

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы  
Специальность: 24.03.01 — Ракетные комплексы и космонавтика  
Направление (профиль) образовательной программы — Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
  
\_\_\_\_\_ В.В. Соловьев  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Разработка вертикального стенда для проведения огневых испытаний ракетных двигателей с тягой до 200 тонн–сил

Исполнитель  
студент группы 1109–об2

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

А.А. Жилин

Руководитель  
профессор, д–р техн. наук

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

А.Д. Плутенко

Консультант  
доцент

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

К.А. Насуленко

Консультант по БЖД  
доцент, канд. тех. наук

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль  
стар. пред. кафедры СиТРК

  
\_\_\_\_\_ (подпись, дата)

М.А. Аревков

Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

В.В. Соловьев

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Жилина Алексея Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка вертикального стенда для проведения огневых испытаний ракетных двигателей с тягой до 200 тонн–сил. (утверждена приказом от 22.04.2025 №1055-уч)
2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 06.06.2025 года.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: компоненты топлива: нафтил (РГ-1) – жидкий кислород (О<sub>2ж</sub>); вспомогательные компоненты – азот (N<sub>2</sub>), гелий (He<sub>2</sub>); время испытаний  $t = 270$  с; температура заправки РГ-1  $T(\text{РГ} - 1) = 15 \pm 5$  °С; температура заправки О<sub>2ж</sub>  $T(\text{О2ж}) = -184 \pm 1$  °С; соотношение компонентов топлива  $k_m = 2,71$ ; удельный импульс  $I_y = 3120$  м/с.
4. Содержание выпускной квалификационной работы: анализ стендовых комплексов, расчет системы топливоподачи, расчет конструкции газоотражательного канала, расчет на прочность элементов конструкции, описание конструкции, технологическая часть, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, принципиальная схема, ПГС, общий вид, ККС, результаты расчетов, компенсатор, технологическая часть, заключение.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: раздел БЖД: канд.техн.наук Козырь А.В., доцент Насуленко К.А.

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025 года.

Руководитель выпускного квалификационного проекта: Плутенко Андрей Долиевич, профессор, д-р техн. наук

Задание к исполнению принял (дата): 29.05.2025 г.



## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит: 84 страниц, 14 рисунков, 20 таблиц, 11 источников.

СТЕНДОВЫЙ КОМПЛЕКС, СИСТЕМА ТОПЛИВОПОДАЧИ, ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ, КОНСТРУКТИВНО–КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА, ЖИДКОСТНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СХЕМА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

В рамках выпускной квалификационной работы был произведен анализ принципиальных схем стендов огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей. По полученным данным сформированы принципиальная схема разрабатываемого стенда и обобщенная пневмогидравлическая схема стенда.

В основной части произведены расчеты конструкции стенда, системы топливоподачи, а также, произведены расчеты на прочность. По полученным результатам был спроектирован универсальный огневой стенд.

Цель: проектная разработка стенда для проведения огневых испытаний ракетных двигателей с тягой до 200 тонн–сил.

Задачи:

- Провести анализ принципиальных схем стендов огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей;
- Разработать принципиальную схему стенда;
- Разработать пневмогидравлическую схему стенда;
- Рассчитать основные проектные параметры систем и элементов стенда;
- Разработать общий вид стенда;
- Разработать конструктивно–компоновочную схему стенда;
- Разработать технологический процесс проведения испытаний на стенде.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	7
Введение	8
1 Основная часть	9
1.1 Назначение и состав огневых стендовых комплексов	9
1.2 Анализ конструктивно–компоновочных схем	11
2 Расчетная часть	15
2.1 Определение основных проектных параметров стенда	15
2.2 Расчет газоотражательного канала	16
2.2.1 Расчет оптимального угла наклона газоотражателя	16
2.2.2 Расчет оптимальной высоты газоотражательного канала	21
2.2.3 Выбор оптимального материала газоотводящего канала	25
2.3 Расчет системы топливоподачи	29
2.3.1 Расчет топливных баков стенда	29
2.3.2 Расчет магистралей подачи топлива	37
2.4 Расчет на прочность элементов конструкции	41
2.4.1 Расчет на прочность компенсатора трубопровода горючего	43
2.4.2 Расчет на прочность компенсатора трубопровода окислителя	45
2.4.3 Расчет на прочность всасывающего трубопровода	46
2.4.4 Расчет на прочность напорного трубопровода	48
3 Описание конструкции стенда	49
3.1 Монтажно-испытательный корпус	50
3.2 Огневой бокс и стапель стенда	51
3.3 Топливная система стенда	52
3.4 Система газоснабжения	53
3.5 Система водоснабжения	54
3.6 Газоотражательный канал	54
4 Разработка технологического процесса испытаний	55
5 Безопасность труда при эксплуатации стенда	58

5.1 Введение	58
5.2 Анализ условий труда	59
5.2.1 Микроклимат	59
5.2.2 Оценка шумовых нагрузок и проектирование звукоизоляции	61
5.2.3 Освещенность	64
5.2.4 Химические вещества	65
5.2.5 Тяжесть трудового процесса	66
5.2.6 Напряженность трудового процесса	66
5.2.7 Итоговый класс условий труда	66
5.3 Эргономика рабочего места	67
5.4 Электроопасность	67
5.5 Пожароопасность	68
5.6 Меры по предотвращению и ликвидации проливов КРТ	70
5.7 Выводы	71
6 Экономическая часть	72
6.1 Календарный план работы над проектированием стенда	73
6.2 Себестоимость огневого стенда	75
6.3 Оценка косвенного экономического эффекта	80
Заключение	81
Библиографический список	83

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ДУ — двигательная установка;

ЖРД — жидкостный ракетный двигатель;

РН — ракета-носитель;

ККС — конструктивно-компоновочная схема;

КРТ — компоненты ракетных топлив;

ОС — огневой стенд;

ОСИ — огневые стендовые испытания;

ОИ — объект испытания;

ПГС — пневматическая и гидравлическая система;

ТНА — турбонасосный агрегат;

ДД — датчик давления;

ДТ — датчик температуры;

УВД — ударно-волновое давление;

ЭБ — эксплуатационная безопасность;

ПМБ — правила и меры безопасности.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире ракетно–космическая отрасль является одной из наиболее динамично развивающихся и востребованных областей науки и техники. Одним из ключевых этапов при создании и совершенствовании жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является проведение огневых испытаний, обеспечивающих проверку рабочих параметров и надежности двигателей в условиях, максимально приближенных к реальным. Данные испытания требуют создания сложных и надежных стендов, которые обеспечивают безопасные и точные условия для проведения испытательных процессов.

Предполагается, что предложенные решения и разработанная схема будут способствовать улучшению безопасности и эффективности проведения огневых испытаний ЖРД. Реализация поставленных задач создаст базу для дальнейших исследований и разработок в данной области, а также позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации испытательных стендов.

Данная работа позволит обобщить и систематизировать знания, необходимые для проектирования и эксплуатации испытательных стендов, а также обеспечит теоретическую и практическую основу для дальнейших исследований и разработок в области огневых испытаний ЖРД.

# 1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Назначение и состав огневых стендовых комплексов

Стендовый комплекс огневых испытаний — это специализированный инженерно–технический комплекс, предназначенный для проведения огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) или их компонентов в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным. Такой комплекс состоит из различных систем и оборудования, обеспечивающих безопасное и точное проведение испытаний, включая:

- системы топливоподачи и газоснабжения, которые контролируют подачу топлива, окислителя и рабочих газов;
- систему управления и мониторинга, обеспечивающую автоматическое управление параметрами и сбор данных в режиме реального времени;
- системы безопасности, предназначенные для предотвращения аварийных ситуаций и минимизации рисков в ходе испытаний.

Стендовый комплекс огневых испытаний позволяет проверить и подтвердить характеристики двигателя, оценить его устойчивость и работоспособность при высоких нагрузках, выявить возможные конструктивные или эксплуатационные недостатки. Данные, полученные в процессе испытаний, служат основой для доработки и оптимизации двигателя перед его внедрением и использованием в ракетно–космической технике.

Принципиальная схема комплекса представлена на рисунке 1.

По данным представленной схемы видно, что системы топливоподачи и газоснабжения являются ключевыми компонентами стендов для огневых испытаний ЖРД. Они обеспечивают подачу горючего и окислителя под нужным давлением и расходом, что позволяет достичь условий, приближенных к реальным, и проверить работу двигателя в условиях высокой нагрузки. Надежная работа этих систем — необходимое условие для безопасного проведения испытаний, так как любые отклонения в параметрах подачи могут привести к некорректной работе двигателя или аварийным ситуациям.

Кроме того, системы топливоподдачи и газоснабжения требуют высокоточной регулировки и постоянного контроля параметров, таких как давление, температура, и расход топлива. Это особенно важно, поскольку даже незначительные изменения в этих характеристиках могут привести к нарушению режима работы двигателя и повлиять на его надежность и безопасность.

Эффективная работа этих систем также позволяет снизить затраты на испытания за счет экономного использования топлива и газа, что особенно важно при многократном проведении тестов. Таким образом, разработка и оптимизация систем топливоподдачи и газоснабжения является неотъемлемой частью процесса проектирования и эксплуатации стендов для огневых испытаний, способствуя улучшению общей эффективности и безопасности ракетно–космических разработок.

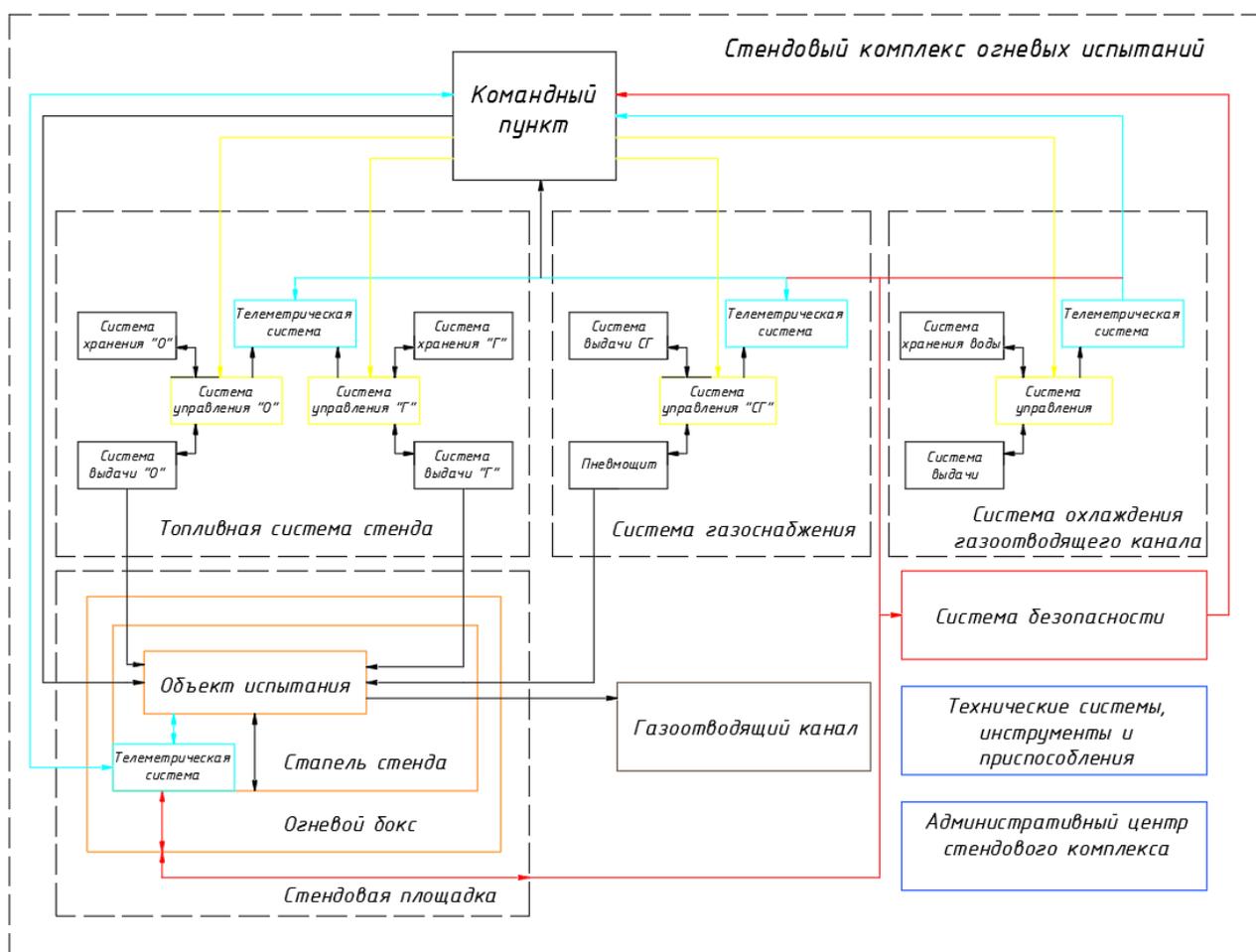


Рисунок 1 – Принципиальная схема стендового комплекса огневых испытаний

## 1.2 Анализ конструктивно–компоновочных схем

Конструкция стенда должна обеспечить возможность проведения испытаний соответствующего класса ЖРД, определяемого его тягой и видом топлива. Одновременно с этим стенд должен позволить испытание в дальнейшем двигателей больших тяг, работающих на более энергетически эффективных топливах; т. е. стенд с учетом его значительной стоимости должен быть рассчитан на перспективу. Отсюда, к конструкции стенда предъявляются следующие основные требования:

— обеспечение необходимой ориентации и надежного крепления средств испытаний (стапелей, подвесок, вспомогательных агрегатов);

— планировка стенда должна обеспечивать качественное проведение измерений, визуальное наблюдение с помощью телевизионной аппаратуры, проведение видео– и киносъемок процесса работы объекта испытания;

— стенд должен обладать необходимым запасом прочности и обеспечивать надежную защиту технического персонала и окружающих зданий на случай аварийного срабатывания ЖРД.

По назначению испытываемых двигателей стенды делятся на:

— наземные, предназначенные для испытаний двигателей первых ступеней ракет или двигателей верхних ступеней без прямого измерения тяги, так как сопло работает в нерасчетном режиме;

— высотные, позволяющие обеспечить необходимую степень расширения в сверхзвуковом сопле;

— морские, позволяющие имитировать условия подводного запуска.

Стенды подразделяются по роду используемых компонентов на криогенные и кислотные. На стендах с криогенными топливами должна быть обеспечена теплоизоляция баков и топливных магистралей. Стенд должен быть оснащен системой эжектирования и вакуумирования баков, системой циркуляции. На кислотных стендах необходимо наличие устройств для нейтрализации продуктов сгорания и охлаждающей воды, мощных систем вентиляции и водоснабжения.

По способу подачи компонентов стенды делятся на вытеснительные и турбонасосные.

Огневые стендовые испытания ЖРД проводятся при горизонтальной, вертикальной, либо наклонной ориентации двигателя относительно поверхности Земли. Поэтому различают следующие огневые стенды:

- горизонтальные;
- наклонные;
- вертикальные.

Сооружение, предназначенное для подготовки и проведения огневых испытаний двигателя или его агрегатов в условиях, приближающихся к эксплуатационным, оснащенное специальными системами, обеспечивающими работу двигателя и контроль его параметров, называется испытательным стендом.

Конструкция стенда должна обеспечить возможность проведения испытаний соответствующего класса ЖРД, определяемого его тягой и видом топлива. Одновременно с этим стенд должен позволить испытание в дальнейшем двигателей больших тяг, работающих на энергетически эффективных топливах; т.е. стенд с учетом его значительной стоимости должен быть рассчитан на перспективу.

По назначению испытываемых двигателей стенды делятся на наземные, предназначенные для испытаний двигателей, первых ступеней ракет или двигателей верхних ступеней без прямого измерения тяги, так как сопло работает в нерасчетном режиме; высотные, позволяющие обеспечить необходимую степень расширения в сверхзвуковом сопле, и морские, позволяющие имитировать условия подводного запуска.

В рамках данной работы опишем элементарную типовую пневмогидравлическую схему (ПГС) для описания технологического процесса. Схема представлена на рисунке 2.

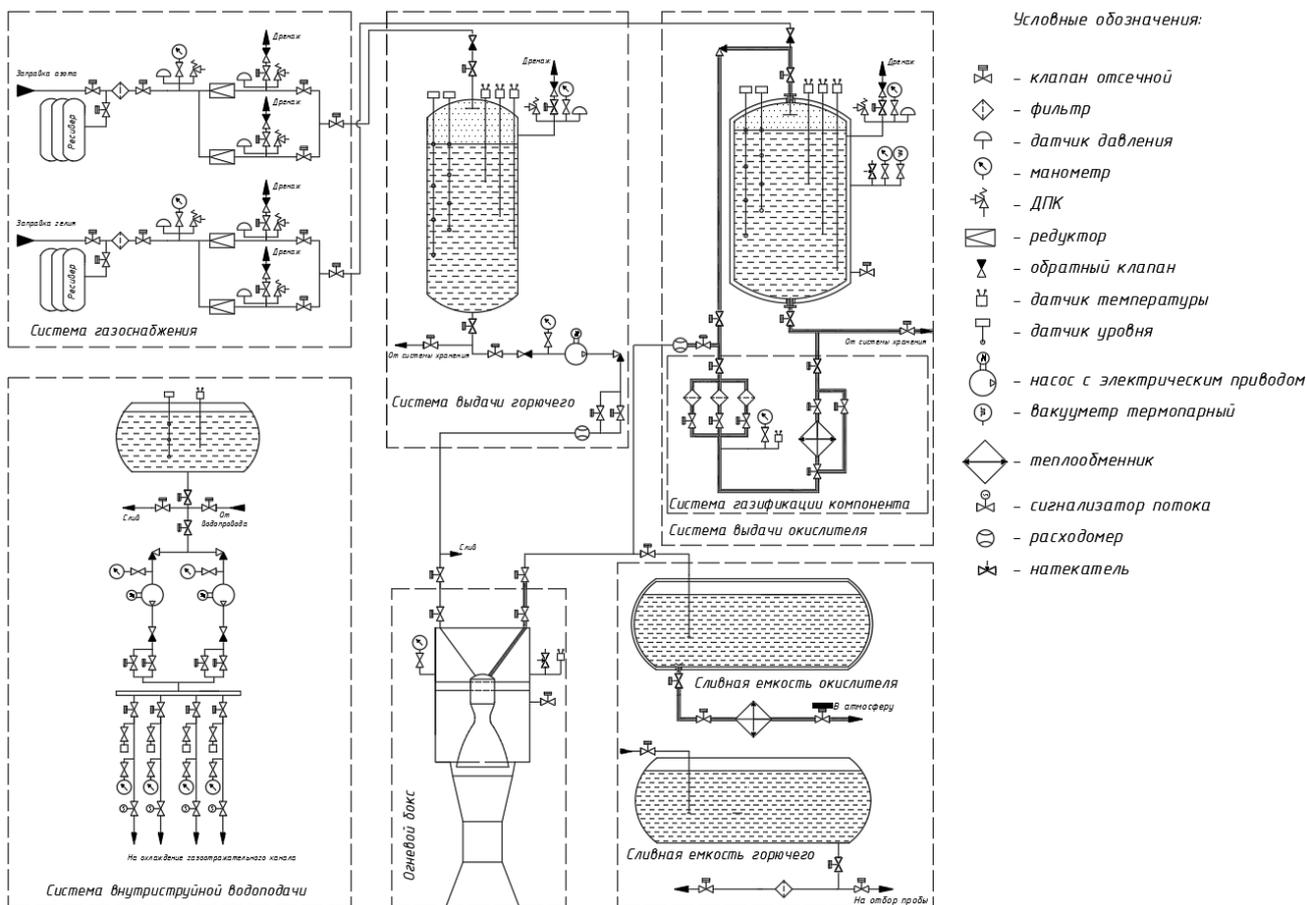


Рисунок 2 – ПГС станда

В представленной ПГС рассматриваются следующие основные системы станда:

- Система газоснабжения;
- Система выдачи горючего;
- Система выдачи окислителя;
- Система водяного охлаждения пускового стола;
- Огневой бокс;
- Сливная система.

Система газоснабжения представлена в виде блока высокого давления – баллонная рампа для хранения сжатого азота и пневмоцита распределения и выдачи. В пневмоците, в свою очередь, расположены блок редукторов давления, датчики контроля, предохранительные датчики и линии большого и малого расходов.

Система выдачи горючего представлена в виде стендового бака–дозатора, оснащенного необходимой измерительной и магистральной арматурой. Бак–дозатор заправляется по магистрали от хранилища топлива. Для контроля заправки предусмотрены магнитные датчики уровня. Для контроля температурного режима – датчики температуры на разных высотах столба жидкости.

Сам бак–дозатор представляет собой стационарный вертикальный цилиндрический резервуар из коррозионно–стойкого материала. В процессе выдачи горючего на объект испытания (ОИ) применяется насосная откачка. Для поддержания заданного уровня давления в баке предусмотрен наддув азотом от системы газоснабжения.

В системе выдачи окислителя представлен бак–дозатор с необходимой измерительной и магистральной арматурой и система газификации компонента. Бак–дозатор окислителя представлен в виде вертикального цилиндрического стационарного резервуара с экранно–вакуумной теплоизоляцией для поддержания температурного режима.

Для вытеснения окислителя в процессе испытания предусмотрена гибридная система наддува. Основной наддув происходит за счет подачи гелия в газовую подушку бака–дозатора. Для создания дополнительного давления предусмотрена газификация окислителя.

Система охлаждения пускового стола предназначена для подачи воды на конструкцию огневого бокса и газоотражательного канала с целью уменьшения газодинамических нагрузок в процессе испытания. Подача воды осуществляется за счет насосов высокого давления.

В случаях нештатных ситуаций или сливов остатков компонентов топлива предусмотрены стендовые сливные ёмкости для компонентов топлива.

## 2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Определение основных проектных параметров стенда

Задача выбора основных проектных параметров заключается в определении оптимальной комбинации этих параметров, обеспечивающей выполнение главной цели испытания – получение количественных и качественных характеристик исследуемого объекта, с учетом ограничений, среди которых особое значение имеют следующие аспекты:

1) Определение основных требований, которые должны быть учтены при разработке испытательного стенда.

2) Сбор и анализ ключевой информации о характеристиках объекта испытания, для которого будет использоваться данный стенд.

3) Разработка конструктивных и габаритных параметров стенда, чтобы он соответствовал требованиям и обеспечивал необходимую функциональность.

4) Определение назначения стенда, видов и категорий испытаний, которые будут проводиться на нем.

5) Определение перечня измеряемых параметров и выбор соответствующих типов измерительных преобразователей для точного и надежного измерения этих параметров.

6) Установление требований к вспомогательному оборудованию, необходимому для транспортировки и установки объекта испытания на стенде.

В общем виде расчет сводится к определению основных характеристик систем стендового комплекса. Расчет можно разделить на несколько этапов:

- Расчет газоотводящего канала стенда;
- Расчет топливной системы стенда;
- Расчет элементов стенда на прочность.

Исходные данные:

— В качестве объекта испытания принят однокамерный жидкостный ракетный двигатель первой ступени «Ангара-5» РД-191;

- Компоненты топлива: нафтил (РГ-1) – жидкий кислород ( $O_{2ж}$ );
- Время испытаний – 270 с;
- Вспомогательные компоненты – азот ( $N_2$ ), гелий ( $He_2$ );
- РГ-1 заправляется при температуре  $15 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этой температуре плотность компонента составляет  $\rho_2 = 820 \dots 830 \text{ кг} / \text{м}^3$ ;
- $O_{2ж}$  заправляется при температуре  $-184 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этой температуре плотность составляет  $\rho_o = 1141 \dots 1190 \text{ кг} / \text{м}^3$ ;
- Соотношение компонентов топлива для РД-191  $k_m = 2,71$ ;
- Удельный импульс РД-191  $I_y = 3120 \text{ м} / \text{с}$ .

## 2.2 Расчет газоотражательного канала

### 2.2.1 Расчет оптимального угла наклона газоотражателя

Схема взаимодействия струи с отражателем представлена на рисунке 3.

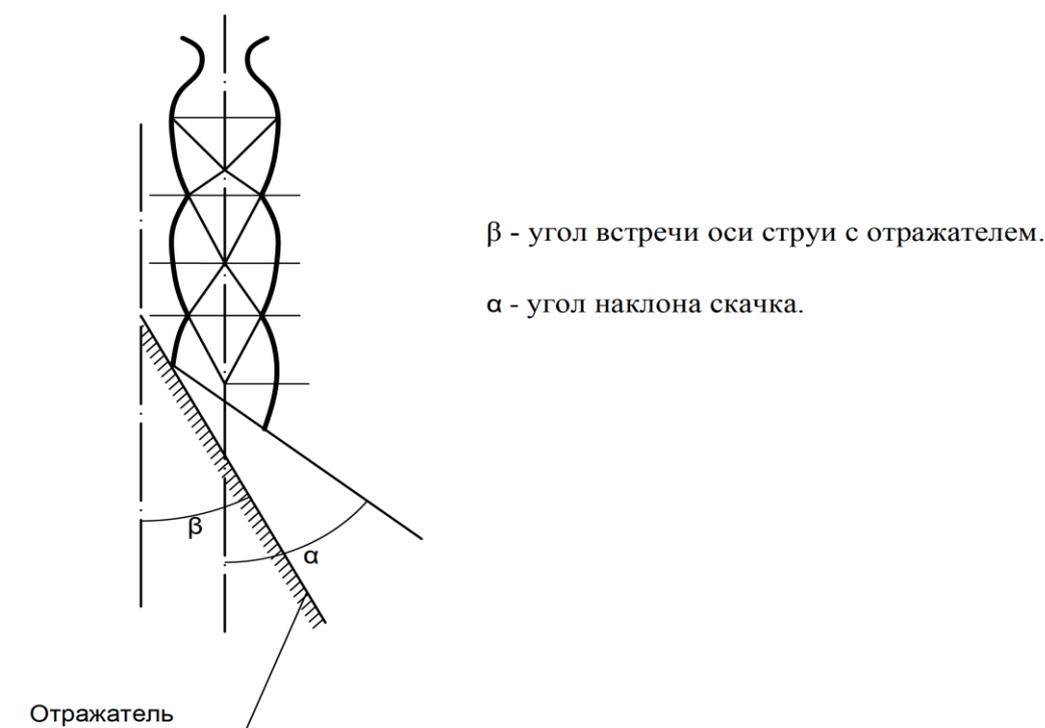


Рисунок 3 – Схема взаимодействия струи с отражателем

В зависимости от угла встречи газовой струи с поверхностью газоотражателя произойдет разворот вектора направленности потока. В случае,

если угол наклона подобран не верно, произойдет разворот потока, который может повредить изделие или конструкцию стенда.

Для расчета воздействия струи на отражатель воспользуемся следующими формулами:

Угол наклона скачка:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1}{M_i} + \frac{(K+1)}{4} \frac{M_i^2}{M_i^2 - 1} \beta, \quad (1)$$

где  $M$  — число Маха истечения газов из сопла при выходе ДУ на рабочий режим;

$\beta$  — угол встречи оси струи с отражателем;

$K$  — показатель адиабаты, принимаемый равным 1,4.

Скорость (число  $M$ ) после скачка на отражателе:

$$M_{\text{отр}} = \frac{1}{\sin \theta}, \quad (2)$$

$$\theta = 2\alpha - \beta - \operatorname{arcsin} \frac{1}{M_i}. \quad (3)$$

Для наглядности оптимальной эффективности выбранного угла рассмотрим коэффициент гашения скорости газовой струи:

$$\gamma = \frac{M}{M_{\text{отр}}}, \quad (4)$$

где  $M$  — это скорость истечения газов из сопла;

$M_{\text{отр}}$  — это скорость отраженного газа.

На уже известных советских стартовых сооружениях и огневых стендах углы наклона граней односкатных отражателей обычно составляют 25–35°.

Число Маха, при выходе РН на режим, обычно стремительно возрастает в диапазоне значений от 4 до 6 единиц.

Произведем расчет согласно формулам (1) – (4):

$$\alpha(M = 4) = \arctg \frac{1}{4} + \frac{(1,4+1)}{4} \frac{4^2}{4^2 - 1} \times 25 = 16,245,$$

$$\alpha(M = 5) = \arctg \frac{1}{5} + \frac{(1,4+1)}{4} \frac{5^2}{5^2 - 1} \times 25 = 15,822,$$

$$\alpha(M = 6) = \arctg \frac{1}{6} + \frac{(1,4+1)}{4} \frac{6^2}{6^2 - 1} \times 25 = 15,594.$$

Результаты расчета угла отражения  $\alpha$  сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета угла отражения  $\alpha$

Угол наклона отражателя $\beta$ , град	Угол отражения $\alpha$ при разных числах М, град		
	М = 4	М = 5	М = 6
25	16,245	15,822	15,594
26	16,885	16,447	16,211
27	17,525	17,072	16,828
28	18,165	17,697	17,445
29	18,805	18,322	18,062
30	19,445	18,947	18,679
31	20,085	19,572	19,297
32	20,725	20,197	19,914
33	21,365	20,822	20,531
34	22,005	21,447	21,148
35	22,645	22,072	21,765

$$\theta(M = 4) = 2 \times 16,245 - 25 - \arcsin \frac{1}{4} = 7,237,$$

$$\theta(M = 5) = 2 \times 15,822 - 25 - \arcsin \frac{1}{5} = 6,443,$$

$$\theta(M = 6) = 2 \times 15,594 - 25 - \arcsin \frac{1}{6} = 6,021.$$

Результаты расчета параметра  $\theta$  сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета параметра  $\theta$

Угол наклона отражателя $\beta$ , град	Параметр $\theta$ при разных числах $M$ , град		
	$M = 4$	$M = 5$	$M = 6$
25	7,237	6,443	6,021
26	7,517	6,693	6,255
27	7,797	6,943	6,489
28	8,077	7,193	6,723
29	8,357	7,443	6,957
30	8,637	7,693	7,191
31	8,917	7,943	7,427
32	9,197	8,193	7,661
33	9,477	8,443	7,895
34	9,757	8,693	8,129
35	10,037	8,943	8,363

$$M_{\text{отр}}(M = 4) = \frac{1}{\sin 7,237} = 1,226,$$

$$M_{\text{отр}}(M = 5) = \frac{1}{\sin 6,443} = 6,284,$$

$$M_{\text{отр}}(M = 6) = \frac{1}{\sin 6,021} = -3,858.$$

Результаты расчета числа Маха отраженного потока  $M_{\text{отр}}$  сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчета числа Маха отраженного потока  $M_{отр}$

Угол наклона отражателя $\beta$ , град	Числа Маха отраженного потока $\theta$ при разных числах М		
	М = 4	М = 5	М = 6
25	1,226	6,284	-3,858
26	1,06	2,51	-35,484
27	1,002	1,631	4,893
28	1,025	1,267	2,349
29	1,141	1,091	1,603
30	1,411	1,013	1,269
31	2,057	1,004	1,099
32	4,428	1,06	1,019
33	-19,158	1,203	1,001
34	-3,066	1,497	1,039
35	-1,74	2,158	1,145

$$\gamma(M = 4) = \frac{4}{1,226} = 3,263,$$

$$\gamma(M = 5) = \frac{5}{6,284} = 0,796,$$

$$\gamma(M = 6) = \frac{6}{-3,858} = -1,555.$$

Результаты расчета коэффициента гашения газового потока  $\gamma$  сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета коэффициента гашения газового потока  $\gamma$

Угол наклона отражателя $\beta$ , град	Коэффициент газового потока $\gamma$ при разных числах М		
	М = 4	М = 5	М = 6
25	3,263	0,796	-1,555

26	3,774	1,992	-0,169
27	3,992	3,066	1,226
28	3,902	3,946	2,554
29	3,506	4,583	3,743
30	2,835	4,936	4,728
31	1,945	4,98	5,46
32	0,903	4,717	5,888
33	-0,209	4,156	5,994
34	-1,305	3,34	5,775
35	-2,299	2,317	5,24

По результатам расчета видно, что при угле наклона грани отражателя  $\beta = 33^\circ$  коэффициент гашения потока  $\gamma$  максимальный, при условии, что двигатель вышел на режим ( $M = 6$ ). Но, при запуске двигателя, когда  $M = 4$ , при столкновении потока с газоотражателем, давление потока возрастает на негативный коэффициент  $\gamma = -0,209$ . Следовательно, принято решение, использовать угол наклона газоотражательного канала равный  $\beta = 32^\circ$ , т.к. коэффициенты гашения в данном случае, являются наиболее оптимальными.

#### 2.2.2 Расчет оптимальной высоты газоотражательного канала

На рисунке 4 представлена схема относительных размеров газовых лотков стартовых сооружений и испытательных стендов. Следует отметить, что глубина газохода и расстояние от сопел до днища газохода являются величинами, характеризующими габаритные размеры сооружения и ими, определяется возможность обеспечения поворота струи двигательной установки без возникновения отраженных течений. Поперечный размер газохода менее важен при выполнении условия отвода газовых струй двигательной установки, так как на стенки газохода воздействуют растекающиеся по газоотражателю потоки.

Поэтому влияние стенок приводит к увеличению толщины потока в газоходе и его направлению вдоль боковых стенок с подъемом вверх к выходу из газохода.

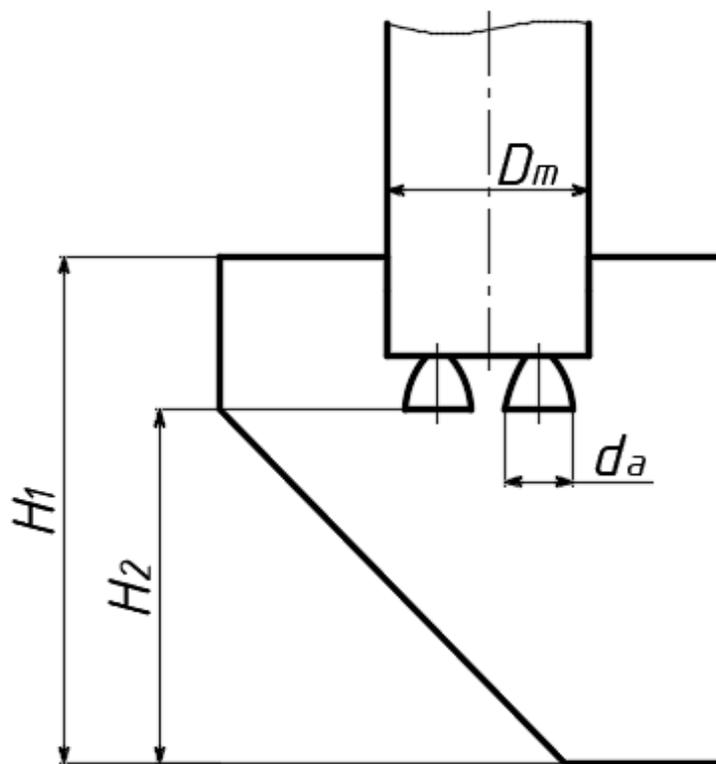


Рисунок 4 – Относительные размеры стартовых сооружений

В таблице 5 представлены относительные размеры лотков отечественных стартовых сооружений. Наибольшие размеры ( $\bar{H} = 8,0$ ) имеют стартовые сооружения для РКН «Союз». Для них, как отмечалось выше, газодинамические условия при старте РН близки к условиям начала полета. Однако размеры этих сооружений нельзя признать оптимальными. В силу малой изученности газодинамических процессов при старте размеры первых сооружений были значительно завышены. Если перенести эти подходы на выбор размеров стартового сооружения типа УКСС для РН «Энергия», то его размер  $H_2$  должен быть равен 80 м. Минимальные относительные размеры ( $\bar{H} = 2,8$ ) имеет стартовое сооружение комплекса РКН «Протон-К». При этом практика его использования показала, что весьма высокая газонапряженность приводит к значительным тепловым нагрузкам, требующим специальных мер защиты

поверхности отражателя и стен газоходов, и к необходимости периодического проведения ремонтно-восстановительных работ.

Таблица 5 – Относительные размеры отечественных стартовых сооружений

Характеристики	Индекс стартового комплекса / Ракета-носитель			
	8П871 / «Союз»	11П825 / «Протон»	11П877 / «Зенит-2»	8П882К / «Протон-К»
Количество газоходов	1	3	1	2
Диаметр поперечного сечения сопла двигателя $d_a$ , м	1,85	1,5	3,6	1,5
Высота стартового сооружения $H_1$ , м	35,2	21	22	8,5
Расстояние от среза сопла до нижней части газоотражателя $H_2$ , м	28,5	19	18,2	7
Геометрическая характеристика компоновки сопел $D_x$ , м	4	6	2,95	2,72
Интенсивность силовых и тепловых нагрузок $\bar{R}$	0,096	1,53	0,6	2,367
$\bar{H}_1 = \frac{H_1}{D_x}$	8,8	3,5	7,45	3,13
$\bar{H}_2 = \frac{H_2}{D_x}$	7,1	3,2	6,15	2,57
Критерий относительных размеров стартового сооружения $\bar{H} = \frac{\bar{H}_1 + \bar{H}_2}{2}$	8	3,3	6,8	2,8

Поэтому наиболее оптимальными относительными размерами являются  $\bar{H} = 3,5 - 4,5$ . Сопоставление отечественных ПУ и методов обработки вопросов газодинамики показывает, что, несмотря на различия в отдельных решениях, вызванных разной технологией подготовки к пуску и различиями в характеристиках РН, можно отметить общие подходы и решения.

Дополнительные исходные данные к расчету:

$$\bar{H} = 4;$$

$$D_m = 2,3 \text{ м (принимается больше значения диаметра РД-191)}.$$

Определим геометрическую характеристику компоновки двигателя  $D_x$  которая включает в себя как разнесение сопел по днищу, так и суммарную площадь сопел.

$$D_x = \sqrt{D_m D_9}, \quad (5)$$

где  $D_9$  – диаметр окружности, эквивалентный по площади сумме площадей всех сопел двигательной установки. В данном случае  $d_a = 2,1$  м.

$$D_9 = \frac{\pi \times d_a^2 \times i}{4}, \quad (6)$$

$$D_9 = \frac{3,14 \times 2,1^2}{4} = 1,649 \text{ м},$$

$$D_x = \sqrt{2,3 \times 1,649} = 1,948 \text{ м}.$$

Статистика показала, что оптимальной глубиной установки РН на стартовую позицию является 1,5–3 метра для ракет-носителей среднего и полутяжелого классов. Поэтому, примем  $H_3 = H_1 - H_2 = 2$  м.

Тогда, из выражения:

$$\overline{H} = \frac{\overline{H}_1 + \overline{H}_2}{2}, \quad (7)$$

Получим:

$$4 = \frac{\frac{H_2 - 2}{D_x} + \frac{H_2}{D_x}}{2}, \quad (8)$$

$$\frac{2H_2 - 2}{D_x} = 8, \quad (9)$$

$$2H_2 = 8D_x + 2, \quad (10)$$

$$H_2 = \frac{8 \times 1,948 + 2}{2} = 8,792 \text{ м.}$$

Тогда  $H_1$ :

$$H_1 = 10,792.$$

Исходя из практических соображений примем  $H_1 = 11 \text{ м}, H_2 = 9 \text{ м}$ .

Это означает, что 11 метров – это минимальная высота газоотводящего канала, необходимая для безопасного проведения испытаний одного двигателя РД–191.

### 2.2.3 Выбор оптимального материала газоотводящего канала

Выбор подходящего материала для газоотражателя представляет собой значительное задание при разработке огневых стендов. Продолжительное воздействие газовой струи на отражатель приводит к постепенному отходу слоев материала с поверхности конструкции, и данное явление невозможно полностью исключить. В связи с этим выбор материала обусловлен критериями теплостойкости и стоимости восстановительных работ.

В таблице 6 представлены характеристики жаропрочных материалов.

Таблица 6 – Характеристики материалов газоотражателя

Характеристики	Материал газоотражателя		
	Ст20	25Х5М	Бетон «500»
Удельный вес $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	7850	8040	7750
Теплоёмкость материала $c$ , Дж / кг °С	687	992	822
Коэф. теплопроводности $\lambda$ , Вт / м °С	31	30	46
Температура плавления $T_{пл}$ , °С	1280	1660	1455

Тепловое воздействие на газоотражатель характеризуется следующими данными:

– плотность теплового потока нарастает до  $q = 5000 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{с}} = 21 \times 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{с}}$  ;

– время теплового воздействия для огневых испытаний на стенде определяется циклограммой испытаний. В данном случае  $t = 270$  с.

При использовании водяного охлаждения плотность теплового потока в среднем уменьшается на 25%. Тогда плотность теплового потока будет равна  $q = 15,7 \times 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{с}}$ .

Температуру стенки  $T_{см}$  при заданном тепловом потоке определяется по приближенной формуле прогрева полубесконечного тела:

$$T_{см} = \frac{2 \times q \times \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi \times \gamma \times \lambda \times c}} 8, \quad (11)$$

где  $\tau$  – время нагрева поверхности.

Когда температура стенки достигает температуры плавления материала  $T_{см} = T_{пл}$ , начинается унос металла. Тогда:

$$\tau = \frac{T_{nl}^2 \times \pi \times \gamma \times \lambda \times c}{4 \times q^2}. \quad (12)$$

Определим время нагрева до начала плавления материалов, при стремительно нарастающем тепловом потоке газовой струи:

$$\tau_1^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (1 \times 10^6)^2} = 215,129 \text{ с},$$

$$\tau_2^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (3 \times 10^6)^2} = 23,903 \text{ с},$$

$$\tau_3^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (6 \times 10^6)^2} = 5,976 \text{ с},$$

$$\tau_4^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (9 \times 10^6)^2} = 2,656 \text{ с},$$

$$\tau_5^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (12 \times 10^6)^2} = 1,494 \text{ с},$$

$$\tau_6^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (15 \times 10^6)^2} = 0,956 \text{ с},$$

$$\tau_7^{Cm20} = \frac{1280^2 \times 3,14 \times 7850 \times 31 \times 687}{4 \times (18 \times 10^6)^2} = 0,664 \text{ с}.$$

Аналогично производим расчет начальной температуры плавления при разных величинах теплового потока для бетона. Результаты вычислений приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчетов  $\tau$  для выбранных материалов

Тепловой поток $q$ , $\frac{Дж}{м^2 \cdot с}$	Время начала плавления $\tau$ для выбранных материалов		
	Ст20	25Х5М	Бетон «500»
$1 \times 10^6$	215,129	517,839	487,245
$3 \times 10^6$	23,903	57,538	54,138

$6 \times 10^6$	5,976	14,384	13,535
$9 \times 10^6$	2,656	6,393	6,015
$12 \times 10^6$	1,494	3,596	3,384
$15 \times 10^6$	0,956	2,302	2,166
$18 \times 10^6$	0,664	1,598	1,504

Из проведенных расчетов видно, что для длительных испытаний оптимальным материалом для конструкции газоотводящего канала является высоколегированная сталь 25Х5М. Стоит отметить, что данная марка стали производится на территории России и не является дорогостоящим сплавом.

Для более точных результатов необходимо рассчитать величину уноса материала за время одного испытания.

Унос материала  $\delta$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta = \frac{4 \times \gamma \times S}{\Delta Q \times t}, \quad (13)$$

где  $\Delta Q$  – количество теплоты, необходимое на плавление материала,

$S$  – площадь задействованной поверхности.

Произведем расчет для одного стандартного прокатного листа с размерами 500x2200 [мм]. Тогда площадь поверхности:

$$S = 0,5 \times 2,2 = 1,1 \text{ м}^2.$$

Определим количество теплоты, необходимое на плавление материала:

$$\Delta Q = q \times \tau, \quad (14)$$

$$\Delta Q_{Cm20} = (18 \times 10^6) \times 0,664 = 119,516 \times 10^6 \text{ Дж / м}^2,$$

$$\Delta Q_{25X5M} = (18 \times 10^6) \times 1,598 = 287,689 \times 10^6 \text{ Дж / м}^2,$$

$$\Delta Q_{\text{Бетон}} = (18 \times 10^6) \times 1,504 = 270,692 \times 10^6 \text{ Дж} / \text{м}^2.$$

Тогда величина уноса материала:

$$\delta_{\text{Ст20}} = \frac{4 \times 7850 \times 1.1}{119,516 \times 10^6 \times 270} = 10,703 \text{ мкм},$$

$$\delta_{\text{25X5M}} = \frac{4 \times 8040 \times 1.1}{287,689 \times 10^6 \times 270} = 4,554 \text{ мкм},$$

$$\delta_{\text{Бетон}} = \frac{4 \times 7750 \times 1.1}{270,692 \times 10^6 \times 270} = 4,665 \text{ мкм}.$$

Результаты расчетов показали, что с поверхности газоотражателя из жаропрочной высоколегированной стали 25X5M, за время одного испытания, пропадет слой материала толщиной 4,554 мкм.

Соответственно, газоотражательный канал для проектируемого стенда открытого типа высотой 11 метров, из жаропрочной высоколегированной стали 25X5M с углом наклона 32°.

## **2.3 Расчет системы топливоподачи**

### **2.3.1 Расчет топливных баков стенда**

Топливная система стенда представляет собой комплексное оборудование, которое предназначено для подачи горючего и окислителя в испытуемый двигатель и обеспечения всех необходимых параметров для проведения испытаний. Топливная система обычно состоит из следующих компонентов:

- Баки горючего и окислителя;
- Баллоны выдачи газа наддува;
- Система трубопроводов;
- **Контрольно–измерительное оборудование.**

Емкость, предназначенная для подготовки и подачи топлива с определенными параметрами в топливные магистрали, называется топливным баком–дозатором. Конструкция топливных баков существенно зависит от рода применяемого топлива. Материал топливных баков должен быть коррозионностойким и не вступать в реакцию с применяемым топливом. Бак должен быть оборудован горловинами, штуцерами и фланцами для подстыковки

заправочных и расходных магистралей, подключения трубопроводов перелива, наддува и дренажа. Должен быть предусмотрен люк для осмотра и ремонта, а также места для установки датчиков давления, температуры и уровня топлива в баке. Наиболее распространенной формой баков является цилиндрическая, так как она позволяет получить довольно большой объем при сравнительно небольшом поперечном сечении. Находят применение сферические баки, которые имеют наименьшее отношение поверхности к объему, что особенно важно для баков с криогенными компонентами топлива. Баки для криогенных компонентов изолируются стекловатой или их конструкция имеет двойные стенки с вакуумной изоляцией.

Для данного стенда применим вертикальные криогенный и для хранения нефтепродуктов резервуары. Общий вид таких резервуаров представлен на рисунке 5.

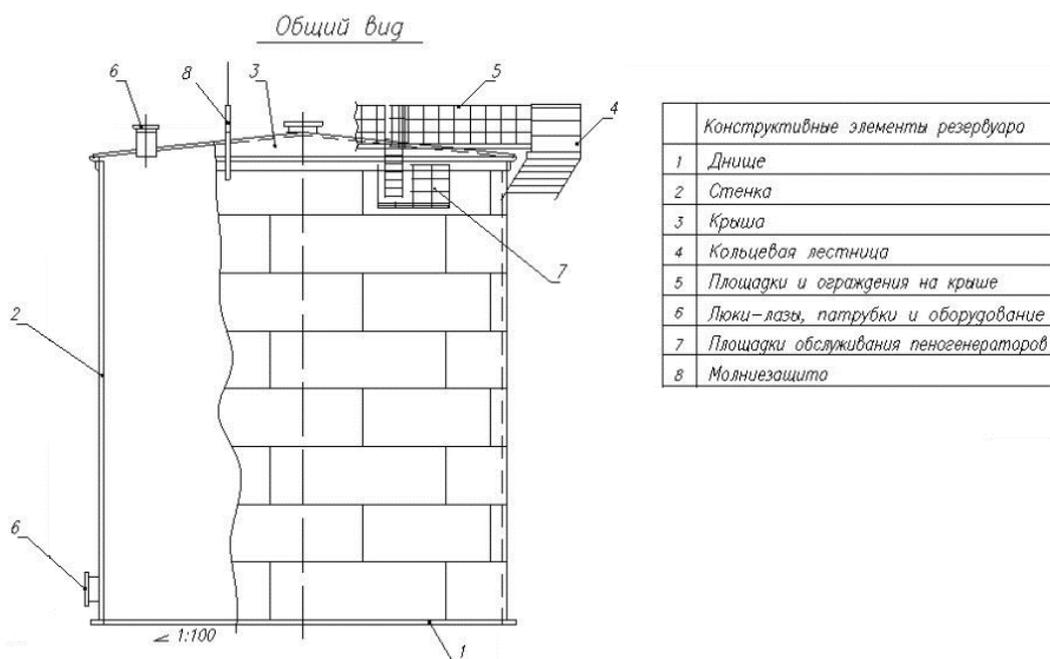


Рисунок 5 – Общий вид топливного резервуара

Объём топливных баков рассчитывается из условий размещения в них заданного весового количества окислителя и горючего, называемого весовой заправкой топливных баков. Объём заправляемых компонентов рассчитывается

из условий обеспечения заданного суммарного импульса тяги, компенсации непроизводительных потерь при хранении и работе двигательной установки, а также сохранения гарантийного остатка топлива после окончания работы двигателя.

Минимально–необходимый объём бака определяется по формуле:

$$V_{\text{М.бак.}i} = V_i + V_{n.z.i} + V_{m.n.i} + V_{z.подуш.i} + V_{арм.i} + V_{z.ост.i} , \quad (15)$$

где  $V_i$  – минимальный объём топлива, необходимый для проведения одного испытания;

$V_{n.z.i}$  – объём потерь при запуске двигателя;

$V_{m.n.i}$  – объём технологических потерь;

$V_{z.подуш.i}$  – объём газовой подушки, поддерживающий давление в баках;

$V_{арм.i}$  – объём технологической арматуры в баке;

$V_{z.ост.i}$  – объём гарантированного остатка топлива в баке.

Минимальный объём топлива  $V_i$ , необходимый для проведения одного испытания:

$$V_{ок} = \frac{m_{ок}}{\rho_{ок}}, \quad (16)$$

$$V_z = \frac{m_z}{\rho_z}, \quad (17)$$

где  $m_i$  – масса топлива;

$\rho_i$  – плотность топлива.

Масса КРТ:

$$m_{ок} = \dot{m}_{ок} \times t, \quad (18)$$

$$m_2 = \dot{m}_2 \times t, \quad (19)$$

где  $\dot{m}_i$  – секундно–массовый расход компонента;

$t$  – время испытания.

Массовый расход КРТ:

$$\dot{m}_{ок} = \frac{k_m}{k_m + 1} \dot{m}, \quad (20)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}}{k_m + 1}, \quad (21)$$

где  $k_m$  – соотношение компонентов топлива;

$\dot{m}$  – секундно–массовый расход топлива.

$$\dot{m} = \frac{P}{J_y}, \quad (22)$$

где  $P = 215 \text{ тс} = 2108,430 \times 10^3 \text{ Н}$  – тяга двигателя;

$J_y$  – удельный импульс тяги.

$$\dot{m}_2 = \frac{2108,430 \times 10^3}{3120} = 675,779 \text{ кг / с},$$

$$\dot{m}_{ок} = \frac{2,71}{2,71+1} \times 675,779 = 493,628 \text{ кг / с},$$

$$\dot{m}_2 = \frac{675,779}{2,71+1} = 182,151 \text{ кг / с},$$

$$m_{ок} = 493,628 \times 270 = 133279,602 \text{ кг},$$

$$m_2 = 182,151 \times 270 = 49180,665 \text{ кг},$$

$$V_{ок} = \frac{133279,602}{1141} = 116,809 \text{ м}^3,$$

$$V_2 = \frac{49180,665}{820} = 59,976 \text{ м}^3.$$

По полученным результатам можно судить о расходе топлива за время одного испытания ЖРД.

Следующим этапом необходимо произвести расчеты потерь топлива на определенных этапах заправки и запуска двигателя. Это необходимо для более точного расчета геометрических характеристик стендовых баков.

Потери при старте  $V_{n.z.i}$  связаны с процессом включения ракетного двигателя и созданием начального тягового импульса. Они могут включать в себя потери из-за несовершенства процесса зажигания, а также влияние физических факторов, таких как вихри и турбулентность при старте. Потери при старте также могут составлять значительную долю общего запаса топлива, их процент также может варьироваться в зависимости от конкретной ракеты и условий старта.

Общий процент потерь при старте будет зависеть от конкретного двигателя, его конструкции, технологических решений, а также режима работы. В некоторых случаях, этот процент может составлять порядка 3–5% от общего объёма топлива.

$$V_{n.z.i} = V_i \times 0,05, \tag{23}$$

$$V_{n.z.ок} = 116,809 \times 0,05 = 5,840 \text{ м}^3,$$

$$V_{n.z.гор} = 59,976 \times 0,05 = 2,999 \text{ м}^3.$$

Технологические потери  $V_{m.n.i}$  включают в себя различные виды утечек и испарений топлива до момента запуска ракеты. Эти потери могут происходить из-за несовершенств системы хранения и подачи топлива, а также из-за

физических и химических процессов. Процент технологических потерь может варьироваться, но обычно составляет 1–2% несколько процентов от общего запаса топлива.

$$V_{m.n.i} = V_i \times 0,02, \quad (24)$$

$$V_{m.n.ок} = 116,809 \times 0,02 = 2,336 \text{ м}^3,$$

$$V_{m.n.гор} = 59,976 \times 0,02 = 1,200 \text{ м}^3.$$

Объем газовой подушки  $V_{г.подуш.и}$  при хранении жидкого кислорода определяется в зависимости от ряда параметров, включая температуру, давление, и конструкцию бака. Газовая подушка необходима для компенсации изменений объема жидкости, вызванных изменениями температуры, и для поддержания заданного давления внутри бака.

Условия хранения криогенного жидкого кислорода:

— Температура хранения  $T_x = -184^\circ\text{C}$ . ЖКК должен храниться при температуре ниже температуры кипения, чтобы он оставался в жидком состоянии;

— Давление в баке  $P_p = 0,1 \dots 0,2 \text{ МПа}$ . ЖКК имеет высокое давление насыщенных паров. Для предотвращения испарения ЖКК необходимо поддерживать в хранилище избыточное давление.

Типичные потери ЖКК при хранении составляют 0,5–1% в сутки. Эти потери обусловлены испарением ЖКК и диффузией кислорода в окружающую среду. Для уменьшения потерь ЖКК необходимо тщательно герметизировать хранилище и поддерживать в нем избыточное давление.

Газовая подушка выполняет две основные функции: компенсирует изменения объема жидкого кислорода при изменениях температуры и поддерживает заданное давление внутри бака, что обеспечивает стабильность и надежность системы хранения жидкого кислорода.

Для жидкого кислорода примем объём газовой подушки равный 15% от общего объёма топлива, а для нафтила 5%.

$$V_{г.подуш.ок} = V_{ок} \times 0,15, \quad (25)$$

$$V_{г.подуш.гор} = V_{гор} \times 0,05, \quad (26)$$

$$V_{г.подуш.ок} = 116,809 \times 0,15 = 17,521 \text{ м}^3,$$

$$V_{г.подуш.ок} = 59,976 \times 0,05 = 8,996 \text{ м}^3.$$

Запорно–регулирующая арматура (ЗРА) – это устройства, предназначенные для управления потоками жидких и газообразных сред путем изменения площади проходного сечения.

К элементам ЗРА, которые находятся внутри бака, относятся следующие:

- Запорные устройства, такие как: заливной, сливной клапан и тарель;
- Измерительные устройства, такие как: датчики температуры, датчики уровня;
- Предохранительные устройства, такие как: предохранительные клапаны, разрывные мембраны.

Также, внутри бака, могут располагаться некоторые элементы системы термостатирования. Учтем дополнительные 1 % к объёму для арматуры внутри бака.

$$V_{арм.и} = V_i \times 0,01, \quad (27)$$

$$V_{арм.ок} = 116,809 \times 0,01 = 1,168 \text{ м}^3,$$

$$V_{арм.гор} = 59,976 \times 0,01 = 0,600 \text{ м}^3.$$

Гарантийный остаток топлива обуславливается невозможностью строгого поддержания заданной величины весового соотношения компонентов топлива

при испытании из-за изменения режима работы двигателей и ряда других факторов. К тому же, гарантийный остаток топлива покрывает количество незабора топлива из баков, обусловленный несовершенством конструкции баков.

Объём гарантированного остатка топлива рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{гр.i} = \frac{\dot{m}_i \times 1,5}{\rho_i}, \quad (28)$$

$$V_{гр.ок} = \frac{493,628 \times 1,5}{1141} = 0,649 \text{ м}^3,$$

$$V_{гр.гор} = \frac{182,151 \times 1,5}{820} = 0,333 \text{ м}^3.$$

Тогда, минимально–необходимый объём баков (1.1):

$$V_{м.бак.ок} = 116,809 + 5,840 + 2,336 + 17,521 + 1,168 + 0,649 = 144,325 \text{ м}^3,$$

$$V_{м.бак.гор} = 59,976 + 2,999 + 1,200 + 8,996 + 0,600 + 0,333 = 79,302 \text{ м}^3.$$

По полученным данным подобран – Резервуар криогенный вертикальный РВК-200 производства ООО "Криосервис". Вместимость – 200 м<sup>3</sup>, температура хранения  $T_x = -184 \text{ }^\circ\text{C}$ , потери кислорода от испарения – 1,0 кг/ч.

Общий вид резервуара представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – РВК–200

Резервуар изготовлен из углеродистой стали и имеет двойные стенки с вакуумно-перлитовой изоляцией. Диаметр резервуара составляет 4,6 м, а высота – 12,5 м. Конструкция резервуара обеспечивает безопасную эксплуатацию и минимальные потери при испарении.

Для хранения и выдачи РГ–1 подобран резервуар вертикальный стальной РВС–100, который представляет собой стальную конструкцию в виде цилиндра с днищем и стационарной крышей. Диаметр резервуара составляет 4,2 м, а высота – 7,4 м. Температура хранения РГ–1 20 °С .

Общий вид РВС–100 представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – РВС–100

### 2.3.2 Расчет магистралей подачи топлива

Из стационарного резервуара объёмом 200 м<sup>3</sup>, рабочим давлением 0,2 МПа, при температуре хранения кислорода –184 °С необходимо создать секундно-массовый расход окислителя 493,628 кг/с и давление в камере предварительного смешивания двигателя 3 МПа (РД–191).

Из стационарного резервуара объёмом 100 м<sup>3</sup>, рабочим давлением 0,2 МПа, при температуре хранения РГ–1 15 °С необходимо создать секундно–массовый расход горючего 182,151 кг/с и давление в камере предварительного смешивания двигателя 3 МПа.

Резервуары установлены выше объекта испытания (ОИ), в отдельном помещении с жаропрочными стенами. Длина трубопровода 11 метров. Расчетная схема представлена на рисунке 8.

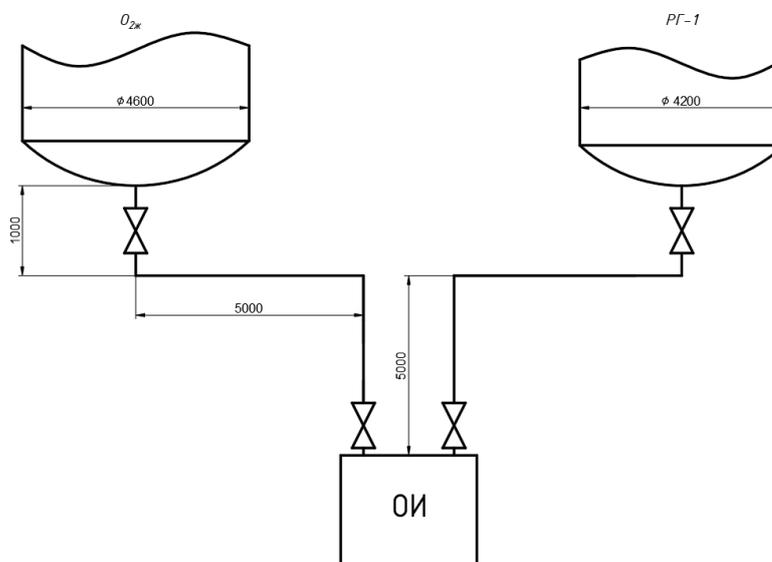


Рисунок 8 – Расчетная схема магистрали окислителя

Определение диаметра магистрального трубопровода окислителя:

$$d_i = \sqrt{\frac{4m_i}{\pi\rho\vartheta}}, \quad (29)$$

где скорость движения жидкости  $\vartheta = 5 - 7 \text{ м/с}$ . Примем  $\vartheta = 6 \text{ м/с}$ .

$$d_{ок} = \sqrt{\frac{4 \times 493,628}{3,14 \times 1141 \times 6}} \approx 0,303 \text{ м},$$

$$d_{зоп} = \sqrt{\frac{4 \times 182,151}{3,14 \times 820 \times 6}} \approx 0,217 \text{ м}.$$

Из технических соображений, по ГОСТ 10705–80 примем следующие параметры трубы для магистрали окислителя:

— Материал трубопровода – нержавеющая конструкционная сталь 12Х18Н10Т;

— Внешний диаметр трубопровода – 320 мм;

— Толщина трубопровода – 7 мм.

Для горючего, по ГОСТ 8734–75 примем следующие параметры трубы:

— Материал трубопровода – конструкционная низколегированная сталь 09Г2С;

— Внешний диаметр трубопровода – 229 мм;

— Толщина трубопровода – 5 мм.

Определение потерь давления в топливных магистралях:

$$\Delta p_{\text{маг}} = \Delta p_c + \Delta p_{\text{мс}} + \Delta p_{\text{тр}}, \quad (30)$$

где  $\Delta p_c$  – потери давления на создание скорости;

$\Delta p_{\text{мс}}$  – потери давления на местных сопротивлениях;

$\Delta p_{\text{тр}}$  – потери давления на трение.

Потери давления на создание скорости:

$$\Delta p_c = \frac{\rho g^2}{2}, \quad (31)$$

$$\Delta p_{\text{с.ок}} = \frac{1141 \times 6^2}{2} = 20538 \text{ Па},$$

$$\Delta p_{\text{с.гор}} = \frac{820 \times 6^2}{2} = 14760 \text{ Па}.$$

Потери давления на местных сопротивлениях:

$$\Delta p_{\text{мс}} = \sum \varepsilon_i \times \frac{\rho \times V^2}{2}. \quad (32)$$

Определение суммарные потери на местных сопротивлениях:

$$\Delta p_{mc} = (\varepsilon_{zy} + \varepsilon_{ABT} + 4 \times \varepsilon_{ПОВ} + 2 \times \varepsilon + 3 \times \varepsilon_{\kappa}) \times \frac{\rho \times V^2}{2}. \quad (33)$$

Для кольцевого заборного устройства:  $\varepsilon_{zy} = 1,5$ .

Коэффициент потерь давления объемных датчиков:  $\varepsilon_{ABT} = 0,8$ .

Коэффициент потерь давления на повороте потока:  $\varepsilon_{пов} = 1$ .

Коэффициент потерь давления на разветвлении потока:  $\varepsilon = 1,05$ .

Коэффициент потерь давления на клапанах:  $\varepsilon_{\kappa} = 0,5$ .

$$\Delta p_{mc.ок} = (1,5 + 0,8 + 4 + 2 \times 1,05 + 3 \times 0,5) \times \frac{1141 \times 6^2}{2} = 203326,200 \text{ Па},$$

$$\Delta p_{mc.гор} = (1,5 + 0,8 + 4 + 2 \times 1,05 + 3 \times 0,5) \times \frac{820 \times 6^2}{2} = 146124 \text{ Па}.$$

Определение потерь давления на трение в трубопроводах:

$$\Delta p_{mp} = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{\rho \times V^2}{2}, \quad (34)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;

$l$  – длина трубы, м;

$d$  – диаметр трубы, м.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения  $\lambda$  рассчитывается:

$$\lambda = 0,1 \times \left( 1,46 \times \frac{\Delta}{d_2} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}, \quad (35)$$

где  $\Delta$  – средняя шероховатость поверхности трубопровода,  $\Delta = 5 \cdot 10^{-5}$  м;

$Re$  – число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho \times l \times d}{\mu}, \quad (36)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды.

Для жидкого кислорода  $\mu = 0,097$  кг / (м × с), при температуре  $-184$  °С.

Динамическая вязкость РГ–1  $\mu = 0,022$  кг / (м × с), при температуре  $15$  °С.

$$Re_{ок} = \frac{1141 \times 6 \times 0,320}{0,097} = 22584,742,$$

$$Re_{гор} = \frac{820 \times 6 \times 0,229}{0,022} = 51212,727.$$

$Re > 2300$  указывает на турбулентный режим.

$$\lambda_{ок} = 0,1 \times \left( 1,46 \times \frac{5 \times 10^{-5}}{0,32} + \frac{100}{22584,742} \right)^{0,25} = 0,026,$$

$$\lambda_{гор} = 0,1 \times \left( 1,46 \times \frac{5 \times 10^{-5}}{0,229} + \frac{100}{51212,727} \right)^{0,25} = 0,022.$$

Тогда потери давления на трение в трубопроводе, будут равны:

$$\Delta p_{тр.ок} = 0,026 \times \frac{11}{0,32} \times \frac{1141 \times 6^2}{2} = 18441,728 \text{ Па},$$

$$\Delta p_{тр.гор} = 0,022 \times \frac{11}{0,229} \times \frac{820 \times 6^2}{2} = 15597,904 \text{ Па}.$$

Определяем общие потери давления в топливных магистралях:

$$\Delta p_{маг.ок} = 20538 + 203326,200 + 18441,728 = 242305,928 \text{ Па} = 0,243 \text{ МПа},$$

$$\Delta p_{маг.гор} = 14760 + 146124 + 15597,904 = 176481,904 \text{ Па} = 0,177 \text{ МПа}.$$

## 2.4 Расчет на прочность элементов конструкции

Прочность представляет собой способность материала выдерживать разрушение под воздействием внутренних напряжений, вызванных воздействием внешних сил. Это свойство подразделяется на несколько типов: статическую, выдерживающую постоянные нагрузки, динамическую, а также усталостную, проявляющуюся при циклических переменных нагрузках.

В инженерных конструкциях выделяют общую прочность, которая характеризует способность всей конструкции выдерживать нагрузки без

разрушения, и местную прочность, относящуюся к способности отдельных узлов, деталей и соединений выдерживать воздействие нагрузок.

На данном испытательном стенде стапель должен обеспечивать изменение угла атаки тестируемых объектов. С учетом этого условия соединение объекта испытания с питающими магистралями реализуется с использованием гибких металлорукавов. Для компенсации гидравлических ударов в системе, вызванных изменением угла подачи топлива на входе в смесительные головки объекта испытания, металлорукав должен функционировать в качестве силового компенсатора. Общий вид компенсатора представлен на рисунке 9.

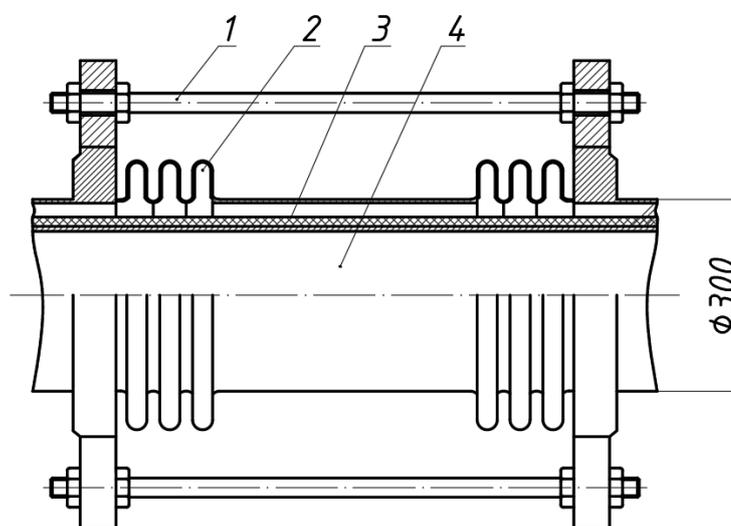


Рисунок 9 – Компенсатор:

1 – направляющие; 2 – сильфон; 3 – металлорукав; 4 – трубопровод

Сильфон представляет собой упругую оболочку, выполненную из металлических, неметаллических и композиционных материалов, которая обладает однослойной или многослойной гофрированной структурой. Эта оболочка сохраняет прочность и герметичность при повторяющихся циклических деформациях, таких как сжатие, растяжение, изгиб и их комбинации, под воздействием внутреннего или внешнего давления, температуры и механических напряжений.

Применение сильфонов осуществляется с целью компенсации температурных и технологических деформаций в трубопроводах. Эти оболочки

представляют собой вращающиеся структуры, состоящие из торообразных участков положительной и отрицательной кривизны, соединенных плоскими круговыми пластинами.

#### 2.4.1 Расчет на прочность компенсатора трубопровода горячего

Расчёт сводится к определению жесткости сильфона при осевом и угловом перемещениях и расчёту на прочность.

Материал компенсатора – Д20 (Алюминиевый деформируемый сплав), с характеристиками, представленными в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристики сплава Д20

Параметр	Значение
Предел прочности $[\delta_g]$ , Па	$150 \times 10^6$
Предел текучести $[\delta_m]$ , Па	$160 \times 10^6$
Модуль упругости $E$ , Па	$0,71 \times 10^{11}$

Примем коэффициент безопасности  $f_g = 2,0$ .

Шаг гофра  $t$  определяется из следующего соотношения:

$$t_g = 0,075 \times d_{mp}, \quad (37)$$

где  $d_{mp}$  – диаметр трубопровода.

$$t_g = 0,075 \times 229 = 17,175 \text{ мм.}$$

Высота гофра определяется по следующей формуле:

$$h_g = 1,3 \times \left( \frac{d_{mp}}{2} \right) - \frac{d_{mp}}{2}, \quad (38)$$

$$h_g = 1,3 \times \left( \frac{229}{2} \right) - \frac{229}{2} = 34,35 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр сильфона определяется из следующего соотношения:

$$d_{н.с} = 1,3 \times d_{мп}, \quad (39)$$

$$d_{н.с} = 1,3 \times 229 = 297,7 \text{ мм.}$$

Ширина впадин гофра:

$$a_g = t_g - 0,022 \times d_{н.с}, \quad (40)$$

$$a_g = 17,175 - 0,022 \times 297,7 = 10,626 \text{ мм.}$$

Число гофров принимаем равным  $n = 10$ .

Толщина стенки сильфона:

$$\delta_g = \frac{P_{зг} \times f_{зг} \times \frac{d_{мп}}{2}}{\sigma_g}, \quad (41)$$

где  $P_{зг} = 3 \text{ [МПа]}$  – давление в трубопроводе;

$$\delta_g = \frac{3 \times 10^6 \times 2,0 \times \frac{229 \times 10^{-3}}{2}}{150 \times 10^6} = 0,0046 \text{ м.}$$

Толщину стенки сильфона, из технологических соображений, принимаем равной:

$$\delta = 0,5 \times 10^{-3} \text{ м.}$$

Коэффициент твердости сильфона трубопровода РГ–1 определяется по следующей формуле:

$$\lambda_g = \left[ \frac{2 \times \pi \times E \times \delta^3}{3 \times (1 - 0,2^2) \times \frac{d_{мп} \times n}{2}} \right] \times \left[ \left( \frac{d_{н.с} \times 10^{-3}}{d_{мп}} \right) \right]^2 - \frac{4 \times \left( \frac{d_{н.с}}{d_{мп}} \right) \times \ln \left( \frac{d_{н.с}}{d_{мп}} \right)^2}{\left( \frac{d_{н.с}}{d_{мп}} \right)^2 - 1}, \quad (42)$$

$$\lambda_{\delta} = \left[ \frac{2 \times 3,14 \times 0,71 \times 10^{11} \times (0,5 \times 10^{-3})^3}{3 \times (1 - 0,2^2) \times \frac{229 \times 10^{-3} \times 10}{2}} \right] \times \left[ \left( \frac{297,7 \times 10^{-3}}{229 \times 10^{-3}} \right) \right]^2 -$$

$$\frac{4 \times \left( \frac{297,7 \times 10^{-3}}{229 \times 10^{-3}} \right) \times \ln \left( \frac{297,7 \times 10^{-3}}{229 \times 10^{-3}} \right)^2}{\left( \frac{297,7 \times 10^{-3}}{229 \times 10^{-3}} \right)^2 - 1} = 28,045 \text{ НВ.}$$

Давление разрушения сильфона определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{разрв}} = \frac{\sigma_{\delta} \times t_{\delta}^{\delta}}{\frac{d_{\text{н.с}}}{2}}, \quad (43)$$

$$P_{\text{разрв}} = \frac{150 \times 10^6 \times (17,175 \times 10^{-3})^{0,5 \times 10^{-3}}}{\frac{297,7 \times 10^{-3}}{2}} = 1005 \times 10^6 \text{ Па} = 1005 \text{ МПа.}$$

$P_{\text{разрв}} > [\delta_{\delta}]$  – условие выполняется.

#### 2.4.2 Расчет на прочность компенсатора трубопровода окислителя

Характеристики сплава АМгб:

Предел прочности:

$$\sigma_{\delta} = 340 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Предел текучести:

$$\sigma_m = 385 \times 10^6 \text{ Па.}$$

Модуль упругости:

$$E = 0,71 \times 10^{11} \text{ Па.}$$

Коэффициент безопасности принимаем:

$$f_{\text{ок}} = 2,0.$$

Тогда, по формулам (37) – (43) получим:

$$t_{\delta} = 0,075 \times 320 = 24 \text{ мм,}$$

$$h_g = 1,3 \times \left( \frac{320}{2} \right) - \frac{320}{2} = 48 \text{ мм},$$

$$d_{н.с} = 1,3 \times 320 = 416 \text{ мм},$$

$$a_g = 24 - 0,022 \times 416 = 14,848 \text{ мм},$$

$$\delta_g = \frac{3 \times 10^6 \times 2,0 \times \frac{320 \times 10^{-3}}{2}}{340 \times 10^6} = 0,0028 \text{ м} = 0,003 \text{ м},$$

$$\lambda_g = \left[ \frac{2 \times 3,14 \times 0,71 \times 10^{11} \times (0,3 \times 10^{-3})^3}{3 \times (1 - 0,2^2) \times \frac{320 \times 10^{-3} \times 10}{2}} \right] \times \left[ \left( \frac{416 \times 10^{-3}}{320 \times 10^{-3}} \right) \right]^2 -$$

$$\frac{4 \times \left( \frac{416 \times 10^{-3}}{320 \times 10^{-3}} \right) \times \ln \left( \frac{416 \times 10^{-3}}{320 \times 10^{-3}} \right)^2}{\left( \frac{416 \times 10^{-3}}{320 \times 10^{-3}} \right)^2 - 1} = 37,200 \text{ НВ}.$$

$$p_{разр} = \frac{340 \times 10^6 \times (24 \times 10^{-3})^{0,3 \times 10^{-3}}}{\frac{416 \times 10^{-3}}{2}} = 1633 \times 10^6 \text{ Па} = 1633 \text{ МПа}.$$

$p_{разр} > [\delta_g]$  – условие выполняется.

#### 2.4.3 Расчет на прочность всасывающего трубопровода

Толщина стенки трубопровода определяется по формуле:

$$s \geq s_p + c, \tag{44}$$

$$s_p = \frac{pD}{2\sigma_\phi - p}, \tag{45}$$

где  $p$  – избыточное внутреннее давление;

$\phi$  – коэффициент прочности продольного шва (для бесшовных элементов сосудов и аппаратов  $\phi = 1$ );

$c$  – прибавка к расчетным толщинам,  $c = 0,0003 \text{ м}$ .

Избыточное внутреннее давление  $p = 0,8 \times 10^6$  МПа.

Внутренний диаметр трубопровода:  $D=0,3$  м.

Для конструкционного материала 12Х18Н10Т:

– предел прочности:  $\sigma_B=520$  МПа,

– предел текучести:  $\sigma_T=205$  МПа.

Для данного вида материала допустимое напряжение принимается равным наименьшему из двух значений:

$$\sigma_\delta = \frac{\sigma_B}{3}, \quad (46)$$

$$\sigma_\delta = \frac{\sigma_T}{1,5}. \quad (47)$$

$$\sigma_\delta = \frac{520}{3} = 173,3 \text{ МПа},$$

$$\sigma_\delta = \frac{205}{1,5} = 136,7 \text{ МПа}.$$

Таким образом, допустимое напряжение равно:  $\sigma_\delta = 136,7$  МПа .

Расчетная толщина стенки:

$$s_p = \frac{0,8 \times 10^6 \times 0,3}{2 \times 136,7 \times 10^6 \times 1 - 0,8 \times 10^6} = 0,0007 \text{ м},$$

$$s = 0,0007 + 0,0003 = 0,001 \text{ м}.$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_n = \frac{2[\sigma]\phi_p(s-c)}{D+(s-c)}, \quad (48)$$

$$[p]_n = \frac{2 \times 136,7 \times 10^6 \times 1 \times 0,001}{0,3 + 0,001} = 1,36 \times 10^6 \text{ Па.}$$

#### 2.4.4 Расчет на прочность напорного трубопровода

Расчет ведется по формулам (45) – (48):

$\phi$  – коэффициент прочности продольного шва (для бесшовных элементов сосудов и аппаратов  $\phi = 1$ ;

$c$  – прибавка к расчетным толщинам,  $c = 0,0003$  м.

Избыточное внутреннее давление  $p = 46 \times 10^6$  МПа.

Внутренний диаметр трубопровода:  $D = 0,3$  м.

Для конструкционного материала 12Х18Н10Т:

– предел прочности:  $\sigma_B = 520$  МПа,

– предел текучести:  $\sigma_T = 205$  МПа.

$$\sigma_\delta = \frac{520}{3} = 173,3 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_\delta = \frac{205}{1,5} = 136,7 \text{ МПа.}$$

Таким образом, допустимое напряжение равно:  $\sigma_\delta = 136,7$  МПа.

Расчетная толщина стенки:

$$s_p = \frac{46 \times 10^6 \times 0,3}{2 \times 136,7 \times 10^6 \times 1 - 46 \times 10^6} = 0,0142 \text{ м,}$$

$$s = 0,0142 + 0,0003 = 0,0145 \text{ м,}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_n = \frac{2 \times 136,7 \times 10^6 \times 1 \times 0,0145}{0,3 + 0,0145} = 34,622 \times 10^6 \text{ Па.}$$

### 3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА

Стенд для огневых испытаний представляет собой техническое устройство для установки испытуемого двигателя в заданное положение, создание воздействий и осуществления управления процессом испытаний и объектом испытаний.

Структурно, стенд состоит из следующих систем:

- Монтажно-испытательный корпус (МИК);
- Огневой бокс;
- Стапель стенда;
- Топливная система;
- Система газоснабжения;
- Система водоснабжения;
- Газоотражательный канал;
- Командный пункт (система управления).

Общий вид спроектированного стенда представлен на рисунке 10.

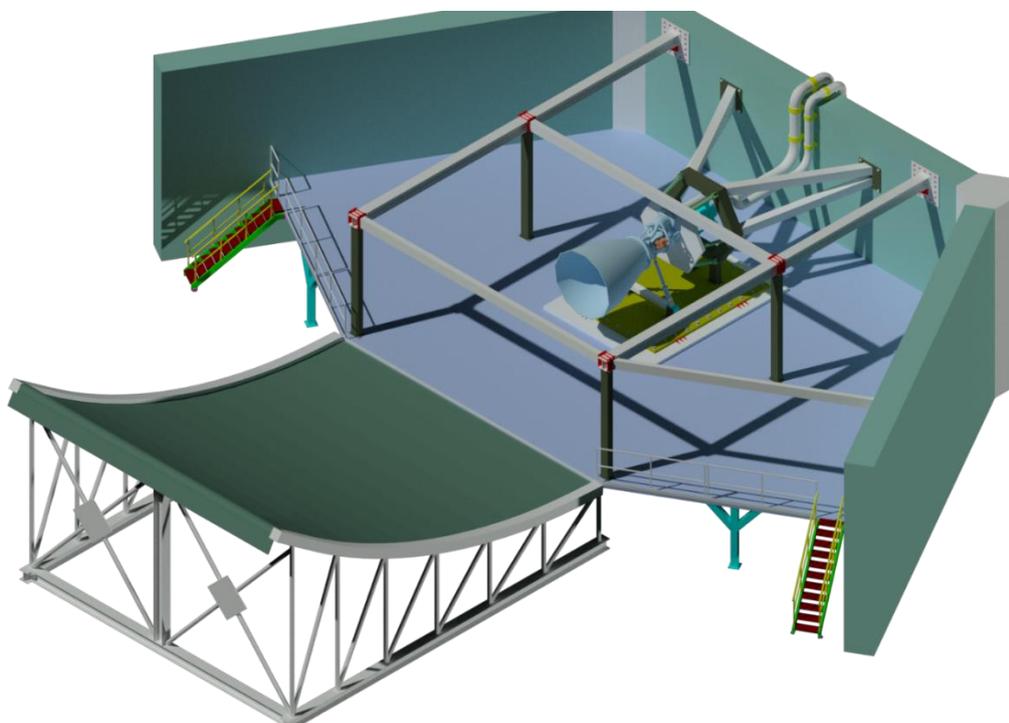


Рисунок 10 – Общий вид огневого стенда

### 3.1 Монтажно-испытательный корпус

МИК – сооружение, которое оснащено необходимыми специальными грузозахватными приспособлениями для манипуляций объектом испытания с целью монтажа или демонтажа на стапель станда. Сооружение предполагается возводить над естественным склоном, что позволит упростить реализацию газоотводящего канала. В свою очередь, такое решение повышает требования к прочности и устойчивости конструкции. Основание сооружения – жаропрочный бетонный фундамент, стены – металло–каркас, обшитый оцинкованным профнастилом.

План–схема станда представлена на рисунке 11.

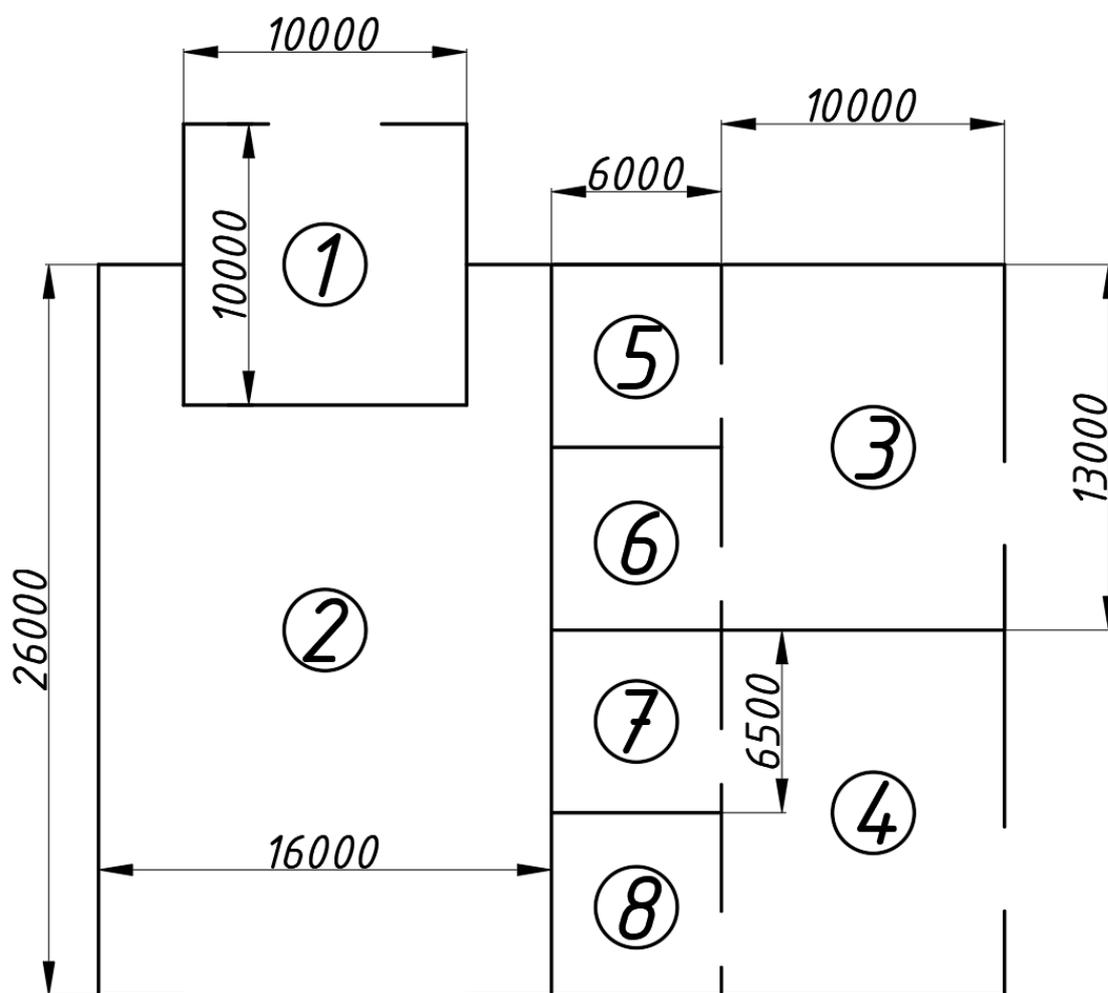


Рисунок 11 – План–схема станда

1 – Огневой бокс; 2 – монтажный комплекс; 3 – хранилище горючего;  
4 – хранилище окислителя; 5, 7 – аппаратная; 6, 8 – ресиверная

Общий вид сооружения представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Монтажно-испытательный корпус

### 3.2 Огневой бокс и стапель станда

Огневой бокс — это закрытое помещение, предназначенное для проведения огневых испытаний. Огневой бокс обеспечивает защиту персонала от воздействия высоких температур и токсичных продуктов сгорания.

Огневой бокс состоит из следующих основных элементов:

- Герметичная оболочка, выполненная из огнестойкого материала;
- Система подачи и удаления газов, обеспечивающая отвод продуктов сгорания из бокса;
- Система пожаротушения, обеспечивающая тушение пожара в случае возникновения;
- Система контроля и регистрации параметров испытаний, обеспечивающая сбор и хранение данных о ходе испытаний.

Потолок огневого бокса имеет технологическое отверстие, предназначенное для обеспечения свободного доступа мостового крана к стапелю станда.

Стапель стенда – металло–рамная конструкция, предназначенная для монтажа ОИ при проведении испытаний. Стапель состоит из следующих элементов:

— Опорная рама – металлическая конструкция, предназначена для обеспечения устойчивости стапеля;

— Опорная плита – технологическая позиция монтажа ОИ, реализованная как естественный противовес от тяги двигателя.

### **3.3 Топливная система стенда**

Топливная система стенда – совокупность специального оборудования, емкостей, трубопроводов, запорной, дренажной и прочей арматуры, собранных по определенной схеме и предназначенных для хранения, подготовки и подачи топлива с заданными параметрами к испытываемому изделию.

Топливная система включает в себя топливные баки с системами: заправки и слива, наддува и дренажа, термостатирования.

В качестве криогенных баков стенда применяются: два бака РВК–200, для горючего – два РВС–100.

Материал топливных баков изготовлен из коррозионностойкой стали и не вступает в реакцию с применяемым топливом. Баки оборудованы горловинами, штуцерами и фланцами для подстыковки заправочных и расходных магистралей, подсоединения трубопроводов перелива, наддува и дренажа. Предусмотрен люк для осмотра и ремонта, а также места для установки датчиков давления, температуры и уровня топлива в баке. Расходные баки являются цилиндрическими, так как они позволяют получить довольно большой объем при сравнительно небольшом поперечном сечении.

Трубопроводы служат для транспортировки рабочих сред (жидкостей и газов) от источников давления (баков, насосов) к потребителям. Они подвергаются воздействию статических и динамических нагрузок. К статическим нагрузкам относятся масса трубы, масса транспортируемой среды и внутреннее давление. Динамические нагрузки возникают от пульсаций давления и вибраций трубопровода и опор крепления.

Для стендовой топливной магистрали используются цельнотянутые бесшовные трубы. Для криогенных жидкостей трубопроводы теплоизолированы. Отдельные участки трубопроводов объединяются в пневмогидравлическую систему с помощью разъемных фланцевых соединений.

Криогенные топливные трубопроводы выполнены по схеме «труба в трубе». Внутренние трубопроводы изготовлены из гладких цельнотянутых труб из нержавеющей стали 12Х18Н10, которая имеет относительно низкий коэффициент линейного расширения. Наружный кожух изготовлен из нержавеющей стали. Пространство между внутренней и внешней трубами (кожухом) заполнено вакуумом и теплоизолировано. Внутренняя труба закреплена относительно наружной с помощью дисковых опор.

### **3.4 Система газоснабжения**

Система газоснабжения – это совокупность стендового оборудования, предназначенного для создания и поддержания в процессе испытания необходимого избыточного давления в топливных баках. Она состоит из газовых баллонов высокого давления, запорных и регулирующих пневмоагрегатов и трубопроводов.

Система наддува баков насосной топливоподдачи обеспечивает:

- пусковые давления и заданный расход топлива при запуске двигателя;
- создает необходимое давление на входе в насос и поддерживает его в течение всего времени испытания;
- возможность регулирования давления по заданной программе;
- возможность быстрого автоматического сброса давления из баков в случае аварийного выключения двигателя.

В баках окислителя применяется гибридная система наддува. Помимо подачи газообразного гелия, в качестве наддува, используются собственные пары жидкого кислорода. Для обеспечения достаточного количества испарения, жидкий кислород подается в испаритель.

В стендовых баках окислителя, для поддержания стабильного давления в процессе выдачи компонента, применяется гибридная система наддува,

сочетающая подачу газообразного гелия и использование собственных паров кислорода. Гелий, хранящийся в баллонных рампах под давлением, подается через редуктор, обеспечивая быстрый и управляемый наддув бака. С целью уменьшения расхода гелия и понижения нагрузки (по давлению) на технологическую обвязку бака, часть давления наддува поддерживается за счет испарения жидкого кислорода. С этой целью  $O_{2ж}$  отбирается из бака, поступает в испаритель, где нагревается от тепла электрического нагревателя, превращается в газ и возвращается в бак.

### **3.5 Система водоснабжения**

В стендовой системе охлаждения газоотражательных устройств и пожаротушения используется открытая система подачи воды. Для уменьшения времени поступления воды в процессе испытаний, особенно при испытаниях двигателей больших тяг, в системе выполняются линии закольцовки.

Работа системы осуществляется следующим образом. После заполнения полостей насосов водой включаются электроприводы, и насосы начинают работать по линии циркуляции через открытые задвижки. Вода сливается во входной коллектор питания насосов. Затем по команде пульта управления насосы переключаются на питание потребителя. Для этого открываются и закрываются соответствующие задвижки. В результате вода подается на охлаждение выхлопного диффузора, газоотводящего устройства, а также в коллектор охлаждения струи двигателя и коллектор водяного пожаротушения.

### **3.6 Газоотражательный канал**

Газоотражатель – это конструкция, предназначенная для отражения и рассеивания горячих газов, выходящих из ЖРД, в момент запуска. Это необходимо для защиты стартового стола и окружающей его инфраструктуры от термического воздействия. Канал представляет собой склон из бетона, под углом  $32^\circ$  к горизонту, обшитый металлическими листами из сплава 25Х5М. Канал высотой 11 метров, это необходимо для обеспечения достаточного уменьшения УВД и сохранности конструкции.

#### 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ

Технологический процесс — это упорядоченная последовательность взаимосвязанных действий, выполняющихся с момента возникновения исходных данных до получения требуемого результата.

Практически любой технологический процесс можно рассматривать как часть более сложного процесса и совокупность менее сложных (в пределе — элементарных) технологических процессов. Элементарным технологическим процессом или технологической операцией называется наименьшая часть технологического процесса, обладающая всеми его свойствами. То есть это такой ТП, дальнейшая декомпозиция которого приводит к потере признаков, характерных для метода, положенного в основу данной технологии. Как правило, каждая технологическая операция выполняется на одном рабочем месте не более, чем одним сотрудником.

Технологические процессы состоят из "технологических (рабочих) операций", которые, в свою очередь, складываются из "технологических переходов".

Технологическим переходом называют законченную часть технологической операции, выполняемую с одними и теми же средствами технологического оснащения.

Вспомогательным переходом называют законченную часть технологической операции, состоящей из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода.

Для осуществления техпроцесса необходимо применение совокупности орудий производства — технологического оборудования, называемых "средствами технологического оснащения".

Компоненты технологического процесса представлены на рисунке 13.

*Компоненты технологического процесса*

*Алгоритм действий (операций) – точное предписание относительно последовательности операций, которые осуществляют преобразование объекта и перевод его в искомое состояние*

*Операции как простейшие действия, направленные на достижение конкретной цели. Совокупность операций, объединенных общей целью составляет процедуру технологического процесса*

*Инструментарий как арсенал средств, обеспечивающих достижение цели воздействия на личность, социальную группу, ту или иную общность*

Рисунок 13 – Компоненты технологического процесса

Технологический процесс можно описать в графической структурированной форме. Принципиальная схема технологического процесса представлена на рисунке 14.

*Принципиальная схема технологического процесса*

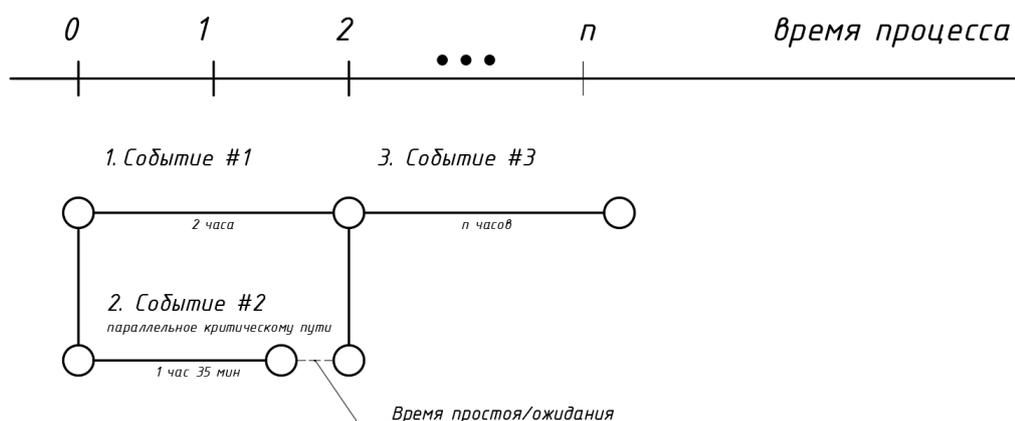


Рисунок 14 – Принципиальная схема технологического процесса

Исходными данными к технологическому процессу проведения испытания являются:

- Система хранения КРТ проверена, заправлена и к работе готова;
- Система СГ проверена, заправлена и к работе готова;

- Система водоподачи проверена, заправлена и к работе готова;
- Система телеметрии к работе готова.

#### Подготовительные операции:

- Транспортировка ОИ;
- Распаковка ОИ;
- Кантование ОИ;
- Установка ОИ на стапеле стенда;
- Подстыковка топливных магистралей к ОИ;
- Подстыковка дренажных трубопроводов;
- Опрессовка систем и магистралей;
- Захолаживание магистрали окислителя между баками хранения и стендовым баком-дозатором;
- Заправка «малым расходом» стендовых баков-дозаторов КРТ;
- Заправка «большим расходом» стендовых баков-дозаторов КРТ;
- Заправка «малым расходом» до заданного уровня;
- Готовность стенда к испытаниям.

#### Основные операции:

- Захолаживание магистралей до ОИ;
- Запуск системы водоподачи;
- Запуск и выход на режим ОИ;
- Проведение испытания согласно циклограмме;
- Запись телеметрической информации;
- Останов;
- Продувка магистралей.

#### Заключительные операции:

- Визуальный осмотр стенда;
- Приведение систем стенда в исходное состояние;
- Проведение ремонтно-восстановительных работ стартового стола;
- Составление акта испытания.

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДА

### 5.1 Введение

В рамках работы разработан универсальный вертикальный стенд для проведения огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с тягой до 200 тонн–сил. Данный раздел посвящен анализу условий труда и обеспечению безопасности на рабочем месте оператора бункера управления (командного пункта), который осуществляет контроль и управление процессом испытаний. Основной задачей является оценка опасных и вредных производственных факторов (ОиВФ), классификация условий труда в соответствии с Приказом Минтруда России от 21.11.2023 №817н и разработка рекомендаций по обеспечению безопасности и минимизации экологических рисков.

Целью раздела является анализ условий труда на рабочем месте оператора бункера управления, классификация ОиВФ, определение мер по обеспечению безопасности, предотвращению аварийных ситуаций и минимизации экологического ущерба от проливов КРТ. Раздел также включает оценку шумовых нагрузок, электро– и пожароопасности помещения.

Характеристика рабочего места и производственного процесса. Рабочее место оператора расположено в бункере управления, представляющем собой изолированное помещение с усиленными стенами из жаропрочного бетона и металлокаркаса, обшитого оцинкованным профнастилом (раздел 3.1). Помещение оснащено системой вентиляции (приточной и вытяжной), окнами для визуального наблюдения за стендом и системой управления, включающей пульт с мониторами, клавиатурой и органами управления. Основной производственный процесс включает мониторинг телеметрических данных, управление подачей компонентов ракетного топлива (КРТ) — жидкого кислорода и нафтила (РГ–1), а также контроль работы систем стенда (газоснабжения, водяного охлаждения, пожаротушения). Оператор взаимодействует с пультом управления в положении сидя, совершая

стереотипные движения для ввода команд и наблюдения за параметрами испытания.

Характеристика помещения: в помещении расположено одно рабочее место оператора, одновременно работает один человек, размеры бункера управления: 10 м (длина) × 6 м (ширина) × 3 м (высота), Помещение имеет два окна (1 × 1 м) из огнестойкого стекла, обеспечивающих визуальный контроль за огневым боксом. Вентиляция поддерживает воздухообмен в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88. Освещение осуществляется светодиодными светильниками.

Характеристика оборудования: основное средство труда — пульт управления, включающий монитор (диагональ 24 дюйма), клавиатуру, мышь и панель с кнопками для управления стендом. Стенд оснащен системами топливоподачи (баки РВК–200 и РВС–100), газоснабжения (баллоны с гелием и азотом под давлением до 20 МПа) и водяного охлаждения (насосы высокого давления). Высокое давление в топливных магистралях (до 3 МПа) и криогенные температуры жидкого кислорода (–184 °С) создают потенциальные риски взрыва, пожара и криогенных ожогов при нарушении техники эксплуатации. Шум от ЖРД (РД–191) и газовой струи, воздействующей на газоотражательный канал, может проникать в бункер через конструктивные элементы.

## **5.2 Анализ условий труда**

Анализ условий труда проводится в соответствии с Приказом Минтруда России от 21.11.2023 №817н по трем группам факторов: санитарно-гигиенические, эргономические и психофизиологические. На рабочем месте оператора бункера управления выявлены следующие факторы: микроклимат, шум, освещенность, химические вещества, тяжесть и напряженность трудового процесса.

### **5.2.1 Микроклимат**

Микроклимат — это совокупность параметров воздушной среды (температура, влажность, скорость движения воздуха), влияющих на тепловой комфорт и работоспособность человека. Учет микроклимата необходим для

предотвращения перегрева, переохлаждения и снижения концентрации внимания оператора.

Согласно ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», для категории работ Ia (легкие физические работы, энергозатраты до 139 Вт, выполняемые сидя) оптимальные показатели микроклимата приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Оптимальные показатели микроклимата (СанПиН 1.2.3685–21)

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22–24	40–60	0,1–0,2
Теплый	23–25	40–60	0,1–0,3

Фактические значения:

— Температура воздуха в бункере поддерживается системой вентиляции на уровне 23 °С (холодный период) и 24 °С (теплый период);

— Относительная влажность составляет 50%, для контроля используется гигрометр;

— Скорость движения воздуха — 0,15 м/с (данные системы вентиляции).

Таблица 10 – Соответствие оптимальных и фактических показателей микроклимата

Показатель	Период года	Норма (ГОСТ 12.1.005–88)	Фактическое значение
Температура воздуха, °С	Холодный	22–24	23
	Теплый	23–25	24
Относительная влажность, %	Холодный	40–60	50
	Теплый	40–60	50
Скорость движения воздуха, м/с	Холодный	0,1–0,2	0,15
	Теплый	0,1–0,3	0,15

Таблица 10 показывает, что фактические параметры микроклимата в бункере управления соответствуют нормам ГОСТ 12.1.005–88 для категории работ Ia в оба периода года.

Вывод: по фактору микроклимата класс условий труда — 1 (оптимальный), так как все параметры находятся в пределах норм СанПиН 1.2.3685–21. Рекомендации не требуются.

### 5.2.2 Оценка шумовых нагрузок и проектирование звукоизоляции

Шум — это совокупность звуков различной частоты и интенсивности, негативно влияющих на здоровье и работоспособность человека. Учет шума необходим для предотвращения слуховых нарушений и снижения концентрации оператора.

Основным источником шума является работа ЖРД (РД–191) и взаимодействие газовой струи с газоотражательным каналом (угол наклона 32°, материал — сталь 25X5М). Шум передается через конструктивные элементы бункера, несмотря на его изоляцию.

Согласно Приложению №11 Приказа Минтруда №817н, предельно допустимый уровень звука для рабочих мест с умственной деятельностью (категория оператора) составляет 80 дБА. Таблица 11 приводит допустимые уровни звукового давления.

Таблица 11 – Предельно допустимые уровни звукового давления (СанПиН 1.2.3685–21)

Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Эквивалентный уровень, дБА
Уровень, дБ	99	87	80	74	70	67	65	63	80

Цель: определить уровень шума в бункере управления от работы ЖРД (РД–191, тяга 200 тонн–сил) с учетом расстояния и звукоизоляции стен.

Исходные данные:

— Тяга ЖРД: 200 тс (1 962 000 Н);

- Число Маха газовой струи: 4–6 (раздел 2.2);
- Расстояние от сопла ЖРД до бункера: 50 м;
- Материал стен бункера: жаропрочный бетон, толщина 0,5 м, плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>.

Уровень звуковой мощности ( $L_W$ ) рассчитывается по формуле:

$$L_W = 10 \times \log_{10}(P_{ac}) + 120 \text{ дБ}, \quad (49)$$

где  $P_{ac}$  – акустическая мощность, которая зависит от тяги:

$$P_{ac} = 0,005 \times F \times v_e, \quad (50)$$

где:

— 0,005 – акустическая эффективность ЖРД;

—  $v_e = 3000 \text{ м/с}$  – скорость истечения газов.

$$P_{ac} = 0,005 \times 1962000 \times 3000 = 29430000 \text{ Вт},$$

$$L_W = 10 \times \log_{10}(29430000) + 120 \approx 194,7 \text{ дБ}.$$

Уровень звукового давления ( $L_p$ ) на расстоянии 50 м:

$$L_p = L_W - 20 \times \log_{10}(50) - 11, \quad (51)$$

$$L_p = 194,7 - 34 - 11 \approx 149,7 \text{ дБ}.$$

С учетом атмосферного поглощения ( $\sim 0,5$  дБ):

$$L_p \approx 149 \text{ дБ на расстоянии 50 м}.$$

Звукоизоляция стены ( $R$ ) зависит от индекса массы тела (поверхностная масса)  $m_n$  и частоты  $f$ .

Для бетона:

$$m = A_{\text{ед}} \times \rho \times c, \quad (52)$$

где:

$A_{\text{ед}}$  – квадратный метр площади бетона;

$\rho$  – плотность бетона;

$c$  – толщина бетона.

$$m = 1 \times 2500 \times 0,5 = 1250 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Звукоизоляция на частоте 500 Гц:

$$R = 20 \times \log_{10}(m \times f) - 47, \quad (53)$$

$$R = 20 \times \log^{10}(1250 \times 500) - 47 \approx 69 \text{ дБ}.$$

Уровень шума внутри бункера:

$$L_{\text{внутр}} = L_p - R, \quad (54)$$

$$L_{\text{внутр}} = 149 - 69 = 80 \text{ дБ}.$$

Фактический уровень шума  $\approx 87$  дБА (если учитывать окна и неоднородный спектр газовой струи ЖРД).

Дополнительная звукоизоляция:

— Обшить стены бункера многослойными звукопоглощающими панелями из минеральной ваты (50 мм, плотность 40 кг/м<sup>3</sup>) и гипсокартона (2 × 12,5 мм, масса 20 кг/м<sup>2</sup>). Данное решение позволит снизить уровень шума внутри бункера на ~25 дБ;

— Выдать операторам противозумные наушники (SNR  $\geq 20$  дБ).

Вывод: уровень шума 87 дБА превышает ПДУ (80 дБА) на 7 дБ, что соответствует классу условий труда 3.1 (вредный), что требует использования дополнительной звукоизоляции. Точный замер требует проведения специальной оценки условий труда (СОУТ).

### 5.2.3 Освещенность

Освещенность — это уровень светового потока на рабочей поверхности, влияющий на зрительный комфорт и производительность. Учет освещенности необходим для предотвращения зрительного утомления.

Согласно СНиП 23–05–95 «Естественное и искусственное освещение», для категории зрительной работы IV (работа с дисплеями и пультами управления) минимальная освещенность рабочей поверхности составляет 400 лк. Приложение №16 Приказа Минтруда №817н классифицирует условия труда как допустимые при освещенности  $\geq 400$  лк.

Определение необходимого числа светильников ( $N$ ) производится по формуле [СНиП 23–05–95]:

$$N = \frac{E \times S \times z \times K_3}{n \times \Phi_{\lambda} \times \eta}, \quad (55)$$

где:

—  $E = 400$  лк – нормируемая освещенность;

—  $K_3 = 1,4$  – коэффициент запаса, учитывает снижение освещенности в процессе эксплуатации;

—  $S$  – освещаемая площадь,  $m^2$ ;

—  $n$  – количество ламп в светильнике, шт.;

—  $z = 1,15$  – коэффициент минимальной освещенности;

—  $\Phi_{\lambda}$  – световой поток лампы;

—  $\eta = 0,5$  – коэффициент использования.

Предположим использование стандартных ДСП (д – светодиодный, с – подвесная конструкция, п – подходит для пожароопасных помещений) светильников ЕСАУЛ РУС ДСП 02 60, мощностью 60.7 Вт и световым потоком 8916 Лм.

$$N = \frac{400 \times 106 \times 1,15 \times 1,4}{1 \times 8916 \times 0,5} = 8,668 \text{ шт.}$$

Таким образом, в бункере установлены 9 светодиодных светильника, обеспечивающие освещенность рабочей поверхности пульта на уровне  $\leq 400$  лк.

Вывод: По фактору освещенности класс условий труда — 2 (допустимый), так как фактическое значение удовлетворяет нормам (400 лк). Рекомендации не требуются.

#### 5.2.4 Химические вещества

Химические вещества — это компоненты, которые могут выделяться в воздух рабочей зоны и представлять угрозу здоровью. Учет необходим для предотвращения отравлений и хронических заболеваний.

Потенциальные источники – испарения нафтила (РГ–1) и жидкого кислорода при возможных микропроливах или разгерметизации магистралей. РГ–1 является токсичным углеводородом (класс опасности 3), а кислород в газообразной форме может усиливать горение.

Согласно ГОСТ 12.1.005–88, предельно допустимая концентрация (ПДК) паров углеводородов (аналог РГ–1) в воздухе рабочей зоны составляет 300 мг/м<sup>3</sup>. Для кислорода ПДК не нормируется, но повышенная концентрация (>23%) создает риск пожара.

Бункер управления изолирован от зоны испытаний, а система вентиляции обеспечивает воздухообмен, предотвращающий накопление паров. Концентрация паров РГ–1 в воздухе рабочей зоны оценивается как <10 мг/м<sup>3</sup> (на основе герметичности систем и данных раздела 3.3).

Рекомендации:

- Регулярно проверять герметичность топливных магистралей;
- Установить газоанализаторы для контроля концентрации углеводородов в бункере.

Вывод: по фактору химических веществ класс условий труда – 1 (оптимальный), так как концентрация паров РГ–1 значительно ниже ПДК.

### 5.2.5 Тяжесть трудового процесса

Тяжесть трудового процесса характеризуется физической нагрузкой, связанной с рабочей позой и стереотипными движениями. Учет необходим для предотвращения мышечного утомления.

Согласно Приложению №20 Приказа Минтруда №817н, для категории работ Ia оптимальная рабочая поза — сидя с возможностью изменения положения. Стереотипные движения (до 20 000 за смену) соответствуют классу 1.

Оператор работает в положении сидя, совершая около 10 000 стереотипных движений за 8-часовую смену (ввод команд, управление мышью).

Вывод: по фактору тяжести класс условий труда — 2 (допустимый), так как количество движений соответствует норме.

### 5.2.6 Напряженность трудового процесса

Напряженность характеризует умственную и эмоциональную нагрузку, связанную с наблюдением и принятием решений. Учет необходим для предотвращения стресса и утомления.

Согласно Приложению №20 Приказа Минтруда №817н, длительность сосредоточенного наблюдения до 50% смены и плотность сигналов до 75 в час соответствуют классу 2.

Оператор наблюдает за телеметрическими данными на мониторе около 60% смены и обрабатывает до 100 сигналов в час во время испытания (270 с).

Рекомендации:

— Внедрить автоматизированные системы оповещения о критических параметрах;

— Проводить регулярные перерывы (10 мин каждый час).

Вывод: по фактору напряженности класс условий труда — 3.1 (вредный), так как длительность наблюдения и плотность сигналов превышают нормы.

### 5.2.7 Итоговый класс условий труда

В таблице 12 сведены итоговые оценки условий труда по классам.

Таблица 12 – Оценка условий труда по классам

Фактор	Класс/подкласс
Микроклимат	1 (оптимальный)
Шум	3.1 (вредный)
Освещенность	2 (допустимый)
Химические вещества	1 (оптимальный)
Тяжесть труда	2 (допустимый)
Напряженность труда	3.1 (вредный)

Вывод: Итоговый класс условий труда на рабочем месте оператора — 3.1 (вредный), так как два фактора (шум и напряженность) относятся к подклассу 3.1. Согласно Приложению №22 Приказа Минтруда №817н, сочетание двух факторов подкласса 3.1 не повышает итоговый класс до 3.2.

### 5.3 Эргономика рабочего места

Эргономика — это наука, изучающая взаимодействие человека с оборудованием и средой для оптимизации условий труда. Эргономика РМ оператора направлена на минимизацию физических и зрительных нагрузок.

Характеристика РМ:

— Основные элементы: пульт управления (рабочий стол 120 × 80 см, высота 75 см), монитор (24 дюйма, расстояние до глаз 60 см), клавиатура, мышь, кресло без регулировки.

— Положение оператора: сидя, с наклоном корпуса вперед (угол 10–15°).

— Угол наблюдения монитора: 0–15° (соответствует ГОСТ Р ИСО 9241–3–2003).

— Высота символов на экране: 3 мм, интервал между строками — 1,5 мм (соответствует ГОСТ Р 52324–2005).

### 5.4 Электроопасность

Согласно ГОСТ 12.1.019–79 «Электробезопасность. Общие требования», электроопасность помещений классифицируется по Правилам устройства электроустановок (ПУЭ–7). Таблица 13 описывает категории помещений.

Таблица 13 – Классификация помещений по электроопасности (ГОСТ 12.4.155–85)

Категория помещения	Характеристика
Без повышенной опасности	Сухие помещения, влажность <60%, напряжение до 42 В, нет токопроводящей пыли
С повышенной опасностью	Влажность >60%, температура >35 °С, наличие токопроводящих поверхностей
Особо опасные	Влажность >75%, наличие химически активных веществ, напряжение >500 В

Фактические условия:

- Бункер управления — сухое помещение (влажность 50%);
- Напряжение оборудования: 220 В (пульт управления), 380 В (насосы системы водоснабжения);
- Заземление и защитные кожухи на электрооборудовании присутствуют;
- Отсутствует токопроводящая пыль или химически активные вещества в воздухе.

Рекомендации:

- Регулярно проверять состояние заземления (сопротивление <4 Ом);
- Установить указатели напряжения на электрощитах.

Вывод: Помещение относится к категории «без повышенной опасности», так как влажность и напряжение соответствуют нормам, а заземление обеспечивает защиту.

### **5.5 Пожароопасность**

Согласно НПБ 105–03 «Определение категорий помещений по пожарной опасности», категории помещений определяются по удельной пожарной нагрузке и свойствам веществ. Таблица 14 описывает категории.

Таблица 14 – Категории помещений по пожароопасности (НПБ 105–03)

Категория	Характеристика веществ и материалов
А	Горючие газы, жидкости с температурой вспышки $\leq 28$ °С, взрывоопасные смеси
Б	Горючие жидкости с температурой вспышки 28–61 °С, горючие пыли
В1–В4	Горючие жидкости и твердые материалы, пожароопасные
Г	Негорючие вещества в горячем состоянии, выделяющие тепло
Д	Негорючие вещества и материалы

Фактические условия:

— В бункере управления отсутствуют горючие материалы, но рядом расположены баки с РГ–1 (температура вспышки  $\sim 40$  °С, класс Б) и жидким кислородом (усиливает горение);

— Удельная пожарная нагрузка в бункере минимальна (пластиковые элементы пульта,  $< 50$  МДж/м<sup>2</sup>), что соответствует категории Д;

— В огневом боксе (зона испытаний) категория А из-за наличия РГ–1 и кислорода;

— Бункер оснащен системой пожаротушения (водяной коллектор), огнетушителями (2 шт., ОП–5), схемой эвакуации и указателями выхода.

Рекомендации:

— Установить дополнительные датчики дыма в бункере;

— Проводить регулярные тренировки по эвакуации и использованию огнетушителей;

— Обеспечить герметичность топливных магистралей для предотвращения утечек РГ–1.

Вывод: Бункер управления относится к категории Д (низкая пожароопасность). Зона испытаний (огневой бокс) — категория А из-за КРТ.

## 5.6 Меры по предотвращению и ликвидации проливов КРТ

### Описание рисков:

— Жидкий кислород – криогенная жидкость ( $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вызывает ожоги при контакте с кожей. При утечке испаряется, повышая концентрацию кислорода в воздухе ( $>23\%$ ), что увеличивает риск пожара.

— Нафтил (РГ–1) – токсичная жидкость (класс опасности 3), вызывает раздражение кожи, глаз и дыхательных путей. Проливы загрязняют почву и воду, требуя нейтрализации.

### Последствия проливов:

— Экологический ущерб: загрязнение почвы и грунтовых вод РГ–1;

— Пожаро- и взрывоопасность: испарения РГ–1 образуют горючие смеси;

— Здоровье персонала: риск отравления парами РГ–1 и криогенных ожогов.

### Меры предотвращения:

— Использование герметичных баков (РВК–200, РВС–100) с двойной вакуумной изоляцией и коррозионностойкими материалами (раздел 3.3);

— Регулярная опрессовка магистралей (давление до 3 МПа) для проверки герметичности (раздел 4);

— Установка датчиков давления и уровня в баках для раннего обнаружения утечек;

— Автоматизированная система управления для аварийного отключения подачи КРТ.

### Меры ликвидации:

— Стендовые емкости для сбора остатков КРТ в нештатных ситуациях (раздел 1.2);

— Использование абсорбентов (песок, цеолит) и химических нейтрализаторов (растворы щелочей) для обработки проливов;

— Усиленный воздухообмен в зоне испытаний для удаления паров;

— Регулярный анализ почвы и воды вблизи стенда для выявления загрязнений.

Меры соответствуют Федеральному закону №256–ФЗ от 21.07.2011 «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» и ГОСТ 12.1.010–76 «Нормы взрывобезопасности».

### **5.7 Выводы**

В разделе «Техника безопасности в процессе эксплуатации стенда» проведен анализ условий труда на рабочем месте оператора бункера управления по следующим факторам: микроклимат, шум, освещенность, химические вещества, тяжесть и напряженность труда. Итоговый класс условий труда — 3.1 (вредный) из-за превышения норм по шуму (87 дБА против 80 дБА) и напряженности труда (длительность наблюдения 60% смены).

Помещение бункера классифицировано как «без повышенной опасности» по электроопасности (ГОСТ 12.1.019–79) и категория Д по пожароопасности (НПБ 105–03). Зона испытаний (огневой бокс) относится к категории А из-за наличия РГ–1 и жидкого кислорода.

Для предотвращения и ликвидации проливов КРТ предложены меры: герметизация систем, сливные емкости, нейтрализация РГ–1 абсорбентами, экологический мониторинг.

Рекомендуемые мероприятия включают:

- Установку звукоизолирующих панелей и использование противошумных наушников;
- Автоматизированные системы оповещения;
- Регулярную проверку герметичности магистралей и установку газоанализаторов;
- Проведение тренировок по пожарной безопасности и эвакуации.

Любые отказы оборудования стенда не приводят к опасным ситуациям (пожар, взрыв, токсичные выделения), так как оборудование проходит ежедневный осмотр, а оператор соблюдает инструкции по технике безопасности.

## 6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной части работы приводится экономическое обоснование вертикального стенда для проведения огневых испытаний ракетных двигателей с тягой до 200 тонн–сил.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемого стенда необходимо рассчитать затраты на его проектирование, затраты на приобретение материалов и комплектующих элементов, необходимых для проектирования и создания опытного образца. Помимо прямой экономической целесообразности, современный огневой стенд также может принести косвенный экономический эффект.

К косвенному экономическому эффекту от создания современного огневого стенда можно отнести следующие факторы:

— Повышение качества испытаний. Современный огневой стенд позволяет проводить более точные и достоверные испытания, что приводит к повышению качества продукции. Это, в свою очередь, может привести к увеличению спроса на продукцию, а также снижению затрат на ее гарантийное обслуживание;

— Снижение рисков. Современный огневой стенд имеет более высокую степень безопасности, что снижает риски возникновения аварий и травм. Это может привести к снижению страховых взносов, а также к повышению эффективности производства;

— Улучшение условий труда персонала. Современные стенды оснащены системами безопасности и автоматизации, что снижает риски травм и заболеваний персонала;

Потенциальными заказчиками являются:

1) Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос". В структуру Роскосмоса входят следующие предприятия, занимающиеся разработкой и производством ракетных двигателей:

— АО "НПО "Энергомаш" им. академика В.П. Глушко" (г. Химки, Московская область);

— АО "РКЦ "Прогресс" (г. Самара);

— АО "НПО "Сатурн" (г. Рыбинск, Ярославская область);

— АО "МИТ" (г. Москва);

— АО "НПО "Турбомашина" (г. Санкт-Петербург).

2) Частные предприятия, занимающиеся разработкой и производством ракетных двигателей. К ним относятся:

— АО "ОДК-Мотор" (г. Ульяновск);

— АО "НПО "Луч" (г. Москва);

— АО "НПО "Авангард" (г. Москва).

Ценность стенда заключается в необходимости новых, высокотехнологических и универсальных решениях, которые позволят минимизировать технологическое время испытаний и обслуживать космические средства (КСр), запускаемые с нового космодрома «Восточный».

### **6.1 Календарный план работы над проектированием стенда**

Разработка календарного плана по проектированию и созданию стенда производится на основе данных о трудоемкости работ, связанных с выполнением дипломного проекта.

Жизненным циклом стенда считается весь цикл от принятия решения о проведении разработок до полного отказа конечного пользователя от применения данного стенда.

Жизненный цикл состоит из 4 этапов:

1) Этап разработки

Данный этап состоит из следующих подэтапов:

— проектирование стенда;

— изготовление опытного образца;

— различные испытания опытного образца на соответствие требованиям технического задания Заказчика.

## 2) Этап внедрения

Данный этап состоит из следующих подэтапов:

— принятие Заказчиком от организации–разработчика (изготовителя) стенда;

— ввод в эксплуатацию.

## 3) Этап зрелости

Данный этап состоит из следующих подэтапов:

— эксплуатация стенда и выход на требуемые основные режимы работы;

— полноценное использование стенда Заказчиком и получение доходов, соответствующих технико-экономическому обоснованию.

## 4) Этап упадка

Данный этап состоит из следующих подэтапов:

— выход из строя стенда, требующий экономически необоснованный комплекс ремонтно-восстановительных работ;

— моральное устаревание и полная деградация стенда, требующая дополнительные затраты на новые технологические изыскания.

Были осуществлены следующие пункты подэтапа «Проектирование стенда»:

1) Проектный расчет универсального огневого стенда, в котором разработаны и определены:

— исходные данные;

— принципиальная схема для проведения проектного расчета;

— конструктивные размеры рабочей части;

— выбор дополнительных систем для осуществления работы установки в заданном диапазоне нагрузки.

2) Графическое сопровождение (моделирование):

— принципиальная схема размещения составных частей огневого стенда;

— общий вид стенда;

— конструктивно–компоновочная схема станда и рабочей части (стапеля с универсальным захватом).

План проведения работ представлен в таблице 15.

Таблица 15 – План проведения работ по проектированию станда

№	Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, дни
1	Разработка технического задания	Руководитель	1
2	Изучение литературы	Инженер	5
3	Разработка структурной схемы	Инженер	3
4	Разработка принципиальной схемы	Инженер	3
5	Разработка функциональной схемы	Инженер	3
6	Разработка конструкции	Инженер	5
7	Изготовление рабочих чертежей	Инженер	10
8	Разработка технологических	Инженер	3
9	Подготовка документации	Инженер	5
10	Консультация с руководителем	Руководитель	3
Итого			41

Для таблицы 15 принято, что в месяце – 21 рабочий день.

## **6.2 Себестоимость огневого станда**

Основными источниками затрат при работе над темой как части этапа проектирования жизненного цикла интеллектуальной системы являются капитальные предпроизводственные затраты, которые в свою очередь могут быть учтены и минимизированы.

В себестоимость работы включаются все затраты, связанные с ее выполнением вне зависимости от источника ее финансирования. Калькуляция себестоимости составляется по статьям:

1. Основная и дополнительная заработная плата основных исполнителей;
2. Страховые взносы;
3. Затраты на расходные материалы;

4. Прочие расходы;
5. Накладные расходы.

Расходные материалы, необходимые для проектирования данного стенда, включает в себя:

- программное обеспечение MS Office 2010 для оформления документации;
- SolidWorks Simulation 2020 для разработки чертежей в электронном формате;
- 9 листов формата А1 для распечатки графического материала к проекту;
- 2 упаковки бумаги формата А4.

В таблице 16 приведен расчет затрат на расходные материалы. Сумма затрат рассчитывается исходя из цены и количества необходимых материалов, цены – рыночные.

Таблица 16 – Затраты на расходные материалы

№	Наименование оборудования	Количество	Цена, у. е.	Сумма затрат, у. е.
1	Программное обеспечение MS Office 2019	1	2 214,08	2 214,08
2	Программное обеспечение SolidWorks Simulation 2020 x64	1	8 540,60	8 540,60
3	Лист формата А1	9	225,00	2 025,00
4	Упаковка бумаги формата А4	2	380,00	760,00
5	Тонер	1	350,00	350,00
Итого				13 919,68

Таблица 17 – Основная заработная плата разработчиков

№	Наименование этапа	Трудоем- кость этапа, чел./день	Трудоем- кость этапа, чел./мес.	Заработная плата, у. е	Затраты по заработной плате, у. е
1	Разработка технического задания	1	0,048	44 800	2 150,4
2	Изучение литературы	5	0,238	35 980	8 563,24
3	Разработка структурной схемы	3	0,143	35 980	5 145,14
4	Разработка принципиальной схемы	3	0,143	35 980	5 145,14
5	Разработка функциональной схемы	3	0,143	35 980	5 145,14
6	Разработка конструкции	5	0,238	35 980	8 563,24
7	Изготовление рабочих чертежей	10	0,476	35 980	17 126,48
8	Построение графиков (проверка расчетов)	3	0,143	35 980	5 145,14
9	Подготовка документации	5	0,238	35 980	8 563,24
10	Консультация с руководителем	3	0,143	44 800	6 406,4
Итого					71 953,56

Дополнительная заработная плата разработчиков составляет 20% от основной заработной платы:

$$71\,953,56 \times 20\% = 14\,390,71 \text{ у. е.}$$

Страховые взносы составляют 30,2% от фонда оплаты труда:

$$(71\,953,56 + 14\,390,71) \times 30,2\% = 26\,075,97 \text{ у. е.}$$

Накладные расходы составляют 140 – 250 % от величины основной заработной платы. При проектировании и создании данного стенда примем их равными 220 %:

$$71\,953,56 \times 220\% = 158\,297,83 \text{ у. е.}$$

Прочие расходы включают стоимость машинного времени на проектирование испытательного стенда и подготовку технической документации и рассчитываются по формуле:

$$Z_{np} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (54)$$

где  $N$  – количество часов, необходимых на проектирование испытательного стенда и подготовку технической документации;

$C_{мч}$  – стоимость машино–часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 70 у. е.;

$K_{загр}$  – коэффициент загрузки ПЭВМ, равный 0,7–0,9.

Количество часов  $N$  рассчитаем исходя из таблицы 15, учитывая дни, затраченные на выполнение этапов, принимая, что каждый день работы длились 8 часов:

$$N = (3 + 3 + 3 + 5 + 10 + 3 + 5) \times 8 = 256 \text{ час};$$

$$Z_{np} = 256 \times 70 \times 0,8 = 14\,336,00 \text{ у. е.}$$

Сведем полученные данные по затратам на приобретение расходных материалов, основную и дополнительную заработную плату рабочих, затраты по страховым взносам, накладные и прочие расходы в единую таблицу. Себестоимость проектирования огневого стенда представлена в таблице 18.

Таблица 18 – Себестоимость проектирования стенда

Наименование статей расходов	Затраты, у. е
Затраты на приобретение расходных материалов	13 919,68
Затраты на основную заработную плату разработчиков	71 953,56
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	14 390,71
Затраты на социальные страховые взносы	26 075,97
Накладные расходы	158 297,83
Прочие расходы	14 336,00
Итого	298 973,75

Для создания опытного образца необходимы комплектующие изделия, стоимость которых приведена в таблице 19.

Таблица 19 – Расходы на приобретение комплектующих изделий

№	Наименование изделия	Количество	Цена, у. е	Сумма, у. е
1	Прокатные листы металла 25X5М	300	1 300,00	390 000,00
2	Бетонные плиты	60	62 000,00	3 720 000,00
3	Металлический каркас стенда	1	8 500 000,00	8 500 000,00
4	Мостовой кран	1	3 750 000,00	3 750 000,00
5	Стапель стенда	1	3 500 000,00	3 500 000,00
6	Система заправки горючим	1	14 000 000,00	14 000 000,00
7	Система заправки окислителем	1	19 000 000,00	19 000 000,00
8	Система освещения стенда	1	420 000,00	420 000,00
9	Система пожаротушения стенда	1	900 000,00	900 000,00
10	Система водяного охлаждения	1	650 000,00	650 000,00
11	Расходомер	4	62 000,00	248 000,00
12	Система управления	1	2 000 000,00	2 000 000,00

Итого	57 078 000,00
-------	---------------

Затраты на основные расходные материалы, которые включают стоимость рабочего тела, расходуемого в процессе подготовки и проведения испытания, представлены в таблице 20.

Таблица 20- Затраты на основные расходные материалы

№	Наименование материала	Объем, л	Цена, у. е	Сумма, у. е
1	Вода	600 000	2,70	1 620 000,00
2	РГ-1	60 000	90,12	5 407 200,00
3	Жидкий кислород	120 000	76,20	9 144 000,00
4	Сжатый воздух	600	33,50	20 100,00
5	Сжатый азот	900	38,85	34 965,00
6	Гидравлическая жидкость	100	44,00	4 400,00
7	Машинное масло	80	53,00	4 240,00
Итого				16 234 905,00

### 6.3 Оценка косвенного экономического эффекта

Главный экономический эффект от разработки и внедрения данного стенда заключается в улучшении экономических и рабочих показателей за счет повышения автоматизации и оперативности управления

Это позволяет:

- сократить количество обслуживающего персонала за счет автоматизации большинства процессов;
- сократить продолжительность и стоимость этапа стендовой отработки за счет проведения комплексных испытаний на одном стенде;
- уменьшить количество летных испытаний за счет повышения информативности наземных испытаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе проведена проектная разработка вертикального стенда для проведения огневых испытаний ракетных двигателей с тягой до 200 тонн–сил.

В основной части определены основные подсистемы огневых комплексов, разработана принципиальная блок–схема огневого комплекса. Произведен анализ конструктивно–компоновочных схем, на основании которого, разработана принципиальная ПГС схема стенда. Представленная ПГС схема наглядно описывает необходимые технологические решения реализованные и описанные в данной работе.

В расчетной части определены основные проектные параметры стенда, а именно массово–геометрические характеристики топливной системы, подобраны оптимальные стендовые баки, рассчитаны гидравлические параметры топливных магистралей. А также, разработана конструкция газоотражательного канала.

В разделе «Описание конструкции стенда» представлен общий вид разработанного стенда в виде 3D модели, выполненной в САПР. Разработано описание подсистем стенда.

В технологической части разработан технологический процесс проведения испытаний на представленном огневом стенде. Весь процесс разделен на три основных этапа: подготовительные, основные и заключительные. По разработанному списку операций построена графическая технологическая схема.

В разделе техники безопасности проведен анализ условий труда оператора бункера управления, установлен класс 3.1 (вредный). Бункер классифицирован как «без повышенной опасности» по электроопасности (ГОСТ 12.1.019–79), категория Д по пожароопасности (НПБ 105–03), зона испытаний — категория А из-за РГ–1 и жидкого кислорода. Для предотвращения проливов КРТ предложены герметизация, сливные емкости, нейтрализация абсорбентами и

экологический мониторинг. Рекомендации: звукоизоляция, противошумные наушники, системы оповещения, проверка герметичности, газоанализаторы, тренировки по пожарной безопасности и эвакуации. Ежедневный осмотр оборудования и соблюдение инструкций исключают пожары, взрывы и токсичные выделения.

В экономической части были рассмотрены вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на создание стенда. Таким образом, себестоимость проектирования стенда огневых испытаний составила 298 973,75 у. е. Расходы на приобретение комплектующих изделий, необходимых для создания опытного образца составили 57 078 000,00 у. е. Затраты на основные расходные материалы, необходимые для проведения испытаний составили 16 234 905,00 у. е. Также, для оценки данного комплекса с экономической точки зрения был описан косвенный экономический эффект от применения разработки, так как эффект невозможно посчитать в денежных единицах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Галеев А. Г. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники / А. Г. Галеев, Ю. В. Захаров, В. П. Макаров. — Москва : МАИ, 2014. — 326 с.
- 2 Бирюков Г. П. Газодинамика стартовых комплексов / Г. П. Бирюков, А. Б. Бут, В. А. Хотулев. — М. : РЕСТАРТ, 2012. — 364 с.
- 3 Храмцов Б. А. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: учебное пособие "Безопасность технолог. процессов и пр-в" / Б. А. Храмцов, А. П. Гаевой, И. В. Дивиченко. — Старый Оскол, 2011. — 272 с.
- 4 Федеральный закон от 21.07.2011 г. № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2011. № 30 (1 ч.). ст. 4604.
- 5 Галеев А. Г. Эксплуатация стендов для испытаний ракетных двигательных установок: учебное пособие / А. Г. Галеев; под ред. А. Н. Перминова. — М. : МАИ-Принт, 2008. — 96 с.
- 6 Галеев А. Г. Эксплуатация стартовых комплексов ракетно-космических систем / А. Г. Галеев, А. А. Золотов, А. Н. Перминов, В. В.; под ред. А. Н. Перминова. — М. : МАИ, 2007. — 347 с.
- 7 Механика ударно-волновых процессов в технологических системах сборник научных трудов международной научно-технической конференции (г. Ростов-на-Дону, 9-12 октября 2012). — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2012. — 308 с.
- 8 Белошенко Б. Г. Методы снижения ударно-волновых нагрузок. Международная конференция «Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения» / Б. Г. Белошенко, И. В. Ершов, А. А. Клевитов — М. : ЦНИИмаш, 1996. — 203 с.
- 9 Куровский Г. Ф. Теплообмен при старте. Международная конференция «Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения» / Г. Ф. Куровский, М. В. Сенкевич, Е. А. Сенкевич. — М. : ЦНИИмаш, 1996. — 106 с.

10 Сырчин А. Ф. Акустические процессы при старте РН сложной компоновки, РКТ. / А. Ф. Сырчин, В. А. Хотулев — Серия II, выпуск 2. Пересвет. ЦНИИмаш, 1993. — 256 с.

11 Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. / Г. Н. Абрамович — М. : Наука, 1969. — 397 с.