник.-Л.: Химия, 1986.

24 Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой [Электронный ресурс].– URL: [http://www.un.org.ru/documents/decl\\_conv/conventions/pdf/montreal.pdf](http://www.un.org.ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/montreal.pdf) (дата обращения: 11.05.2019).