

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: Расчет параметров стенда криогенных испытаний и разработка технологии испытаний космических аппаратов

Исполнитель
студент группы 1109–об2



(подпись, дата)

А.В. Фомин

Руководитель
канд. техн. наук, доцент



(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант по БЖД
доцент, канд. тех. наук



(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
стар. пред. кафедры СИТРК

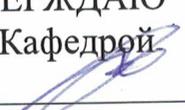


(подпись, дата)

М.А. Аревков

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 Фомин Антон Валерьевич

1. Тема выпускной квалификационной работы: Расчет параметров стенда криогенных испытаний и разработка технологии испытаний космических аппаратов.

(утверждена приказом от 22.04.2025 №1055–уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 06.06.2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: стенд – стационарный, для тепловакуумных испытаний; диапазон давлений 105...10⁻⁴ Па; время подготовки вакуумной части установки – 2 часа; диапазон температур 300...73 К; объекты испытаний: космические аппараты с отсеками открытого типа типоразмера малых и сверхмалых.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): описание существующих принципиальных схем стендов, расчеты вакуумной и криогенной систем, подбор элементов телеметрической системы стенда, разработка технологического процесса проведения испытаний на стенде, разработка 3D модели стенда в САПР, описание правил и мер безопасности применимых к разрабатываемому стенду, экономическое обоснование разработки стенда.

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, иллюстративного материала и т.п.): титульный лист, цели и задачи, ПГС, общий вид, ККС, десублиматор, диапазоны рабочих давлений вакуумметров, вакуумметры, технологическая часть, заключение.

6. Консультант по БЖД: Козырь Аркадий Валентинович, доцент, канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев Владислав Викторович, доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (дата): 29.05.2025 г. 

РЕФЕРАТ

Отчет по практике содержит: 77 страниц, 18 рисунков, 16 таблиц, 2 приложения, 24 источника.

КРИОГЕННАЯ КАМЕРА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ИМИТАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Цели:

1. Изучить особенности вакуумных стендов;
2. Изучить виды тепловакуумных испытаний;
3. Ознакомиться с устройством и строением вакуумных и криогенных систем;
4. Изучить технологию испытаний космических аппаратов.

Задачи:

1. Сформировать и описать принципиальную и ПГС схемы тепловакуумных стендов;
2. Рассчитать элементы вакуумной системы при эксплуатационных нагрузках;
3. Рассчитать элементы криогенной системы при эксплуатационных нагрузках;
4. Спроектировать 3D модель разработанного стенда;
5. Разработать циклограмму испытаний;
6. Описать правила и меры безопасности при эксплуатации стенда;
7. Произвести экономическое обоснование проектирования стенда.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ	9
1.1 Назначение и состав вакуумного испытательного комплекса	9
1.2 Анализ конструктивно-компоновочных схем	10
2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	15
2.1 Постановка последовательности расчета и исходные данные	15
2.2 Расчет вакуумной камеры	16
2.3 Расчет газовых нагрузок вакуумной системы	20
2.4 Выбор высоковакуумного насоса	23
2.5 Выбор форвакуумного насоса	24
2.6 Расчет времени откачки вакуумной камеры	25
2.7 Расчет криогенной системы	25
2.8 Расчет на прочность элементов конструкции	31
2.9 Выбор вакуумметров	34
2.9.1 Вакуумметр деформационный	36
2.9.2 Современные комбинированные вакуумметры	37
2.9.3 Сравнение комбинированных вакуумметров	39
3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ	45
4 РАЗРАБОТКА ЦИКЛОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ	49
5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДА	52
5.1 Введение	52
5.2 Анализ условий труда	52
5.2.1 Микроклимат	53
5.2.2 Шум	54
5.2.3 Освещенность	54
5.2.4 Тяжесть трудового процесса	55
5.2.5 Напряженность трудового процесса	55

5.2.6 Итоговый класс условий труда	56
5.3 Эргономика рабочего места	56
5.4 Электроопасность	58
5.5 Пожароопасность	59
5.6 Меры по предотвращению и ликвидации утечек азота	59
5.7 Расчетная часть	60
5.8 Вывод	65
6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	66
6.1 Возможный рынок применения испытательного стенда	66
6.2 Календарный план работы над проектированием стенда	67
6.3 Себестоимость стенда	69
6.4 Оценка косвенного экономического эффекта	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	76
ПРИЛОЖЕНИЕ А	78
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	79

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- ВИК — вакуумный испытательный комплекс;
- ВК — вакуумная камера;
- ВС — вакуумная система;
- ДД — датчик давления;
- ДПК — дренажно-предохранительный клапан;
- ДТ — датчик температуры;
- ЗКС — защита конструкции систем;
- КА — космический аппарат;
- ККС — конструктивно-компоновочная схема;
- КРТ — компоненты ракетных топлив;
- МИК — монтажно-испытательный корпус;
- ОИ — объект испытания;
- ПГС — пневматическая и гидравлическая система;
- ПМБ — правила и меры безопасности;
- РБ — ракетный блок;
- РКН — ракета космического назначения;
- РН — ракета-носитель;
- СБ — система безопасности;
- СГ — система газоснабжения;
- СИТО — система информационно-телеметрического обеспечения;
- ТС — система телеметрии;
- ЭБ — эксплуатационная безопасность;
- ЭПК — электропневмоклапан;
- КИС — комплекс испытательных стендов.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире исследования в области космических технологий играют ключевую роль в обеспечении успешных миссий и стабильной работы космических аппаратов. Одной из важнейших проблем является обеспечение надёжности оборудования, подверженного экстремальным условиям, таким как низкие температуры и вакуум космического пространства. Для этого проводятся различные испытания, целью которых является моделирование этих условий на Земле, что позволяет оценить способность аппаратов работать в космосе. Одним из таких методов является проведение испытаний в криокамере с имитацией воздействия криогенных температур и вакуума.

Предполагается, что технологический процесс испытаний на криокамере для исследования воздействия криогенных температур на космические аппараты открытого типа будет включать разработку и описание всех этапов подготовки и проведения испытаний. Важной задачей является создание принципиальной схемы стенда для проведения таких испытаний.

Основные цели и задачи работы заключаются в следующем:

- Провести анализ научных публикаций и патентов по теме криогенных испытаний космических аппаратов;
- Проанализировать существующие принципиальные схемы стендов для подобных испытаний;
- Разработать принципиальную схему стенда, который будет использоваться для исследования воздействия криогенных температур;
- Разработать и описать технологический процесс проведения испытаний на данном стенде.

Данная работа позволит глубже понять особенности технологического процесса проведения испытаний в криокамере, а также научиться разрабатывать и оптимизировать соответствующие технологические решения для эффективного выполнения испытаний и обеспечения надёжности космических аппаратов в экстремальных условиях.

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1 Назначение и состав вакуумного испытательного комплекса

Космическое пространство — это область за пределами атмосферы Земли, характеризующаяся экстремальными условиями, такими как высокая радиация, отсутствие атмосферы и резкие перепады температуры. В космосе практически отсутствует воздух и другие вещества в значимых концентрациях, что создаёт вакуумные условия. Эти условия требуют высокой надёжности и устойчивости от оборудования, используемого для работы в космическом пространстве.

Криогенные температуры — это очень низкие температуры, обычно ниже 120 °К, при которых многие вещества переходят в твёрдое состояние. В условиях космоса космические аппараты могут подвергаться воздействию таких низких температур. Испытания на криогенных температурах проводятся для оценки устойчивости материалов и оборудования к таким условиям.

Вакуум — это состояние среды с пониженным давлением по сравнению с атмосферным, а в идеале — полное отсутствие вещества. Вакуумные условия космического пространства могут приводить к дегазации материалов, изменению их свойств и других явлений, которые необходимо учитывать при разработке космических аппаратов.

Вакуумный испытательный комплекс (ВИК) предназначен для проведения комплексных испытаний космических аппаратов (КА) в условиях, имитирующих космическое пространство. Основная цель — проверка работоспособности, надёжности и устойчивости КА к воздействию факторов космоса, таких как криогенные температуры (близкие к абсолютному нулю) и высоковакуумное давление (10^{-5} — 10^{-7} Па и ниже). Комплекс позволяет моделировать тепловые, механические и физические условия космоса для оценки поведения материалов, систем и компонентов КА.

Состав вакуумного испытательного комплекса:

- Вакуумная камера;
- Вакуумная насосная система;

- Криогенная система;
- Система имитации солнечного излучения;
- Измерительно-контрольная аппаратура;
- Система терморегулирования;
- Механические и виброакустические стенды (при необходимости);
- Система управления и автоматизации.

Принцип работы:

- КА помещается в вакуумную камеру, где создаются условия высокого вакуума и криогенных температур;

- С помощью систем имитации солнечного излучения и терморегулирования воспроизводятся тепловые циклы, характерные для космоса;

- Проводятся тесты на герметичность, тепловой баланс, дегазацию материалов, работу электроники и механических систем;

- Данные собираются и анализируются для оценки соответствия КА заданным требованиям.

Такой комплекс должен обеспечивать максимально достоверную имитацию космических условий, что важно для успешной эксплуатации КА в реальной среде.

1.2 Анализ конструктивно-компоновочных схем

Для реализации имитации криогенных температур применяются специальные установки, называемые криокамерами. В них создаются условия, приближенные к условиям космического пространства, с использованием охлаждающих систем, позволяющих достигать очень низких температур. Криокамеры оснащены высокоэффективными системами терморегуляции, которые поддерживают заданные температурные параметры и позволяют равномерно распределять холод внутри камеры, что необходимо для надёжного воспроизведения условий, с которыми сталкиваются космические аппараты в открытом космосе. Охлаждение в криокамерах часто достигается с

использованием жидкого азота или гелия, которые обеспечивают стабильные криогенные температуры.

Принципиальная схема криокамеры представлена на рисунке 1.

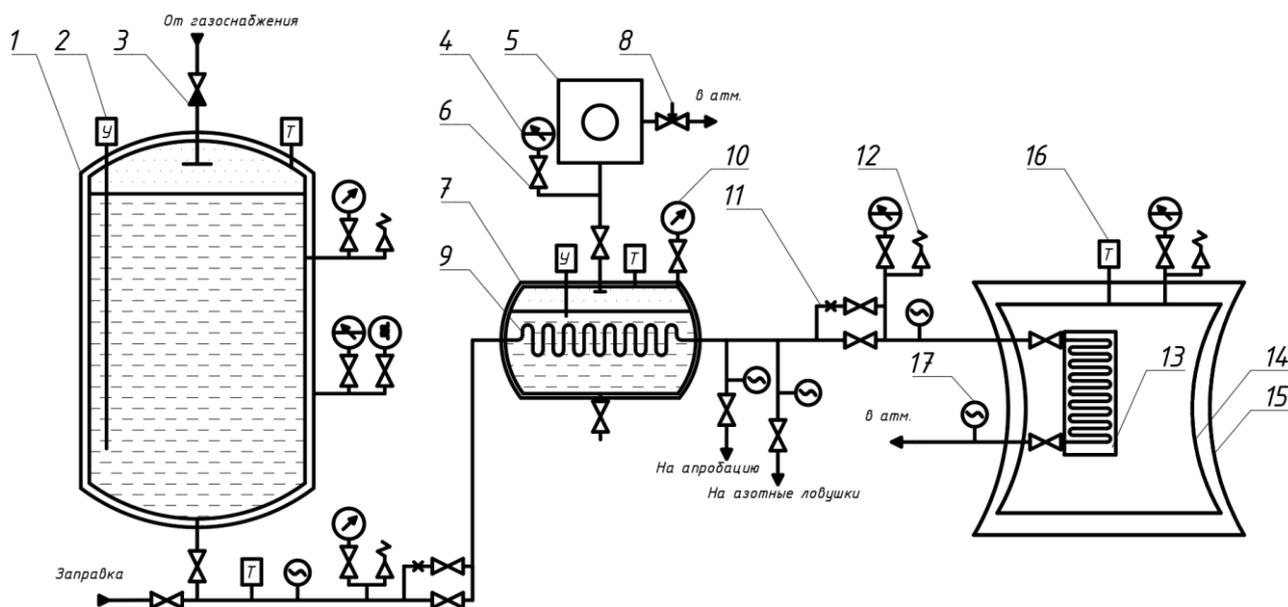


Рисунок 1 — Принципиальная схема криокамеры

- 1 — Бак хранилище; 2 — Датчик уровня; 3 — Обратный клапан;
- 4 — Вакууметр деформационный; 5 — Вакуумный насос объёмный;
- 6 — Клапан; 7 — Бак-теплообменник; 8 — Натекатель; 9 — Сильфон;
- 10 — Манометр; 11 — Жиклёр; 12 — Дренажно-предохранительный клапан;
- 13 — Криопанель; 14 — Криокамера; 15 — Экранно-вакуумная теплоизоляция;
- 16 — Датчик температуры; 17 — Сигнализатор жидкости.

В баке хранилище 1 жидкий азот N_2 хранится при температуре 77 K . В баке теплообменнике 7 N_2 хранится при температуре 73 K (переохлажденный). Этот эффект достигается путем постоянного вакуумирования газовой подушки бака 7 вакуумным насосом 5. Такое решение (предварительное охлаждение) позволяет уменьшить основные потери азота на захолаживание магистралей и подачу его в криопанели 13 криокамеры 14. Выход на режим и охлаждение криокамеры требует определенного времени. Это связано с тем, что азот, попадая в полости трубопроводов испытывает резкий перепад температур и начинает испаряться (захолаживание магистралей). Вытеснение и регулирование компонента из

сосуда выдачи происходит за счет системы наддува. В газовую подушку сосуда подается газообразный азот из ресиверной станции.

Для контроля и регистрации параметров в системе предусмотрены: манометры 10, датчики температуры (ДТ) 16, дренажно-предохранительные клапаны (ДПК) 12, сигнализаторы жидкости (СЖ) 17, вакуумметры 4 и т.д.

Дополнительно в таких камерах создаются вакуумные условия, чтобы максимально имитировать космическую среду, исключая влияние воздуха и влаги, которые присутствуют при стандартном давлении. В результате создаются условия, позволяющие проводить комплексные испытания оборудования и материалов, оценивая их стойкость и работоспособность при экстремально низких температурах.

Дополнительным преимуществом проведения вакуумных и криогенных испытаний в совокупности можно назвать защиту от обледенения стенок камеры. Из-за большого количества воздуха стенки криокамеры покрываются толстым слоем замороженных частиц, что затрудняет эксплуатацию объекта и увеличивает время регенерации. Уменьшая количество воздуха в камере вакуумированием — уменьшается слой обледенения.

Принципиальная схема вакуумной системы представлена на рисунке 2.

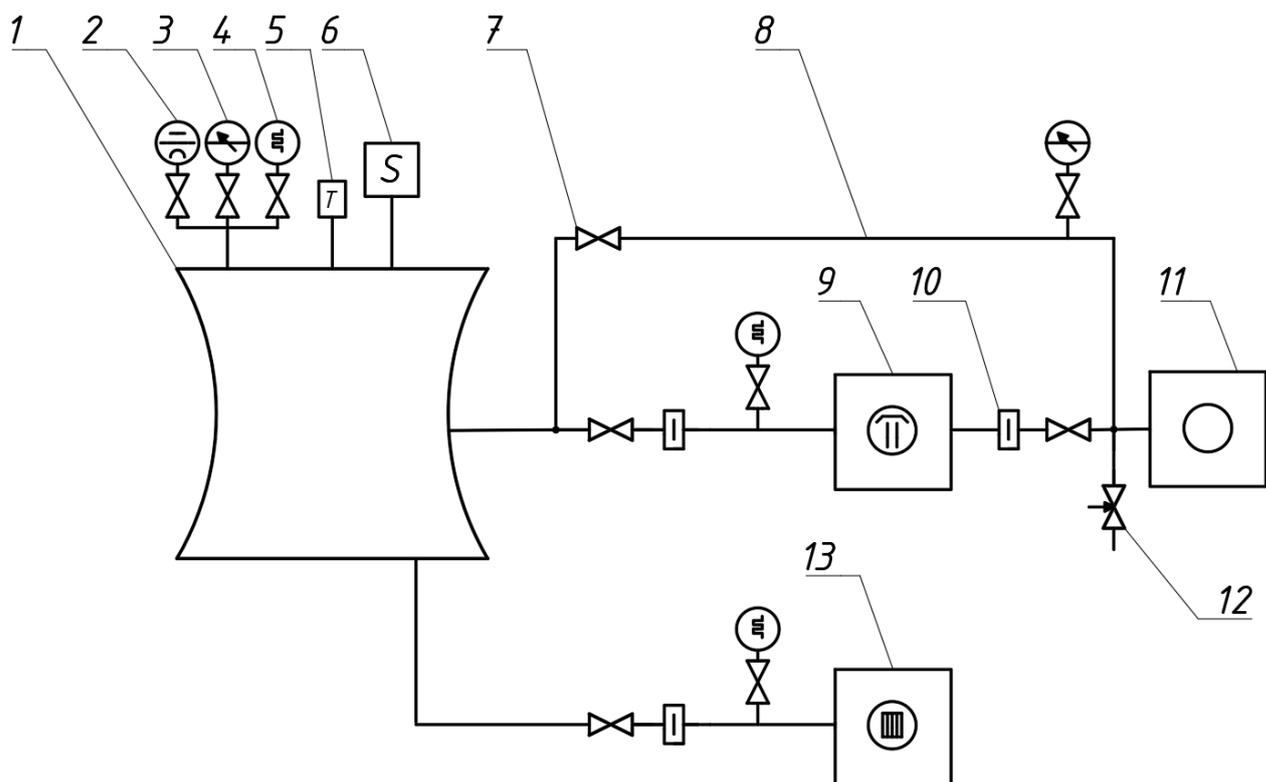


Рисунок 2 — Принципиальная схема вакуумной установки

1 — Вакуумная камера; 2 — Вакууметр ионизационный; 3 — Вакууметр деформационный; 4 — Вакууметр термодатный; 5 — Датчик температуры; 6 — масс-спектрометр; 7 — Клапан; 8 — Байпасная линия; 9 — Насос вакуумный диффузионный; 10 — Азотная ловушка; 11 — Насос вакуумный вращательный; 12 — Натекатель; 13 — Насос вакуумный турбомолекулярный

Данная система имеет 3 ступени откачки:

- Форвакуумная откачка объёмным насосом 11;
- Откачка среднего вакуума насосами 11 и 9 в паре;
- Высоковакуумная откачка турбомолекулярным насосом 13.

При закрытой линии с насосом 9, через байпасную линию 8 производится форвакуумная (предварительная) откачка среды из вакуумной камеры (ВК) 1 насосом 11.

По достижению заданного уровня вакуума, открывается линия с насосом среднего вакуума 9. За счет эжектируемого потока насоса 11 происходит предварительное раскручивание насоса 9 и его последующий запуск. При этом

байпасная линия закрывается клапаном 7. Для защиты полости ВК от механических примесей, содержащихся в вакуумных насосах, предусмотрены вакуумные ловушки 10.

По достижению заданного уровня вакуума открывается линия высоковакуумной откачки с турбомолекулярным насосом 13. Производится предварительная откачка полости насоса, после чего насосы 11 и 9 отключаются, а линия перекрывается. Далее производится высоковакуумная откачка до заданного уровня.

Таким образом, объединив две системы получим стенд криогенных испытаний для космических аппаратов. Следует отметить, что, эффективнее сначала производить вакуумирование, а затем — захолаживание камеры.

Принципиальная схема стенда представлена в приложении А.

2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Постановка последовательности расчета и исходные данные

Задача состоит в определении основных параметров проекта с учетом различных ограничений для разработки оптимального испытательного стенда. Этот процесс включает в себя несколько этапов:

- 1) Выявление основных требований, которые должны быть учтены при создании стенда, чтобы обеспечить его эффективное функционирование;
- 2) Собрание и анализ ключевой информации о характеристиках объекта испытания, для которого будет использоваться стенд, чтобы точно определить необходимые параметры и возможные ограничения;
- 3) Разработка конструктивных и габаритных параметров стенда с учетом выявленных требований, чтобы обеспечить соответствие функциональным и техническим характеристикам;
- 4) Определение целевого назначения стенда и видов испытаний, которые будут проводиться на нем, чтобы учесть широкий спектр возможных сценариев использования;
- 5) Определение перечня измеряемых параметров и выбор соответствующих типов измерительных преобразователей для точного и достоверного измерения этих параметров во время испытаний;
- 6) Установление требований к вспомогательному оборудованию, необходимому для транспортировки и установки объекта испытания на стенде, чтобы обеспечить удобство и безопасность процесса проведения испытаний.

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

- Расчет объёмно-геометрических и прочностных характеристик вакуумной камеры;
- Расчет системы вакуумирования;
- Расчет системы термостатирования;
- Расчет системы газоснабжения.

Исходные данные:

- Стенд — стационарный, для тепловакуумных испытаний;
- Диапазон давлений $10^5 \dots 10^{-4}$ Па;
- Время подготовки вакуумной части установки — 2 часа;
- Диапазон температур $300 \dots 73$ К;
- Объекты испытаний: космические аппараты с отсеками открытого типа типоразмера малых и сверхмалых.

В качестве объекта испытания примем прототип космического аппарата типа «CubeSat».

2.2 Расчет вакуумной камеры

Вакуумная камера представляет собой устройство, для поддержания давления среды ниже атмосферного в ограниченном объеме, с целью обеспечения заданных условий для реализации испытаний. Общий вид ВК представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 — Общий вид вакуумной камеры

ВК состоит из следующих элементов:

- Цилиндрическая обечайка;
- Плоские днища, выполненные в виде фланцевых соединений;

— Патрубки с штуцерами и фланцевыми соединениями для обеспечения стыковки ВК и ОИ к системам стенда;

— Герметичное смотровое окно, для визуальной регистрации процесса испытаний;

— Опоры ВК.

Все элементы ВК должны быть выполнены из нержавеющей стали.

Критерии выбора материала:

— Широкое применение и относительная дешевизна;

— Материал обладает хорошей прочностью и устойчивостью к деформации.

Полезный объём вакуумной камеры должен быть достаточен для удобства установки и обслуживания ОИ в ВК, при этом, должен быть минимальным для реализации быстрой откачки (2 часа по исходным данным). Соответственно, выбор размеров ВК напрямую зависит от размеров ОИ.

С учетом данных об ОИ примем основные размеры ВК:

Диаметр ВК $D = 500$ мм;

Длина обечайки ВК $L = 1200$ мм.

Тогда полезный объём ВК равен внутреннему объёму обечайки (цилиндра):

$$V_{BK} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times L, \quad (1)$$

$$V_{BK} = \pi \times \left(\frac{0,5}{2}\right)^2 \times 1,2 = 2,236 \text{ м}^3.$$

Произведем сравнительный расчет для выбора оптимального материала для ВК. Наиболее распространенные материалы:

— 16ГС — сталь средней углеродистости. "16" указывает на содержание углерода в промежутке от 0,13% до 0,18%, а "ГС" означает "горячекатаная сталь";

— 12X18H10T — нержавеющая сталь с высоким содержанием хрома (12%), никеля (18%), и титана (0,1%);

— 20X13 — сталь средней углеродистости (0,2-0,25 %), содержащая 20% хрома и 13% никеля, «X» обозначает сталь с высоким содержанием хрома.

Критерии выбора — минимальная толщина b стенки при высоких показателях максимального напряжения σ_e .

Для расчета минимальной толщины стенки резервуара воспользуемся ГОСТ 34233.2-2017. [21] Формула имеет следующий вид:

$$b = \frac{(P \times D \times K_1)}{(2 \times \sigma_n \times K_2)}, \quad (2)$$

где σ_n — предел прочности материала стенки, МПа;

D — диаметр, м;

P — максимальное давление, МПа;

$K1$ — коэффициент, учитывающий распределение напряжений в стенке, равный 1,4 для сферических и 1,6 для цилиндрических;

$K2$ — коэффициент, учитывающий возможность коррозии стенки, равный 0,85 для нержавеющих сталей и 0,7 для углеродистых сталей.

Для материала 20X13:

— $\sigma_n = 160$ МПа;

— $P = 0,5$ МПа;

— $K1 = 1,6$;

— $K2 = 0,85$.

Тогда минимальная толщина стенки ВК будет равна:

$$b = \frac{(0,5 \times 0,5 \times 1,6)}{(2 \times 160 \times 0,85)} = 0,0015 \text{ м} = 1,5 \text{ мм.}$$

Для материала 16ГС:

— $\sigma_n = 150$ МПа;

— $P = 0,5 \text{ МПа}$;

— $K1 = 1,6$;

— $K2 = 0,7$.

Тогда минимальная толщина стенки ВК будет равна:

$$b = \frac{0,5 \times 0,5 \times 1,6}{2 \times 150 \times 0,7} = 0,0019 \text{ м} = 1,9 \text{ мм.}$$

Для материала 12Х18Н10Т:

— $\sigma_n = 180 \text{ МПа}$;

— $P = 0,5 \text{ МПа}$;

— $K1 = 1,6$;

— $K2 = 0,85$.

Тогда минимальная толщина стенки резервуара будет равна:

$$t = \frac{0,5 \times 0,5 \times 1,6}{2 \times 180 \times 0,85} = 1,3 \text{ мм.}$$

Используем коэффициент безопасности равный 2. Тогда толщина стенок:

— Для материала 20КХ13: $t = 1,5 \text{ мм}$;

— Для материала 16ГС: $t = 1,9 \text{ мм}$;

— Для материала 12Х18Н10Т: $t = 1,3 \text{ мм}$.

Произведем расчет напряжений на стенках резервуара по формуле:

$$\sigma_e = \frac{PD}{2b \times S}, \quad (3)$$

где S — коэффициент прочности материала 1,3...1,5.

Коэффициент запаса:

$$K = \sigma_n / \sigma_e. \quad (4)$$

Для материала 20КХ13:

$$\sigma_e = \frac{0,5 \times 0,5}{2 \times 1,5 \times 10^{-3} \times 1,4} = 59,524 \text{ МПа},$$

$$K = \frac{160}{59,524} = 2,688.$$

Для материала 16ГС:

$$\sigma_e = \frac{0,5 \times 0,5}{2 \times 1,9 \times 10^{-3} \times 1,4} = 46,993 \text{ МПа},$$

$$K = \frac{150}{46,993} = 3,192.$$

Для материала 12Х18Н10Т:

$$\sigma_e = \frac{0,5 \times 0,5}{2 \times 1,3 \times 10^{-3} \times 1,4} = 68,681 \text{ МПа},$$

$$K = \frac{180}{68,681} = 2,621.$$

Соответственно, все выбранные материалы имеют достаточный запас прочности. Из технологических соображений, примем материал для ВК 12Х18Н10Т. Подробный расчет на прочность представлен в разделе 2.7.

2.3 Расчет газовых нагрузок вакуумной системы

Скорость удельного газовыделения для конструктивных элементов, выполненных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и резиновых уплотнителей марки 7889:

— для резиновых уплотнителей: $q_{\text{резин.упл.}} = 5 \times 10^{-5} \text{ м}^3 \times \text{Па} / (\text{м}^2 \times \text{с});$

— для нержавеющей стали: $q_{\text{стенок}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \times \text{Па} / (\text{м}^2 \times \text{с});$

— для алюминия (материал ОИ) $q_{\text{ОИ}} = 0,4 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \times \text{Па} / (\text{м}^2 \times \text{с}).$

Расчёт суммарного потока газа:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{газ}}, \quad (5)$$

Определим поток газов $Q_{\text{изд}}$, выделяющихся из изделий:

$$Q_{изд} = q_{ОИ} \times A_{ОИ}, \quad (6)$$

где $A_{ОИ}$ — площадь поверхности ОИ.

Примем максимальный типоразмер объекта испытания и упростим до параллелепипеда тогда:

$$A_{ды} = 2(ab + bc + ac), \quad (7)$$

$$A_{ОИ} = 2 \times (0,255 \times 0,255 + 0,255 \times 0,650 + 0,255 \times 0,650) = 0,397 \text{ м}^2.$$

Тогда поток газов, выделяющихся из изделий:

$$Q_{ОИ} = 0,4 \times 10^{-8} \times 0,397 = 1,588 \times 10^{-9} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру, обычно берется по характеристикам элементов вакуумных систем, а при их отсутствии — равным или несколько большим произведения чувствительности течеискателя на число мест, которые могут стать источником натекания.

Произведём расчёт величины газового потока, через неплотности, в узлах соединения камеры, полагая число мест натекания равным $n=8$.

Осуществляется проверка портативным гелиевым течеискателем с чувствительностью $\gamma = 5 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с}$.

$$Q_{нат} = n \times \gamma, \quad (8)$$

$$Q_{нат} = 8 \times 5 \times 10^{-8} = 4 \times 10^{-7} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с}.$$

Диффузионное газовыделение связано с выделением газов из конструкционных материалов и зависит от материала и его предварительной обработки. Расчёт величины $Q_{газ}$ выделяющихся с поверхностями элементов по формуле:

$$Q_{\text{газ}} = \sum_i A_i \times q_i, \quad (9)$$

где A_i — площадь поверхности i — го элемента, обращённого в ВК;

q_i — скорость удельного газовыделения с поверхности материала при комнатной температуре.

Газовыделение с поверхности вакуумной камеры рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{\text{газ}} = Q_{\text{обеч}} + 2 \times Q_{\text{крыш}} + Q_{\text{резин.упл}} + Q_{\text{платформы}} + Q_{\text{штуц}} + Q_{\text{резин.упл}} + Q_{\text{днища}}. \quad (10)$$

Газовыделение с поверхности холодных элементов вакуумной камеры определяется по следующей формуле:

$$Q_{\text{обеч}} = 2 \times \pi \times r \times h \times q_{\text{обеч}}, \quad (11)$$

где r — радиус вакуумной камеры, м;

h — высота рабочей части вакуумной камеры, м.

Рассчитывается газовыделение с поверхности вакуумной камеры.

$$Q_{\text{обеч}} = 2 \times 3,14 \times 0,25 \times 1,6 \times 1,2 \times 10^{-8} = 6,028 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с}.$$

Газовыделение резинового уплотнителя крышки камеры рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{резин.упл}} = l_{\text{резин.упл}} \times h_{\text{уп}} \times q_{\text{резин.упл}}, \quad (12)$$

где $l_{\text{резин.упл}}$ — длина резинового уплотнителя;

$h_{\text{уп}}$ — толщина уплотнителя крышки.

Рассчитывается газовыделение резинового уплотнителя крышки с учётом того, что $h_{\text{уп}} = 0,005$ м.

$$l_{\text{резин.упл}} = 2 \times \pi \times r, \quad (13)$$

$$Q_{\text{резин упл}} = 2 \times 3,14 \times 0,25 \times 0,005 \times 5 \times 10^{-5} = 7,85 \times 10^{-7} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с}.$$

Газовыделение платформы, штуцеров рассчитываются аналогичным способом.

$$A_{\text{плат}} = 0,5 \times 1,2 \times 1,2 = 0,72 \text{ м}^2;$$

$$Q_{\text{плат}} = 0,72 \times 1,2 \times 10^{-8} = 8,64 \times 10^{-9} \text{ м}^3 \times \text{Па} / \text{с};$$

$$A_{\text{штуцер}} = 2 \times 3,14 \times 0,2 \times 0,1 = 0,126 \text{ м}^2;$$

$$Q_{\text{штуцер}} = 3 \times 0,126 \times 1,2 \times 10^{-8} = 4,536 \times 10^{-9} \text{ м}^3 \text{Па} / \text{с}.$$

Рассчитывается газовыделение с поверхности вакуумной камеры:

$$Q_{\text{газ}} = 6,03 \times 10^{-8} + 7,85 \times 10^{-7} + 8,64 \times 10^{-9} + 4,536 \times 10^{-9} = 8,585 \times 10^{-7} \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}}.$$

2.4 Выбор высоковакуумного насоса

Определяем эффективную быстроту откачки:

$$S_{\text{эф1}} = \frac{Q}{P_1}, \quad (14)$$

$$S_{\text{эф1}} = \frac{9,899 \times 10^{-5}}{10^{-6}} = 0,99 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Определим номинальную быстроту откачки насоса высоковакуумного насоса:

$$S_{\text{н1}} = \frac{Q}{K_{u1} P_1 - P_{\text{нп1}}}, \quad (15)$$

где K_{u1} — коэффициент использования насоса, оптимальное значение $K_{u1} = 0,6$ сверхвысоковакуумных насосов;

$P_{\text{нп1}}$ — предельное остаточное давление насоса, выбираем $P_{\text{нп1}} = 10^{-8} \text{ Па}$.

$$S_{н1} = \frac{9,899 \times 10^{-6}}{0,6 \times 10^{-6} - 10^{-8}} = 16,7779 \text{ м}^3 / \text{с} = 167 \text{ л} / \text{с}.$$

Выбираем турбомолекулярный насос из каталога производителя вакуумных насосов. Безмасляные турбомолекулярные насосы, роторы турбомолекулярных насосов вытачиваются из монолитной заготовки из нержавеющей стали, а в качестве подвесов используются необслуживаемые керамические подшипники с консистентной смазкой. Выбираем EV-650ZF так как данный насос удовлетворяет требованиям по скорости откачки.

Характеристики турбомолекулярного насоса EV-650ZF:

- Номинальная скорость: $0,600 \text{ м}^3 / \text{с}$;
- P запуска ТМН: 160 Па ;
- P предельное: 10^{-6} Па ;
- Вес: 22 кг .

2.5 Выбор форвакуумного насоса

Расчет производится аналогично расчету турбомолекулярного насоса:

$$S_{эф1} = \frac{9,899 \times 10^{-6}}{80} = 0,1237 \times 10^{-6} \text{ л} / \text{с}.$$

Т.к. рабочее давление форвакуумного насоса выбираем по максимальному выпускному давлению турбомолекулярного насоса с коэффициентом запаса $\eta = 2$, соответственно:

$$P_2 = \frac{P_{\text{запуска ТМН}}}{2} = \frac{160}{2} = 80 \text{ Па}.$$

Определим номинальную скорость откачки насоса высоковакуумного насоса:

$$S_{н2} = \frac{Q}{K_{u2} P_2 - P_{np2}}, \quad (16)$$

где K_{u2} — коэффициент использования насоса, оптимальное значение $K_{u2} = 0,8$ сверхвысоковакуумных насосов.

$$S_{н2} = \frac{9,899 \times 10^{-6}}{0,8 \times 80 - 0,5} = 0,156 \times 10^{-6} \frac{м^3}{с} = 0,156 \times 10^{-3} \frac{л}{с}.$$

Выбираем насос для предварительной откачки из каталога производителя вакуумных насосов. Выбираем ВВН 1-12 так как данный насос удовлетворяет требованиям по скорости откачки.

Безмасляные вакуумные насосы ВВН 1-12:

- Скорость откачки: $0,200 \text{ м}^3 / \text{с}$;
- Предельное давление: $0,5 \text{ Па}$;
- Потребляемая мощность: $4,0 \text{ кВт}$;
- Масса: 75 кг .

2.6 Расчет времени откачки вакуумной камеры

Рассчитываем время откачки с помощью различных насосов:

$$t = \frac{V}{S_H} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (17)$$

где V — объем камеры;

S_H — быстрота откачки насоса;

P_1 — давление перед началом откачки, Па ;

P_2 — давление после откачки, Па .

Время откачки на низковакуумном участке рассчитываем по формуле (17):

$$t_{1H} = \frac{1,235}{0,2} \ln \frac{10^5}{80} = 44,003 \text{ мин.}$$

Время откачки на высоковакуумном участке:

$$t_{2H} = \frac{1,235}{0,6} \ln \frac{80}{10^{-4}} = 28,786 \text{ мин.}$$

2.7 Расчет криогенной системы

Для расчета криогенной системы стенда необходимо учесть следующие аспекты: геометрию вакуумной камеры, теплофизические процессы, свойства материалов, тепловые нагрузки, характеристики криогенной системы с жидким

азотом, а также требования к поддержанию температуры в течение 1 часа при давлении 10^{-4} Па.

Исходные данные:

- Длина ВК: $L = 1,2$ м;
- Диаметр ВК: $D = 0,5$ м;
- Материал ВК: сталь 12Х18Н10Т (нержавеющая сталь);
- Давление: $P = 10^{-4}$ Па;
- Время испытаний до 1 часа;
- Температура испытания $T_{исп} = 100$ К.

Теплообмен во внутренней полости вакуумной камеры будет происходить при помощи криопанели. По трубопроводу криопанели протекает теплоноситель — жидкий азот.

Параметры жидкого азота:

- Температура кипения $T_{кип} = 77$ К при $P_{атм}$;
- Удельная теплота парообразования $r = 199$ кДж / кг;
- Удельная теплоемкость $c_{N_{2,ж}} = 2,04$ кДж / кгК;
- Плотность $\rho = 808$ кг / м³.

Криопанель должна эффективно поглощать тепловое излучение от внутренних поверхностей камеры и испытуемого объекта. Предположим, что криопанель представляет собой цилиндрическую оболочку, расположенную вдоль внутренней поверхности камеры, с радиусом $R_{панель} = 0,22$ м (для размещения внутри камеры с учетом зазора и испытуемого объекта).

Площадь поверхности криопанели:

$$S_{пан} = 2\pi R_{панель} L, \tag{18}$$

$$S_{пан} = 2 \times \pi \times 0,22 \times 1,2 = 1,66 \text{ м}^2.$$

Материал криопанели — медь (высокая теплопроводность), с покрытием, поглощающим излучение (черное анодирование, $\varepsilon = 0,9$).

Тепловые нагрузки на криопанель складываются из:

- 1) Теплового излучения от стенок камеры и испытуемого объекта;
- 2) Кондуктивных теплопритоков через крепления и опоры;
- 3) Остаточного газового теплопереноса (минимален при $P=10^{-4}$ Па).

Температура внутренней поверхности камеры перед началом охлаждения принимается равной комнатной $T_{cm} = 300$ К .

Закон Стефана-Больцмана для теплового потока:

$$q_{изл} = \varepsilon \sigma S (T_{cm}^4 - T_{пан}^4), \quad (19)$$

где:

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт / (м² К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана;

$$q_{изл} = 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 1,66 \times (300^4 - 77^4) = 650 \text{ Вт}.$$

Кондуктивные теплопритоки через крепления зависят от конструкции. Предположим, что криопанель закреплена на тепловых мостиках из материала с низкой теплопроводностью (например, стеклотекстолит) с суммарной площадью сечения $A_{кр} = 0,001$ м² и длиной $L_{кр} = 0,05$ м. Теплопроводность стеклотекстолита: $\lambda = 0,2$ Вт / м² К.

$$q_{конд} = \lambda A_{кр} \frac{\Delta T}{L_{кр}}, \quad (20)$$

$$q_{конд} = 0,2 \times 0,001 \times \frac{300 - 77}{0,05} = 0,89 \text{ Вт}.$$

Газовый теплоперенос, при рабочем давлении, через остаточный газ незначителен и составляет менее 0,1 Вт (по формулам молекулярной кинетики газа), поэтому им пренебрегаем.

Общая тепловая нагрузка:

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}}, \quad (21)$$

$$q_{\text{общ}} = 650 + 0,89 = 651 \text{ Вт}.$$

Жидкий азот поглощает тепло за счет:

1) Нагрева от $T_{\text{кип}} = 77 \text{ К}$ до температуры выхода (предположим, $T_{\text{вых}} = 80 \text{ К}$);

2) Испарения при $T_{\text{кип}}$.

Теплота, поглощаемая жидким азотом:

$$Q = m \times (c \times \Delta T + r). \quad (22)$$

Секундно-массовый расход жидкого азота:

$$\dot{m} = \frac{q_{\text{общ}}}{Q_{\text{кз}}}, \quad (23)$$

$$Q_{\text{кз}} = 1 \times (2,04 \times 10^3 \times (80 - 77) + 199 \times 10^3) = 205,110 \times 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$\dot{m} = \frac{651}{205,110 \times 10^3} = 0,00317 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 3,17 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Общая масса азота за 1 час:

$$m_{\text{общ}} = \dot{m} \times t, \quad (24)$$

$$m_{\text{общ}} = 0,00317 \times 3600 = 11,4 \text{ кг.}$$

Объемный расход:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}, \quad (25)$$

$$\dot{V} = \frac{0,00317}{808} = 3,92 \times 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 3,92 \frac{\text{л}}{\text{ч}}.$$

Общий объем:

$$V_{\text{общ}} = \dot{V} \times t, \quad (26)$$

$$V_{\text{общ}} = 3,92 \times 3600 = 14,1 \text{ л.}$$

В расчете не учитываются расходы жидкого азота при хранении.

Конструкция криопанели — трубчатая криопанель, состоящая из медных трубок диаметром $d = 10 \text{ мм}$, через которые циркулирует жидкий азот. Для покрытия площади $S_{\text{пан}} = 1,66 \text{ м}^2$ предположим спиральную или змеевидную конфигурацию с общей длиной трубок $L_{\text{труб}} = 50 \text{ м}$.

Скорость потока азота:

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{\text{труб}}}, \quad (27)$$

$$A_{\text{труб}} = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2, \quad (28)$$

$$v = \frac{3,92 \times 10^{-6}}{\pi \times 0,005^2} = 0,05 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Число Рейнольдса для проверки режима течения:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (29)$$

$\mu = 1,6 \times 10^{-4} \text{ Па} \times \text{с}$ — вязкость жидкого азота.

$$Re = \frac{808 \times 0,05 \times 0,01}{1,6 \times 10^{-4}} = 2525.$$

Поток турбулентный ($Re > 2300$), что благоприятно для теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по критерию Нуссельта для турбулентного потока в трубах (формула Диттеса-Бельтера):

$$Nu_u = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4}, \quad (30)$$

Число Прандтля для жидкого азота $Pr = 2$.

Тогда:

$$Nu_u = 0,023 \times 2525^{0,8} \times 2^{0,4} = 13,2.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda_{\text{жид}}}{d}, \quad (31)$$

Теплопроводность азота $\lambda_{\text{жид}} = 0,14 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{К})$,

$$\alpha = \frac{13,2 \times 0,14}{0,01} = 185 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Итоговые параметры системы:

- Расход жидкого азота 3,92 л/ч, общий объем за 1 час — 14,1 л;
- Криопанель: медные трубки диаметром 10 мм, общей длиной ~50 м, площадь поверхности ~1,66 м²;
- Тепловая нагрузка ~651 Вт, преимущественно за счет теплового излучения;

— Температура поддерживается на уровне $\sim 77\text{—}100\text{ K}$ в зависимости от теплообмена и требований испытаний.

2.8 Расчет на прочность элементов конструкции

Прочность — это свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Прочность подразделяют на статическую, под действием постоянных нагрузок, динамическую и усталостную (выносливость), имеющую место при действии циклических переменных нагрузок.

Для конструкций различают общую прочность — способность всей конструкции выдерживать нагрузки без разрушения, и местную — та же способность отдельных узлов, деталей, соединений.

На рисунке 4 условно изображена цилиндрическая обечайка. Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

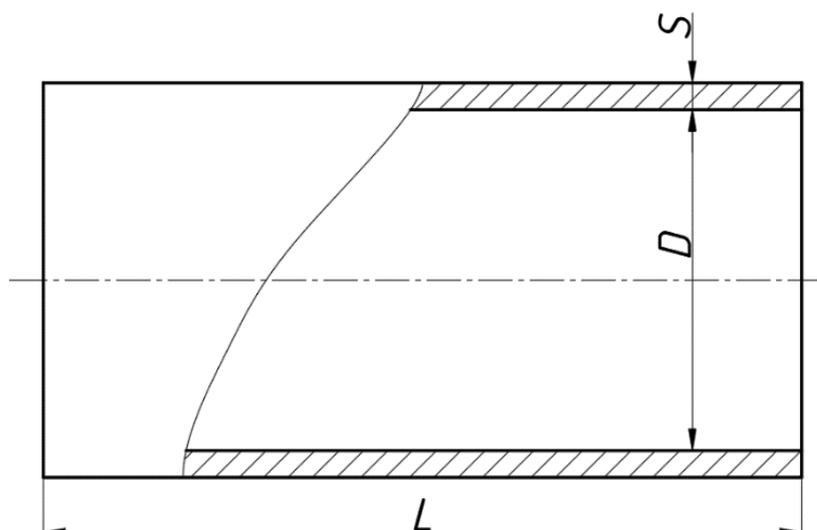


Рисунок 4 — Цилиндрическая обечайка

Таблица 1 — Исходные данные к расчету

Параметр	Значение
Материал:	12X18H10T
Внутр. диаметр, D :	$0,5 \cdot 10^3\text{ мм}$
Толщина стенки, s :	16 мм

Параметр	Значение
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c_1 :	2 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c_2 :	0,8 мм
Прибавка технологическая, c_3 :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c :	2.8 мм
Длина обечайки, L :	$3,2 \cdot 10^3$ мм
Коэффициенты прочности сварных швов, φ_p, φ_m :	1
Расчётная температура, T :	1200 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление, p :	0,1 МПа
Модуль продольной упругости для материала 12X18Н10Т, E :	2×10^5 МПа

Допускаемое внутреннее давление определяется из условия:

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \}, \quad (32)$$

где $[p]_1$ — допускаемое внутреннее давление из условия прочности всей обечайки;

$[p]_2$ — допускаемое внутреннее давление из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жёсткости.

$$[p]_1 = \frac{2 \times [\sigma] \times \varphi_p \times (s - c) + \left(\frac{A_{k1}}{1} \times [\sigma]_{K1} \times \varphi_{K1} \right)^2}{D + (s - c)}, \quad (33)$$

где A_{ki} — площадь сечения i -го элемента m^2 ;

$[\sigma] = 184$ МПа — допускаемые напряжения для материала 12X18Н10Т.

$$[p]_2 = \frac{2 \times [\sigma] \times \varphi_p \times (s - c)}{D + (s - c)} \times \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\varphi_T \times \lambda_{II}^2}{\varphi_p}}, \quad (34)$$

где λ_{II}^2 — геометрический параметр для цилиндрической обечайки.

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D \times (s - c)}, \quad (35)$$

$$[p]_1 = \frac{2 \times 184 \times 1 \times (16 - 2,8) + (0,9 \times 10^{-3} \times 184 \times 1,3)^2}{0,5 \times 10^3 + 16 - 2,8} = 9,465 \text{ МПа},$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{(1,284 \times 10^3)^2}{0,5 \times 10^3 \times (16 - 2,8)} = 249,796,$$

$$[p]_2 = \frac{2 \times 184 \times 1 \times (16 - 2,8)}{0,5 \times 10^3 + (16 - 2,8)} \times \frac{2 + 249,796}{1 + \frac{1 \times 249,796}{1}} = 9,503 \text{ МПа}.$$

Допускаемое внутреннее давление:

$$[p] = \min \{ [p]_1; [p]_2 \} = \min \{ 2,176; 2,077 \} = 2,077 \text{ МПа}.$$

Условие прочности выполняется при:

$$[p] \geq [p_{атм}], \quad (36)$$

$$9,503 \text{ МПа} \geq 0,1 \text{ МПа}.$$

Заключение: условие прочности выполнено.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \times \left(\frac{s - c}{s} - 0,8 \right) \times \sqrt{D_p \times (s - c)}, \quad (37)$$

$$d_0 = 2 \times \left(\frac{16 - 2,8}{16} - 0,8 \right) \times \sqrt{0,5 \times 10^3 \times (16 - 2,8)} = 4,062 \text{ мм.}$$

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \times \sqrt{D \times (s - c)}, \quad (38)$$

$$b_0 = 2 \times \sqrt{0,5 \times 10^3 \times (16 - 2,8)} = 162,481 \text{ мм.}$$

Примем $b_0 = 250$ мм соответственно ГОСТ 24755-89. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий [15].

2.9 Выбор вакуумметров

Степени вакуума характеризуются соотношением количества столкновений молекул замкнутой среды (внутри вакуумной системы) между собой K_m к количеству столкновений молекул среды с стенками вакуумной системы K_c .

- Для низкого вакуума справедливо соотношение $K_m \gg K_c$;
- Для среднего вакуума $K_m \approx K_c$;
- Для высокого вакуума $K_m < K_c$;
- Для сверхвысокого вакуума $K_c \approx K_m \approx 0$.

На рисунке 5 представлена схема диапазонов давлений для степеней вакуума.

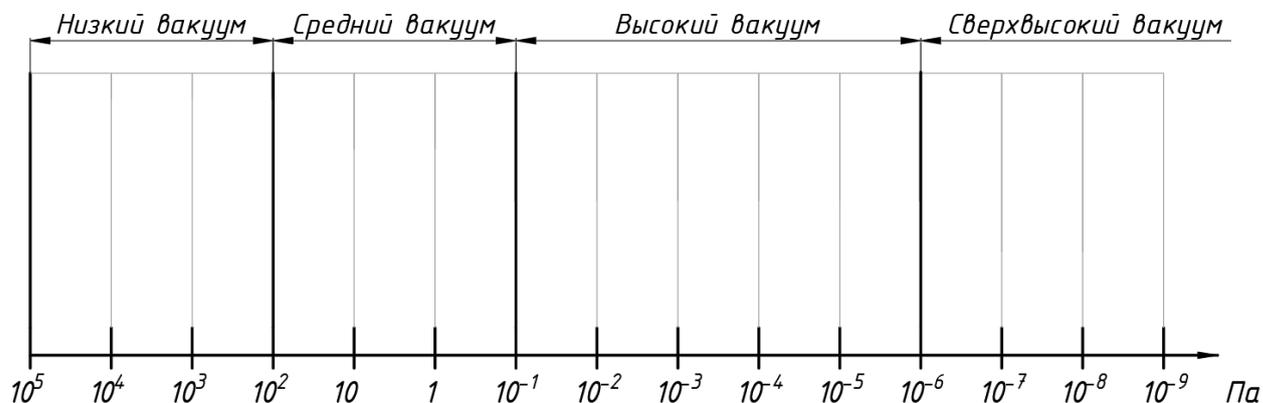


Рисунок 5 — Диапазоны степеней вакуума

Вакууметр — устройство, предназначенное для визуального определения глубины вакуума (остаточного давления) в замкнутой системе.

Наиболее популярные виды вакууметров по принципу действия:

- Деформационные;
- Тепловые;
- Конвекционные;
- Ионизационные;
- Магнитные.

На различных степенях вакуума следует применять различные виды вакууметров из-за особенностей их принципов работы. Например, деформационные вакууметры эффективны только при высоких давлениях, в то время как ионизационные приборы работают только в условиях высокого вакуума. Точность измерений зависит от метода: некоторые приборы (например, тепловые) дают погрешности в зависимости от состава и количества газа. Устойчивость к внешним факторам: при высоком вакууме критичны загрязнения, что делает ионизационные приборы менее универсальными.

Рациональный выбор вакуумметров с учётом их особенностей и области применения обеспечивает точность измерений, надёжность экспериментов и экономичность процесса.

На рисунке 6 представлены диапазоны рабочих давлений некоторых видов вакууметров.

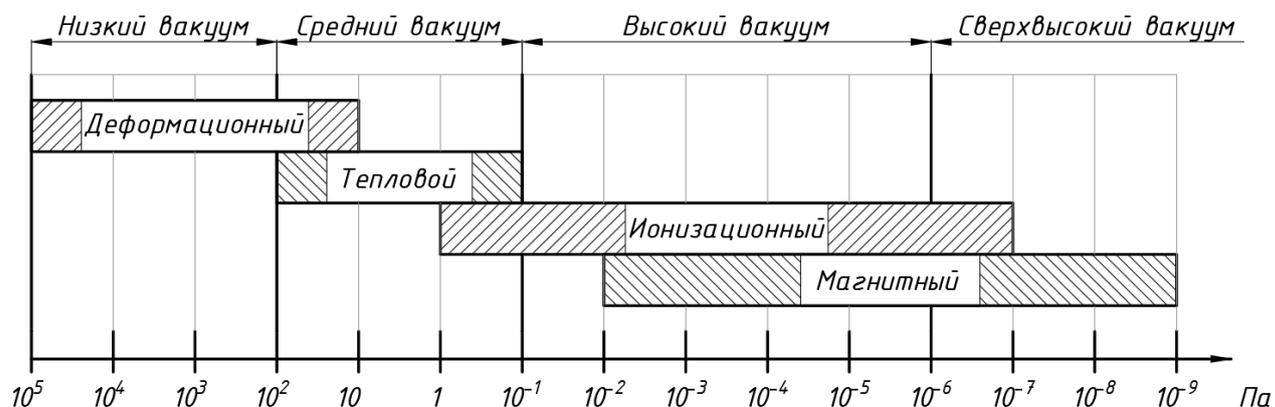


Рисунок 6 — Диапазоны рабочих давлений вакууметров

Основными критериями выбора вакуумметра следует считать его надежность в эксплуатации, ремонтпригодность и доступность измерительных преобразователей.

Рассмотрим подробнее принцип работы вакуумметров и их модели.

2.9.1 Вакуумметр деформационный

Показания вакуумметров трубчатого типа (рисунок 7) формируются на основе измерения деформации трубки, вызванной изменением давления. Стандартные манометры, устанавливаемые на компрессорах и газовых баллонах, работают по принципу измерения избыточного давления относительно атмосферного, в диапазоне до нескольких тысяч паскалей. Однако их чувствительность при измерении вакуумного давления крайне низка.

В данном случае вакуумметр выполнен в виде тонкостенной трубки, изогнутой по кругу, с открытым концом, соединённым с вакуумной системой. Деформация трубки, вызванная атмосферным давлением, преобразуется стрелочным механизмом в линейную индикацию давления, которая не зависит от типа газа. Современные вакуумметры от различных производителей обеспечивают измерение давления до 101 Па . Однако изменения атмосферного давления могут вносить погрешности в результаты измерений.

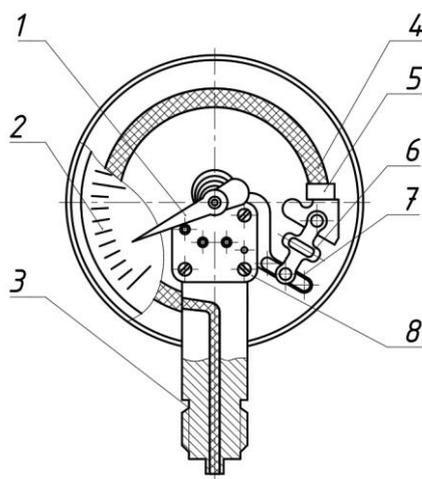


Рисунок 7 — Вакуумметр деформационный

- 1 — Стрелка указательная; 2 — Циферблат; 3 — Штуцер со штоком;
4 — Трубка Бурдона; 5 — Заглушка; 6 — Тяга; 7 — Квадрант;
8 — Пружинный механизм.

Трубчатые вакуумметры отличаются прочностью, низкой стоимостью и простотой эксплуатации. Материалы, используемые для изготовления трубок, могут быть выбраны с учётом устойчивости к воздействию коррозионных паров. Для устранения ошибок, связанных с изменением атмосферного давления, разработаны компенсированные модели трубчатых вакуумметров и вакуумметров Бурдона.

2.9.2 Современные комбинированные вакуумметры

Современные вакуумные датчики, работающие на основе описанных ранее принципов, изготавливаются как в стеклянном, так и в металлическом исполнении. В случае металлических конструкций такие датчики могут монтироваться на соответствующих фланцах или оснащаться переходом металл-стекло, что позволяет их приварку к стеклянным вакуумным системам. Некоторые варианты конструктивных решений представлены на рисунке 8.

Одним из ключевых преимуществ современных вакуумметров является их интеграция с управляющими контроллерами, а в некоторых моделях также с дисплеями. Контроллеры, как правило, включают программируемый модуль для преобразования сигнала датчика в линейный выходной сигнал. В качестве примера, рисунок 9 демонстрирует выходную характеристику такого устройства.



Рисунок 8 — Комбинированный вакуумметр

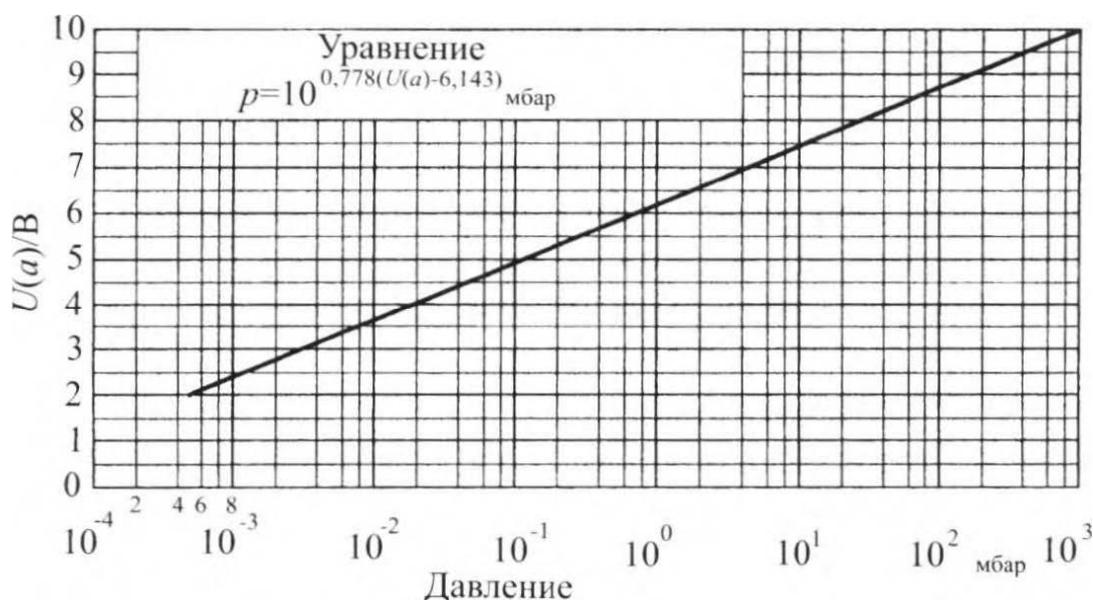


Рисунок 9 — Выходная характеристика вакуумметра сопротивления

Вакуумметры, содержащие на одном фланце один тип датчика, имеют очень узкую специализацию и наиболее удобны для промышленных и полупромышленных установок.

В последние годы все большее распространение получают конструкции, совмещающие два типа вакуумметров — низковакуумного и высоковакуумного, например электронного и ионизационного, вакуумметра сопротивления или вакуумметра сопротивления и инверсно-магнетронного и т. д.

В таких конструкциях за счет встроенного контроллера осуществляется переключение внутренних датчиков и выравнивание их выходных характеристик.

Современные индикаторные блоки, как правило, могут быть подсоединены к нескольким датчикам и контролирующей/управляющей ЭВМ. Это позволяет с одного пульта управлять всеми вакуумными измерениями в сравнительно простых вакуумных установках и существенно сократить их количество в больших системах.

Следует сказать несколько слов об эксплуатации вакуумметров. Они, как правило, надежно работают при правильной эксплуатации, однако необходимо проводить ежегодную проверку показаний вакуумметров.

На практике проверку можно производить путем сравнения показаний с показаниями заведомо исправного вакуумметра. Поэтому на крупном производстве (два и более откачных поста) желательно иметь образцовый вакуумметр. Запасной же датчик вакуумметра должен быть в любой мастерской. Проверку очень просто производить абсолютным жидкостным манометром Мак-Леода.

2.9.3 Сравнение комбинированных вакуумметров

Комбинированный вакуумметр Байярда-Альперта с датчиком Пирани компании INFICON, BPG402-S (представлен на рисунке 10), реализует функции двух вакуумметров в одном компактном модуле с диапазоном измерения от атмосферного давления до 5×10^{-6} Па. Комбинирование двух технологий уменьшает сложность монтажа, настройки и интеграции. Высокорентабельный прибор BPG402-S с двумя иридиевыми катодами, покрытыми оксидом иттрия — это оптимальный выбор для выполнения регулярных измерений экономичным способом в диапазоне от давления в технологической среде до базового давления. чувствительные элементы с хранящимися в устройстве данными калибровки гарантируют высокую воспроизводимость результатов измерений при замене датчиков.



Рисунок 10 — Вакуумметр Байярда-Альперта с датчиком Пирани BPG402-S

Преимущества:

- Широкий диапазон измерения от 5×10^{-6} Па до атмосферного давления;
- Превосходная повторяемость показаний (отклонение 5 %) в диапазоне давления технологической среды 10^{-2} — 10^{-4} Па ;
- Блокировка Пирани защищает катод от преждевременного перегорания;
- Два долговечных иридиевых катода, покрытых оксидом иттрия;
- Дополнительно: графический дисплей и интерфейс промышленной сети;
- Автоматическая регулировка Пирани для высокого вакуума уменьшает вмешательство оператора;
- Легко заменяемый чувствительный элемент с хранящимися в устройстве данными калибровки гарантирует высокую воспроизводимость результатов измерений;
- Соответствует положениям директивы (RoHS), ограничивающей содержание вредных веществ.

Напряжение на аналоговом выходе прибора пересчитывается в величину остаточного давления по формуле (зависимость выходного сигнала вакуумметра от давления приведены в таблице 2):

$$P = 10^{1,038U_a - 7,91}, \quad (39)$$

где U_a — напряжение выходного сигнала, В;

P — давление в вакуумной камере, Па.

Таблица 2 — Зависимость выходного сигнала вакуумметра от давления

Напряжение выходного сигнала, В	Давление, Па	Напряжение выходного сигнала,	Давление, Па
1	$1,465 \times 10^{-6}$	9	$2,701 \times 10^1$
2	$1,599 \times 10^{-5}$	10	$2,951 \times 10^2$

Напряжение выходного сигнала, В	Давление, Па	Напряжение выходного сигнала,	Давление, Па
3	$1,745 \times 10^{-4}$	11	$3,221 \times 10^3$
4	$1,905 \times 10^{-3}$	12	$3,516 \times 10^4$
5	$2,080 \times 10^{-2}$	13	$3,837 \times 10^5$
6	$2,269 \times 10^{-1}$	-	-

Уравнения, приведенные для перевода выходного сигнала, корректны только для азота и воздуха.[6] В таблице 3 указаны поправочные коэффициенты для различных газов. Для остальных газов измеренное давление необходимо умножить на поправочный коэффициент, зависящий от рода газа:

$$P_{\text{газ}} = P_{\text{воздух}} \times R. \quad (40)$$

Таблица 3 — Поправочные коэффициенты для различных газов

Газ	Коэффициент пересчета, R
Гелий	4,50
Аргон	1,30
Неон	0,27
Ксенон	0,30
Водород	0,43
Кислород	0,85

Инверсно-магнетронные вакуумметры с датчиком Пирани MPG400 от компании INFICON (представлен на рисунке 11) измеряют давление в диапазоне от атмосферного давления до 5×10^{-7} Па. Комбинация технологий в одном компактном модуле с одним выходным аналоговым логарифмическим сигналом существенно упрощает установку, настройку и интеграцию.



Рисунок 11 — Инверсно-магнетронный вакуумметр с датчиком Пирани
MPG400

Преимущества:

- Комбинированный вакуумметр: инверсно-магнетронный датчик и датчик Пирани;
- Широкий диапазон измерения от атмосферного давления до 5×10^{-7} Па и отсутствует перегораемая нить накала;
- Легкая очистка;
- Вакуумный ввод с металлическим уплотнением или уплотнением из фторкаучука;
- Выходной аналоговый логарифмический сигнал.

В таких конструкциях за счет встроенного контроллера осуществляется переключение внутренних датчиков и выравнивание их выходных характеристик. При работе без контроллера для перевода выходного сигнала в давление используются следующие уравнения (зависимость выходного сигнала вакуумметра от давления приведены в таблице 4):

$$P = 10^{0,824(U_a - 9,387)} \quad (41)$$

Таблица 4 — Зависимость выходного сигнала вакуумметра от давления

Напряжение выходного сигнала, В	Давление, Па	Напряжение выходного сигнала, В	Давление, Па
0,1	$0,222 \times 10^{-7}$	8	$0,720 \times 10^{-1}$
1	$1,227 \times 10^{-7}$	9	$0,480 \times 10^0$
2	$8,187 \times 10^{-7}$	10	$0,320 \times 10^1$
3	$5,458 \times 10^{-6}$	11	$0,213 \times 10^2$
4	$3,640 \times 10^{-5}$	12	$0,142 \times 10^3$
5	$2,427 \times 10^{-4}$	13	$0,948 \times 10^3$
6	$1,618 \times 10^{-3}$	14	$0,632 \times 10^4$
7	$1,079 \times 10^{-2}$	15	$0,421 \times 10^5$

Уравнения, приведенные для перевода выходного сигнала, корректны только для азота и воздуха. Для остальных газов измеренное давление необходимо умножить на поправочный коэффициент (указаны в таблице 5), зависящий от рода газа.[6]

$$P_{газ} = P_{воздух} \times R. \quad (42)$$

Таблица 5 — Поправочные коэффициенты для различных газов

Газ	Коэффициент пересчета, R
Гелий	5,7
Аргон	0,75
Неон	3,3
Криптон	0,5
Ксенон	0,35
Водород	2,4
Кислород	1
Оксид углерода CO	1,15
Диоксид углерода CO ₂	0,7

Сведем основные показатели в общую таблицу сравнения 6.

Таблица 6 — Сравнение характеристик комбинированных вакуумметров

Характеристика	Вакуумметр Байярда-Альперта с датчиком Пирани	Инверсно-магнетронный вакуумметр с датчиком Пирани
Диапазон давлений, <i>Па</i>	до 5×10^{-6}	до 5×10^{-7}
Точность измерения (низкий вакуум), %	<30% от показаний	<20% от показаний
Точность измерений (средний вакуум), %	<5% от показаний	<12% от показаний
Повторяемость, %	5% от показаний	8% от показаний
Различные газы	Да	Да

В результате сравнения, установлено, что вакуумметр Байярда-Альперта с датчиком Пирани является наиболее предпочтительным для данного стенда.

3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Стенд для проведения тепловакуумных испытаний для исследования воздействия криогенных температур на космические аппараты открытого типа — сложная техническая система, состоящая из подсистем:

- Вакуумная камера;
- Система вакуумирования;
- Система термостатирования;
- Система телеметрии.

Рассмотрим каждую систему по отдельности.

Вакуумная камера — это герметичный сосуд, предназначенный для создания и поддержания среды с низким давлением (вакуумом), то есть практически полного отсутствия воздуха или других газов.

Корпус вакуумной камеры выполнен из коррозионно-стойкой жаропрочной стали 12Х18Н10Т с толщиной стенки 18,8 мм. Оболочка камеры подкреплена поперечно силовым набором и установлена на седловую опору. Крышки вакуумной камеры — плоские, представляют собой фланцевое соединение с высоковакуумными резиновыми прокладками. Длина обечайки вакуумной камеры 1,2 м, внутренний диаметр 0,5 м.

Вакуумная камера оснащена:

- фальшполом (стапель), выполненным в виде рамно-ферменной конструкции. Фальшпол оснащен техническими отверстиями для жесткого закрепления подложки, на которой установлен ОИ;
- обзорным герметичным стеклом, установленным во фланцевом КФ исполнении;
- ферменно-рамным стапелем для установки и удержания плазматрона;
- комбинированным вакуумметром Баярда-Альперта с элементом пирами.

Система вакуумирования обеспечивает получение в вакуумной камере рабочего давления и поддержания этого давления при потоке газоотделения и натекания от объекта. Она состоит:

- десублиматора;
- форвакуумного насоса;
- турбомолекулярного высоковакуумного насоса;
- трубопроводов, затворов, ловушек;
- контрольно-измерительных приборов;
- системы автоматики.

Общий вид системы представлен на рисунке 12

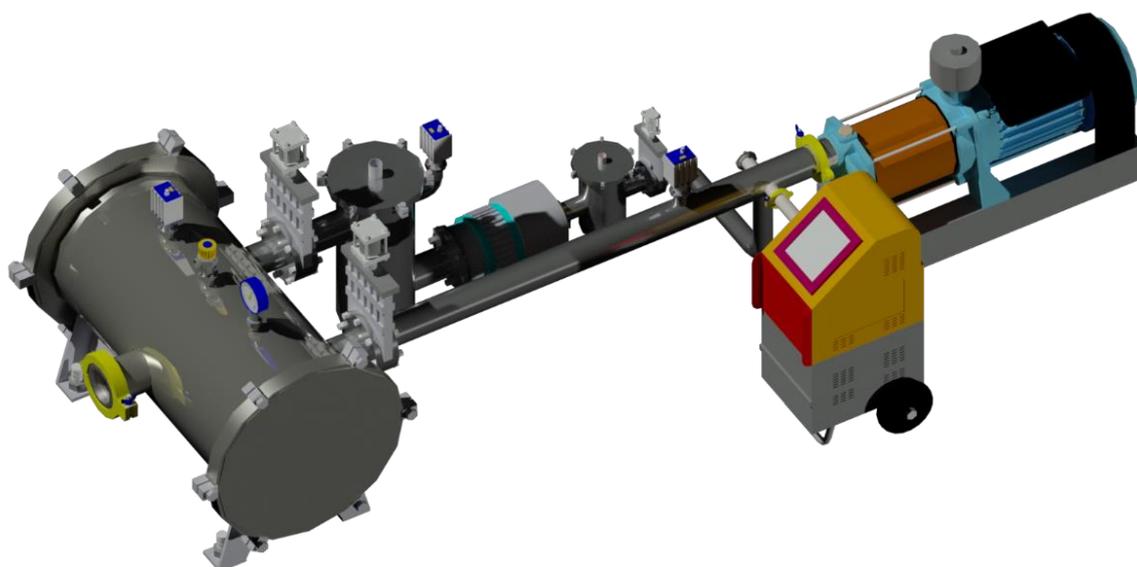


Рисунок 12 — Общий вид вакуумной системы

Система термостатирования предназначена для создания и поддержания криогенных температур внутри вакуумной камеры, имитирующих условия космического пространства. Основным элементом системы является криогенная панель, охлаждаемая жидким азотом, которая выполняет функцию радиатора для поглощения теплового излучения от стенок камеры и испытуемого объекта.

— Криопанель представляет собой трубчатую конструкцию из медных трубок диаметром 10 мм, общей длиной около 50 м, расположенных в виде спирали или змеевика вдоль внутренней поверхности камеры. Для повышения

эффективности теплопоглощения панель покрыта материалом с высоким коэффициентом излучения.

— Рабочая среда — жидкий азот. Азот циркулирует через трубки криопанели, поглощая тепло за счет нагрева и испарения;

— Тепловая нагрузка: суммарная тепловая нагрузка на криопанель составляет около 651 Вт;

— Температурный режим: криопанель поддерживает температуру в диапазоне (77—100 К) в зависимости от условий теплообмена и требований испытаний.

Система телеметрии вакуумной камеры включает в себя комплекс оборудования для мониторинга и контроля параметров внутри камеры в реальном времени. Основу системы составляют датчики температуры, которые обеспечивают точное измерение и контроль тепловых условий, важных для стабильной работы камеры и проведения процессов.

Для определения уровня вакуума используются вакуумметры Баярда-Альперта, дополненные элементами Пирани. Такая комбинация позволяет эффективно измерять давление в широком диапазоне, начиная от низкого вакуума до высокого. Вакуумметры обеспечивают высокую точность и стабильность измерений, что критично для научных и промышленных приложений.

Контроль герметичности системы осуществляется с помощью гелиевого течеискателя, который представляет собой масс-спектрометр (рисунок 13). Он способен обнаруживать утечки даже на микроскопическом уровне, используя гелий в качестве индикаторного газа. Этот метод позволяет своевременно выявлять и устранять проблемы с герметичностью, что гарантирует надежность вакуумной камеры в эксплуатации.

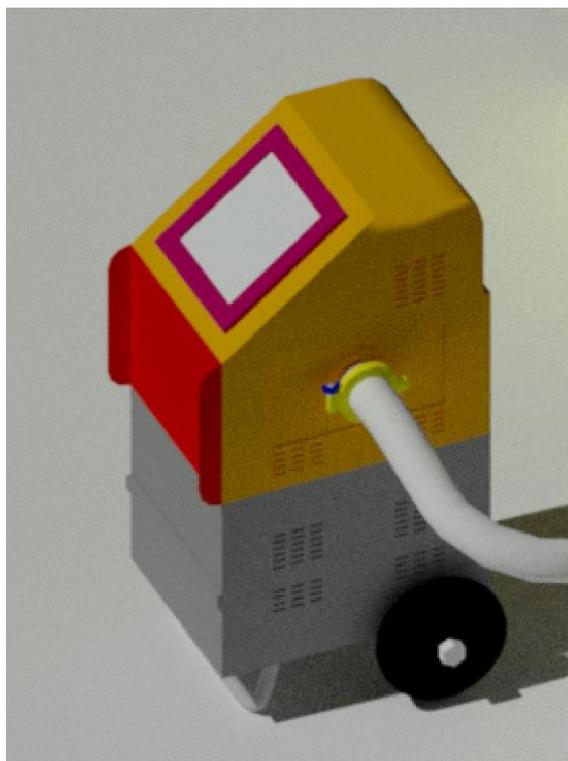


Рисунок 13 — Общий вид масс-спектрометра

Все параметры собираются и анализируются центральной системой управления, что обеспечивает точный контроль над процессами и возможность оперативного реагирования на изменения условий внутри камеры.

4 РАЗРАБОТКА ЦИКЛОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ

Технологический процесс представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, начиная с получения исходных данных и заканчивая достижением требуемого результата. Каждый технологический процесс можно считать частью более сложного процесса, который состоит из более простых, вплоть до элементарных технологических процессов.

Элементарный процесс, или операция, является наименьшей неделимой единицей технологического процесса, сохраняющей все ключевые признаки применяемого метода. Это этап, дальнейшее разбиение которого приводит к потере основных характеристик технологии. Как правило, каждую операцию выполняет один сотрудник на одном рабочем месте.

Технологические процессы включают в себя операции, которые, в свою очередь, состоят из технологических переходов. Технологический переход — это законченный этап операции, выполняемый с использованием одного и того же оборудования и инструментов.

Компоненты технологического процесса представлены на рисунке 14.

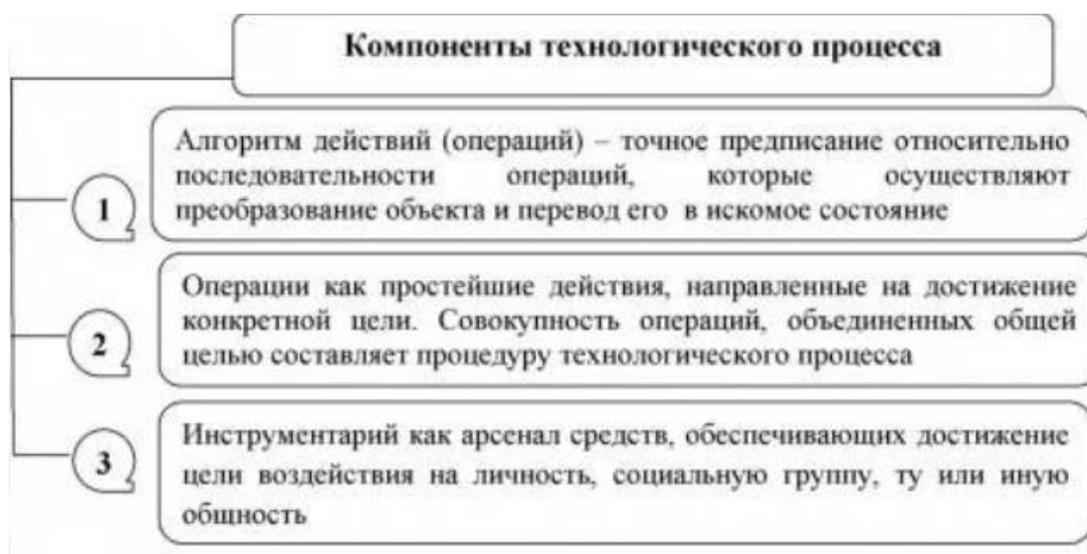


Рисунок 14 — Компоненты технологического процесса

Дополнительные элементы включают вспомогательные переходы, которые представляют собой завершенные части технологической операции,

включающие в себя действия человека и/или оборудования, не сопровождающиеся изменением свойств предметов труда, но необходимые для выполнения технологического перехода.

Для реализации процесса производства необходимо использование совокупности орудий производства, которые называют "средствами производственного оснащения".

Ключевым условием успешного проведения технологических процессов является наличие тщательно разработанной технической документации, включающей конструкторскую и технологическую.

Принципиальная схема циклограммы, описывающей технологический процесс представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 — Принципиальная схема циклограммы

Исходными данными к технологическому процессу проведения испытания являются:

- Система хранения и выдачи $N_{2ж}$ проверена, заправлена и к работе готова;
- Система вакуумирования проверена и к работе готова;

- Система газоснабжения проверена и к работе готова;
- Вакуумная камера вскрыта, проверена и к работе готова;
- ОИ распакован, осмотрен. На ОИ установлены датчики температуры.

Подготовительные операции:

- Включение видеорегистрации процесса испытания;
- Установка ОИ на ступеньку станда в ВК;
- Закрытие технологического отверстия ВК;
- Проверка герметичности ВК;
- Готовность станда к испытаниям.

Основные операции:

- Подача азота на азотные ловушки
- Форвакуумная откачка;
- Откачка среднего вакуума;
- Высоковакуумная откачка;
- Захолаживание магистралей криопанелей;
- Достижение заданного уровня температуры;
- Проведение испытаний согласно циклограмме;
- Регистрация параметров.

Заключительные операции:

- Отогрев станда;
- Разгерметизация системы;
- Вскрытие ВК;
- Внешний осмотр ОИ;
- Демонтаж ОИ;
- Приведение систем станда в исходное состояние;
- Составление акта испытания.

Циклограмма подготовительных, основных и заключительных операций тепловакуумных испытаний представлена в приложении Б.

5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕНДА

5.1 Введение

Настоящий раздел посвящен обеспечению безопасности производства при эксплуатации стенда для проведения тепловакуумных испытаний космических аппаратов открытого типа. Стенд является частью монтажно-испытательного комплекса (МИК), где ему выделено специальное место, а рабочее место оператора расположено вблизи испытательной зоны. Основное внимание уделяется оценке безопасности при подготовительных операциях (раздел 4) и анализу условий труда оператора.

Стенд включает вакуумную камеру, системы вакуумирования, криогенную систему с жидким азотом и телеметрическую систему. Основные риски связаны с криогенными (холодовые ожоги, утечки азота), вакуумными (разгерметизация) и электрическими (высокое напряжение) факторами.

Характеристика рабочего места и производственного процесса:

— Рабочее место (РМ) оператора стенда для тепловакуумных испытаний, оснащенное пультом управления, персональным компьютером (ПЭВМ) и измерительной аппаратурой;

— Вид работ — управление процессом испытаний, контроль параметров (давление, температура), регистрация данных через телеметрическую систему;

— Помещение под стенд размером 10 м (длина) × 6 м (ширина) × 4 м (высота), с одним рабочим местом оператора. В помещении расположена вакуумная камера, криогенная система и вспомогательное оборудование. Имеется приточно-вытяжная вентиляция;

Цель раздела — разработка мер по минимизации рисков для персонала, оборудования и окружающей среды на основе нормативных документов.

5.2 Анализ условий труда

Анализ условий труда оператора проводится в соответствии с Приказом Минтруда № 817н и включает оценку санитарно-гигиенических,

эргономических и психофизиологических факторов. Условия труда в рабочем помещении оператора классифицируются по классам (от 1 — оптимальный до 4 — опасный).

5.2.1 Микроклимат

Микроклимат — это совокупность климатических параметров окружающей среды, таких как температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение, которые влияют на комфорт, самочувствие и работоспособность человека в процессе выполнения профессиональных задач.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88, для категории работ Ia (лёгкие физические) оптимальные параметры микроклимата:

— Температура воздуха: 22—24 °C (теплое время года), 20—22 °C (холодное время года);

— Относительная влажность: 40—60 %;

— Скорость движения воздуха: $\leq 0,2$ м/с.

Фактические параметры:

— Температура воздуха: 23 °C (холодное время), 26 °C (теплое время);

— Относительная влажность: 50 %;

— Скорость движения воздуха: 0,15 м/с.

Оценка:

В холодное время года микроклимат соответствует классу 1 (оптимальный). В теплое время года температура превышает норму (26 °C против 24 °C), что соответствует классу 2 (допустимый).

Рекомендации:

— Установить кондиционер с мощностью охлаждения не менее 5 кВт для поддержания температуры 22—24 °C в теплое время года;

— Регулярно обслуживать систему вентиляции для поддержания воздухообмена.

Таблица 7 — Параметры микроклимата

Параметр	Период	Норма (ГОСТ 12.1.005-88)	Фактическое значение
Температура воздуха, °С	Холодный	20—22	23
	Теплый	22—24	26
Относительная влажность, %	Годовой	40—60	50
Скорость воздуха, м/с	Годовой	≤ 0,2	0,15

5.2.2 Шум

Шум — это совокупность нежелательных или чрезмерных звуковых колебаний различной частоты и интенсивности, которые могут отрицательно воздействовать на здоровье человека, снижать концентрацию, вызывать утомление или мешать выполнению профессиональных обязанностей на рабочем месте.

Согласно Приложению № 11 Приказа № 817н, предельно допустимый уровень шума (ПДУ) для умственной работы составляет 80 дБА.

Фактический уровень шума: источниками шума являются вакуумные насосы (турбомолекулярный EV-650ZF и форвакуумный ВВН 1-12). Согласно каталогу производителя, уровень шума не более 60 дБА.

Оценка:

Уровень шума ниже ПДУ, класс условий труда — 2 (допустимый).

Рекомендации:

- Регулярно обслуживать оборудование для минимизации шума;
- При необходимости использовать шумозащитные наушники.

5.2.3 Освещенность

Освещенность влияет на зрительный комфорт. Согласно СП 52.13330.2016, для работы с дисплеями минимальная освещенность составляет 400 лк.

Фактические условия: Стенд лабораторного типа, размещенный в составе испытательного комплекса (ИК). Предположительно, стенд оснащен искусственным освещением с использованием светодиодных ламп в соответствии нормам условий труда.

Вывод: Освещенность соответствует нормам, класс условий труда — 1 (оптимальный).

Рекомендации:

Регулярно очищать светильники от пыли.

5.2.4 Тяжесть трудового процесса

Тяжесть труда оценивается по физической нагрузке. Согласно Приложению № 20 Приказа № 817н, для категории Ia оптимальная поза — сидя, стереотипные движения до 20 000 за смену.

Фактические параметры:

— Рабочая поза: Сидя.

— Стереотипные движения: ~10 000 за смену.

— Оценка: Класс — 2 (допустимый).

Рекомендации:

Использовать эргономичные кресла с поддержкой поясницы.

5.2.5 Напряженность трудового процесса

Напряженность трудового процесса — это степень умственной, эмоциональной и сенсорной нагрузки на работника, обусловленная интенсивностью, длительностью и сложностью выполняемых задач, количеством воспринимаемой информации, необходимостью быстрого принятия решений и уровнем ответственности, что может влиять на утомляемость и эффективность труда. Согласно Приложению № 20 Приказа № 817н, длительность наблюдения до 50% смены — класс 2.

Фактические параметры:

— Длительность наблюдения: 60% смены.

— Плотность сигналов: до 100 в час.

— Оценка: Класс — 3.1 (вредный).

Рекомендации:

- Внедрить автоматизированные системы оповещения.
- Обеспечить перерывы каждые 2 часа.

5.2.6 Итоговый класс условий труда

Таблица 8 — Итоговая оценка условий труда

Фактор	Класс/подкласс	Рекомендации
Микроклимат	1 (зима)/2 (лето)	Кондиционер
Шум	2	Обслуживание оборудования
Освещенность	2	Очистка светильников
Химические вещества	2	Датчики утечки
Тяжесть труда	2	Эргономичные кресла
Напряженность труда	3.1	Автоматизация, перерывы

Вывод: итоговый класс — 3.1 (вредный) из-за напряженности труда. Для улучшения условий труда следует разместить дополнительную систему терморегулирования для РМ, использовать эргономичное кресло, внедрить регламент перерывов.

5.3 Эргономика рабочего места

Эргономика рабочего места (РМ) оператора стенда для тепловакуумных испытаний космических аппаратов играет ключевую роль в обеспечении комфорта, снижении утомляемости и повышении производительности труда. Эргономика направлена на оптимизацию взаимодействия человека с оборудованием, минимизацию физических и психофизиологических нагрузок, а также предотвращение профессиональных заболеваний, таких как остеохондроз, туннельный синдром или зрительное утомление.

Характеристика рабочего места:

Рабочее место оператора включает пульт управления, монитор, клавиатуру и кресло, расположенные в помещении, изолированном от зоны испытаний.

Основные элементы РМ и их параметры:

Рабочий стол:

— Размеры 1200×800 мм, что обеспечивает достаточное пространство для размещения монитора, клавиатуры, мыши и дополнительных устройств;

— Высота 750 мм, соответствует стандартным требованиям для сидячей работы (ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009);

— Материал: гладкая поверхность, устойчивая к загрязнениям, с антистатическим покрытием.

Монитор:

— Диагональ 24 дюйма, обеспечивает хорошую читаемость текста и графиков;

— Расстояние до глаз — 60 см (в пределах нормы 50—70 см, ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003);

— Угол наклона — 15° (в пределах нормы $0—20^\circ$), что минимизирует блики и зрительное напряжение;

— Высота размещения: верхний край экрана на уровне глаз или чуть ниже (норма: угол наклона взгляда вниз до 15°).

Кресло:

— Регулируемое по высоте (диапазон 40—50 см), что позволяет адаптировать кресло под рост оператора (160—190 см);

— Регулируемые по высоте подлокотники, что снижает нагрузку на плечевой пояс;

— Спинка с анатомическим изгибом для поддержки поясничного отдела, угол наклона регулируется ($90—120^\circ$);

— Материал: дышащая обивка, устойчивая к износу.

Пространство для ног:

— Свободная зона под столом: 600×500 мм, что позволяет менять положение ног;

— Отсутствие острых углов и выступов, обеспечивающее безопасность.

5.4 Электроопасность

ГОСТ 12.1.019-79 «Электробезопасность». Помещение классифицируется по ПУЭ-7.

Поражения электрическим током происходят в случаях, когда человек замыкает собой электрическую сеть и по нему пойдет ток, обусловленный напряжением шага или напряжением прикосновения. Например:

— при прикосновениях к токоведущим частям электроустановок, находящимся под напряжением; металлическим нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (корпусам оборудования, металлическим конструкциям сооружений и т. д.); отключенным токоведущим частям, на которых остался заряд;

— при воздействии электрической дуги в сетях напряжением выше 1000 В, возникающей между токоведущей частью электрооборудования и человеком, если человек окажется в непосредственной близости от токоведущих частей;

— при замыкании тока на землю, если человек находится в зоне растекания тока.

Таблица 9 — Классификация помещений по электроопасности (ГОСТ 12.4.155-85)

Категория помещения	Характеристика
Без повышенной опасности	Сухие, влажность < 60%, нет токопроводящих полов
С повышенной опасностью	Влажность > 75%, токопроводящие полы
Особо опасные	Высокая влажность, агрессивные среды

Фактические условия: Влажность 50%, пол — бетонный с диэлектрическим покрытием. РМ относится к категории «без повышенной опасности». Однако, для технологического оборудования стенда следует установить собственный контур заземления.

5.5 Пожароопасность

Нормативная база: НПБ 105-03. Категория помещения определяется по удельной пожарной нагрузке.

Таблица 10 — Категории помещений по пожароопасности

Категория	Характеристика
А	Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости
Б	Горючие пыли, жидкости
В1—В4	Горючие материалы, трудно сгораемые жидкости
Г	Негорючие материалы в горячем состоянии
Д	Негорючие материалы

Расчет удельной пожарной нагрузки:

— Горючие материалы: резиновые уплотнители (5 кг, теплота сгорания 40 МДж/кг);

— Площадь помещения: 60 м²;

— Удельная пожарная нагрузка:

$$Q = \frac{5 \times 40}{60} = 3,33 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}.$$

Согласно НПБ 105-03, помещение относится к категории Д (пониженная пожароопасность).

Первичные средства пожаротушения: имеются 2 огнетушителя ОУ-7, указатель эвакуации. Система автоматического пожаротушения общая для ИК.

5.6 Меры по предотвращению и ликвидации утечек азота

Утечки жидкого азота, используемого в криогенных системах, создают риски для персонала и окружающей среды. Безопасность регламентируется в документах ГОСТ 12.1.007-76 и Федеральным законом № 256-ФЗ.

Утечки жидкого азота несут следующие угрозы. Криогенные ожоги возникают при контакте с азотом (-195,8 °С), вызывая мгновенные повреждения кожи и тканей. Асфиксия возможна из-за вытеснения кислорода газообразным азотом, особенно в зоне испытаний (объем 500 м³), где даже 10 л жидкого азота могут снизить концентрацию кислорода ниже 19%, вызывая гипоксию.

Экологический ущерб связан с воздействием проливов на почву и воду, что требует контроля по Федеральному закону № 256-ФЗ. Косвенно утечки повышают пожароопасность в зоне испытаний (категория А, НПБ 105-03) из-за возможного искрения электрооборудования.

Для минимизации рисков утечек применяются превентивные меры. Герметичные резервуары с двойными стенками и вакуумной изоляцией (типа ДС-200, давление до 1,6 МПа) исключают утечки, проверяются раз в полгода ультразвуковой дефектоскопией. Датчики давления и термодары отслеживают параметры азота, передавая данные в телеметрию для оперативного реагирования. Автоматические клапаны перекрывают подачу азота за 0,5 с при отклонениях, дополненные ручным отключением. Магистраль опрессовывается гелием (2 МПа) перед испытаниями, а персонал проходит ежегодный инструктаж по работе с криогенными системами.

При утечках применяются меры для устранения последствий. Сливные резервуары (5 м³) собирают пролившийся азот, который утилизируется через вентиляцию. Усиленная вентиляция в зоне испытаний (2500 м³/ч) и помещении оператора (540 м³/ч) предотвращает асфиксию, переключаясь в режим 10 раз/час при срабатывании газоанализаторов (O₂<19,5%). Персонал использует кислородные маски, криозащитные перчатки и очки. Газоанализаторы в зоне испытаний и помещении оператора сигнализируют о превышении азота (5 мг/м³). Тренировки по эвакуации (менее 2 мин) проходят раз в полгода.

5.7 Расчетная часть

Необходимость расчета контурного заземления стенда (не рабочего места оператора) обосновывается следующими причинами:

1. В составе стенда присутствует электрооборудование (вакуумные насосы, системы телеметрии, нагреватели) с напряжением 220/380 В. Заземление предотвращает поражение током персонала при неисправностях (короткое замыкание, повреждение изоляции), отводя ток в землю (ГОСТ 12.1.019-79);

2. Стенд находится в зоне испытаний (категория А по пожароопасности), где возможны утечки азота, создающие конденсат и увеличивающие риск пробоя. Заземление минимизирует вероятность искрения и пожара.

3. Заземление предотвращает повреждение стенда от статического электричества и скачков напряжения, обеспечивая надежность и долговечность.

Заземляющее устройство включает:

— Заземлитель — проводники (электроды), соединенные между собой и находящиеся в непосредственном контакте с грунтом;

— Заземляющие проводники — элементы, соединяющие заземляемые части электроустановки с заземлителем.

Заземлители подразделяются на:

— Естественные — металлические конструкции и арматура, находящиеся в земле, водопроводные и канализационные трубопроводы, расположенные под землей, а также предметы, используемые по своему основному назначению;

— Искусственные — специально созданные для целей заземления конструкции и устройства.

В качестве искусственных вертикальных электродов используются стальные трубы с толщиной стенки не менее 3,5 мм и диаметром не менее 3,2 см (обычно это трубы диаметром 5 — 6 см); угловая сталь с толщиной полок не менее 4 мм (обычно это угловая сталь размером от 40х40 до 60х60 мм); стальные полосы сечением не менее 100 мм². Длина вертикальных электродов составляет не менее 2 м.

Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяется полосовая сталь сечением не менее 4х12 мм и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

Выносное заземляющее устройство располагают за пределами площадки, на которой размещено заземляемое оборудование или сосредотачивают на части этой площадки.

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки.

Требуется рассчитать параметры защитного заземления стенда тепловакуумных испытаний. Для проведения испытаний выделено рабочее место в помещении размерами 15x15 м.

Приняты дополнительные исходные данные:

- Напряжение установки $U_{yc} = 360 \text{ В}$;
- Мощность источника $W_{ист}$ до 100 кВА;
- Форма вертикальных электродов — труба диаметром $d = 50 \text{ мм}$;
- Длина вертикального электрода $l = 1,5 \text{ м}$;
- Глубина размещения вертикальных электродов $h = 0,7 \text{ м}$;
- Форма горизонтального электрода — полоса шириной $b = 12 \text{ мм}$, толщиной $c = 4 \text{ мм}$;
- Ток замыкания на землю I_z до 500 А.
- Тип грунта — супесь;
- Климатическая зона — III.

Наибольшие допустимые значения сопротивления защитного заземления R_0 , установленные Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) для любого времени года, для установок напряжением до 1000 В:

$R_0 = 10 \text{ Ом}$ — при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВА;

$R_0 = 4 \text{ Ом}$ — во всех остальных случаях;

Суммарная длина горизонтального электрода равна периметру контура заземления:

$$l_2 = 2(15 + 15) = 60 \text{ м.}$$

Примем расстояние между электродами 5 м. Тогда количество заземлителей $n = 16 \text{ шт.}$ Схема заземления представлена на рисунке 16.

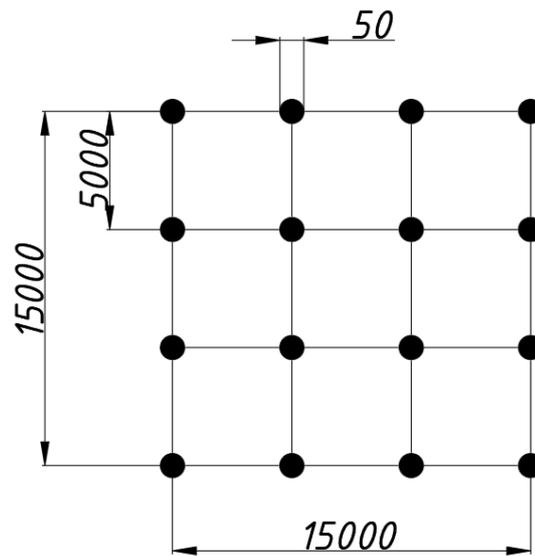


Рисунок 16 — Схема заземления стенда

$$\rho = \rho_{zp} \times \psi, \quad (43)$$

где $\rho_{zp} = 180 \text{ Ом} \times \text{м}$ — удельное электрическое сопротивление грунта;

$K_n = 1,6$ — повышающие коэффициенты, учитывающие изменения сопротивления грунта в зависимости от климатических зон.

$$\rho = 180 \times 1,6 = 288 \text{ Ом} \times \text{м}.$$

Расчетное значение удельного сопротивление грунта для горизонтального заземлителя:

$$\rho_{zp} = 180 \text{ Ом} \times \text{м};$$

$$K_n = 3;$$

$$\rho = 180 \times 3 = 540 \text{ Ом} \times \text{м}.$$

Сопротивление одиночного вертикального заземлителя R_g определяется по формуле:

$$R_6 = 0,336 \frac{\rho}{l} \left(\lg \left(\frac{2l}{d} \right) + 0,511 \lg \frac{4h+l}{4h-l} \right), \quad (44)$$

$$R_6 = 0,336 \frac{288}{1,5} \left(\lg \left(\frac{2 \times 1,5}{0,05} \right) + 0,511 \lg \frac{4 \times 0,7 + 1,5}{4 \times 0,7 - 1,5} \right) = 125,978 \text{ Ом.}$$

Сопротивление горизонтально расположенного электрода:

$$R_2 = 0,336 \frac{\rho}{l_2} \lg \left(\frac{l_2^2}{0,5bh} \right), \quad (45)$$

$$R_2 = 0,336 \frac{540}{60} \lg \left(\frac{60^2}{0,5 \times 0,012 \times 0,7} \right) = 17,473 \text{ Ом.}$$

Тогда, расчетное сопротивление заземлителя R_3 :

$$R_3 = \frac{R_6 R_2}{R_6 \eta_2 + R_2 \eta_6 n}, \quad (46)$$

где $\eta_2 = 0,48$ — коэффициент использования горизонтальных заземлителей;

$\eta_6 = 0,73$ — коэффициент использования вертикальных заземлителей;

$$R_3 = \frac{125,978 \times 17,473}{125,978 \times 0,48 + 17,473 \times 0,73 \times 16} = 8,321 \text{ Ом.}$$

Поскольку выполняется условие $R_3 \leq R_0$ ($8,321 \leq 10 \text{ Ом}$), это свидетельствует о том, что тип заземляющего устройства, форма и размеры электродов, их количество, схема соединения и размещения выбраны правильно и, следовательно, напряжения прикосновения и шага находятся в допустимых пределах.

5.8 Вывод

Анализ условий труда и безопасности при эксплуатации стенда для тепловакуумных испытаний выявил основные риски: криогенные ожоги, асфиксия от утечек азота, электроопасность и напряженность труда. Итоговый класс условий труда — 3.1 (вредный) из-за высокой умственной нагрузки (60% времени наблюдения, до 100 сигналов/час). Микроклимат в теплое время года (26 °С) требует установки кондиционера, шум (60 дБА) и освещенность (450 лк) соответствуют нормам, а тяжесть труда допустима. Эргономика рабочего места частично отвечает стандартам, но нуждается в улучшениях: регулируемое кресло, подставка для ног и оптимизация монитора. Электроопасность минимальна (помещение "без повышенной опасности"), расчет заземления стенда подтверждает защиту от поражения током. Пожароопасность низкая (категория Д), но зона испытаний (категория А) требует строгого контроля. Утечки азота предотвращаются герметичными резервуарами, датчиками и автоматикой, а ликвидируются сливными ёмкостями, вентиляцией и СИЗ. Реализация рекомендаций (автоматизация, эргономические улучшения, тренировки) позволит снизить риски, повысить комфорт и обеспечить соответствие нормам (Приказ Минтруда № 817н, ГОСТ 12.1.007-76).

6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной части дипломного проекта приводится расчет экономической целесообразности создания испытательного стенда.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемого стенда необходимо рассчитать затраты на его проектирование, затраты на приобретение комплектующих для его создания и описать экономический эффект от его использования.

При анализе целесообразности данную разработку следует рассматривать как некоммерческий продукт в том смысле, что она не предназначена для широкого тиражирования и продажи с целью получения прибыли. Это упрощение сделано для того, чтобы показать прибыльность внедрения стенда на предприятиях, где её ценность определяется сэкономленными ею средствами.

6.1 Возможный рынок применения испытательного стенда

Потенциальными заказчиками могут быть различные учреждения и организации, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией космических аппаратов, зондов или спускаемых аппаратов:

1) Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос", в состав которой входят:

- АО "НПО "Энергомаш" им. академика В.П. Глушко";
- АО "РКЦ "Прогресс";
- АО "НПО "Сатурн";
- АО "МИТ";
- АО "НПО "Турбобомашина".

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

- НПО имени С. А. Лавочкина;
- ОАО «Корпорация ВНИИЭМ»;
- АО «Российские космические системы».

На стенде возможно как проведение испытания отдельного элемента материала КА, так и КА целиком, с целью имитации температурных режимов на околоземных орбитах.

Ценность стенда заключается в необходимости новых, высокотехнологических и универсальных решениях, которые позволят минимизировать технологическое время и стоимость испытаний космических аппаратов.

6.2 Календарный план работы над проектированием стенда

Жизненный цикл системы охватывает весь процесс от принятия решения о разработке до полного отказа конечного пользователя от применения данного испытательного стенда. Основные этапы:

— Этап проектирования стенда — разработка технической документации, проведение расчётов, выбор материалов и технологий;

— Этап создания стенда — изготовление, сборка, первичная наладка и тестирование оборудования;

— Этап внедрения — ввод в эксплуатацию, обучение персонала и начало проведения регулярных испытаний;

— Этап зрелости — период активной эксплуатации стенда, наибольшая эффективность его применения;

— Этап упадка — устаревание технологий, снижение спроса на испытания, а также появление новых методов и решений.

Замена системы произойдёт, когда новые технологии и методы испытаний полностью вытеснят существующие.

Возможные причины замены:

— Появление более точных, быстрых или экономичных решений;

— Увеличение затрат на поддержание работоспособности устаревшего оборудования;

— Изменение требований к испытаниям в результате разработки новых типов космических аппаратов.

Минимальный срок "жизни" системы составит, предположительно, 10—15 лет, что позволит окупить её разработку, внедрение и эксплуатацию.

План проведения работ представлен в таблице 11.

Таблица 11 — План проведения работ по проектированию стенда

№	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 процессов	Инженер	3
9	Подготовка документации	Инженер	5
10	Консультация с руководителем	Руководитель	3
Итого			41

Конкурентоспособность данного стенда характеризуется техническими характеристиками и инновационными решениями. Так, например, в данном проекте проведен сравнительный анализ составных частей телеметрической системы стенда, по результатам которого, подобраны оптимальные современные комбинированные вакуумметры.

Из технических характеристик стенда следует отметить диапазоны условий испытаний, это позволяет проводить испытания в условиях, максимально приближенных к реальным условиям на околоземных орбитах Земли.

6.3 Себестоимость стенда

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;
- AutoCAD 2013 для разработки чертежей в электронном формате;
- 9 листов формата A1 для распечатки графического материала к проекту;
- 2 упаковки бумаги формата A4.

В таблице 12 приведен расчет затрат на расходные материалы. Сумма затрат рассчитывается исходя из цены и количества необходимых материалов, цены — рыночные.

Таблица 12 — Затраты на расходные материалы

№	Наименование оборудования	Количество	Цена, у. е	Сумма затрат, у. е
1	Программное обеспечение MS Office 2010	1	2 214,08	2 214,08
2	Программное обеспечение AutoCAD 2013	1	8 555,60	8 555,60
3	Лист формата A1	9	250,00	2 250,00

Продолжение таблицы 12

№	Наименование оборудования	Количество	Цена, у. е	Сумма затрат, у. е
4	Упаковка бумаги формата А4	2	380,00	760,00
5	Тонер	1	380,00	380,00
Итого				14 159,68

Для таблицы 13 принято, что в месяце — 21 рабочий день.

Таблица 13 — Основная заработная плата разработчиков

№	Наименование этапа	Трудоём- кость этапа, чел./день	Трудоём- 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:

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

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:

$$Z_{np} = N \times C_{мч} \times K_{загр}, \quad (47)$$

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 13, 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 14.

Таблица 14 — Себестоимость проектирования стенда

Наименование статей расходов	Затраты, у. е.
Затраты на приобретение расходных материалов	14 159,68
Затраты на основную заработную плату разработчиков	71 953,56
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	14 390,71

Продолжение таблицы 14

Наименование статей расходов	Затраты, у. е.
Затраты на социальные страховые взносы	26 075,97
Накладные расходы	158 297,83
Прочие расходы	14 336,00
Итого	299 213,75

Для создания опытного образца необходимы комплектующие изделия, стоимость которых приведена в таблице 15.

Таблица 15 — Расходы на приобретение комплектующих изделий

№	Наименование изделия	Количество	Цена, у. е.	Сумма, у. е.
1	Вакуумная камера	1	1 300 000,00	1 300 000,00
2	Криопанель	1	990 000,00	990 000,00
3	Масс-спектрометр	1	500 000,00	500 000,00
4	Насос форвакуумный	1	210 000,00	210 000,00
5	Насос турбомолекулярный	1	390 000,00	390 000,00
6	Ловушка азотная	1	45 000,00	45 000,00
7	Десублиматор	1	170 000,00	170 000,00
8	Вакуумметр Баярда-Альперта	3	280 000,00	840 000,00
9	Термопара	3	44 000,00	132 000,00
10	Затвор вакуумный	3	210 000,00	630 000,00
11	Пневмоцит	1	320 000,00	320 000,00
12	Баллон с сжатым воздухом	4	13 000,00	52 000,00
13	Манометр	4	10 000,00	40 000,00
14	Трубопровод 12X18Н10Т	5	9 400,00	47 000,00
15	Система управления	1	2 000 000,00	2 000 000,00
Итого				7 666 000,00

Затраты на основные расходные материалы, которые включают стоимость

рабочего тела, расходуемого в процессе подготовки и проведения испытания, представлены в таблице 16.

Таблица 16 — Затраты на основные расходные материалы

№	Наименование материала	Объем, л	Цена, у. е.	Сумма, у. е.
1	Вода	500	2,70	1 350,00
2	Азот	500	75,20	37 600,00
3	Сжатый воздух	50	29,50	1 475,00
Итого				40 425,00

6.4 Оценка косвенного экономического эффекта

Косвенный эффект — это положительное влияние, которое не имеет прямого денежного выражения, но способствует достижению целей и улучшению результатов в долгосрочной перспективе.

Создание и использование стенда для тепловакуумных испытаний, предназначенного для исследования воздействия криогенных температур на космические аппараты открытого типа, оказывает значительное косвенное влияние на развитие космической отрасли.

Такой стенд позволяет:

— Повысить точность моделирования экстремальных условий космического пространства, включая глубокий вакуум и сверхнизкие температуры;

— Снизить количество ошибок на этапе проектирования и испытаний, минимизируя необходимость дорогостоящих доработок на поздних стадиях разработки;

— Увеличить надежность космических аппаратов открытого типа, снижая риски аварий и отказов при эксплуатации;

— Ускорить внедрение новых технологий за счет более эффективной отработки терморегулирующих систем и материалов в условиях, приближенных к реальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной ВКР был спроектирован стенд для проведения тепловакуумных испытаний для исследования воздействия криогенных температур на космические аппараты открытого типа.

В общей части ВКР проведен анализ конструктивно-компоновочных схем вакуумных и криогенных стендов, по описанной информации была разработана принципиальная схема стенда.

В расчетной части определены основные проектные параметры стенда, а именно массово-геометрические характеристики систем, рассчитаны газовые нагрузки на вакуумную систему стенда, подобраны насосы и рассчитано время вакуумирования. Произведен расчет криогенной системы, определены параметры криопанели и воздействующих на нее тепловых нагрузок. Также, произведен расчет на прочность обечайки вакуумной камеры при эксплуатационных нагрузках. По полученным результатам разработаны общий вид и пневмогидравлическая схема стенда. В описательной части были рассмотрены устройство, назначение, работа всех систем стенда.

В технологической части ВКР разработана циклограмма тепловакуумных испытаний на данном стенде. Циклограмма разделена на три основных раздела — подготовительные, основные и заключительные операции.

В разделе техники безопасности определены правила и меры безопасности при работе с криогенным оборудованием и вакуумным оборудованием. Описаны требования к персоналу, нормам СИЗ и составлен рекомендуемый список нормативных документов при работе на стенде. Произведен расчет контура защитного заземления стенда.

В экономическом разделе рассмотрены вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на проектирование испытательного стенда.

- На проектирование стенда выделены 41 рабочих дней;
- Себестоимость проектирования составила 299 213,75 у. е.;

- Расходы на создание опытного образца составили 7 666 000,00 у. е.;
- Затраты на основные расходные материалы для проведения одного испытания составили 40 425,00 у. е.

Потенциальными заказчиками могут быть различные учреждения и организации, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией космических летательных аппаратов малого класса.

Отличительными особенностями данного стенда являются:

- Стенд спроектирован для испытания КА малого типа любых форм;
- Относительная простота и дешевизна конструкции;
- Стенд обеспечивает испытания на диапазоне давления до 10^{-4} Па;
- Безопасность проведения испытаний, за счет удаленного места оператора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Проектирование испытательных стендов для экспериментальной обработки объектов ракетно-космической техники, А.Г. Галеев, Ю.В. Захаров, В.П. Макаров, В.В. Родченко, 2014. — 283 с.
- 2 Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: учеб. пособие для вузов по специальности «Прикл. математика» / Н.Н. Моисеев. — Изд. 2-е. — М. : ЛИБРОКОМ, 2012. — 487 с.
- 3 Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Вакуумная техника. Справочник. 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2009. — 590 с.
- 4 Инженерное пособие «Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники» Книга 2, под ред. И.В. Бармина — М.: Полиграфикс РПК, 2006. — 416 с.
- 5 Храмцов Б.А., Гаевой А.П., Дивиченко И.В. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: Уч. пособие/ Б.А. Храмцов. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. — 187 с.
- 6 Мучин П.В. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: СГГА, 2003. — 276 с.
- 7 Безопасность жизнедеятельности в авиакосмической отрасли: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.П. Шибанов, В.П. Мельников; под ред. В.П. Мельникова. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 240 с.
- 8 Основы охраны труда / В.Ц. Жидецкий, В.С. Джигирей, А.В. Мельников, 2016.
- 9 ГОСТ 2.610-2006 Единная система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения документов
- 10 ГОСТ 27.003-2015 Надежность в технике. Термины и определения
- 11 ГОСТ Р 53985—2008. Экологическая безопасность ракетно-космической техники.
- 12 СА-03-004-07. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.

13 РД 26-01-168-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность днищ в местах крепления опор-стоек.

14 ГОСТ 25221-82. Сосуды и аппараты. Днища и крышки сферические неотбортованные. Нормы и методы расчета на прочность.

15 ГОСТ 26202-84. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.

16 ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.

17 ГОСТ 24755-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий.

18 ГОСТ 14249-89. Сосуды. Нормы и методы расчета на прочность.

19 РД РТМ 26-01-76-83. Крышки и днища плоские круглые с радиальными ребрами жесткости сосудов и аппаратов.

20 РД 26-12-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений.

21 ГОСТ Р 51244-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.

22 ГОСТ 7.32 — 2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования и правила оформления.

23 ГОСТ 18312-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

24 ГОСТ 12.1.777-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Обязательное)

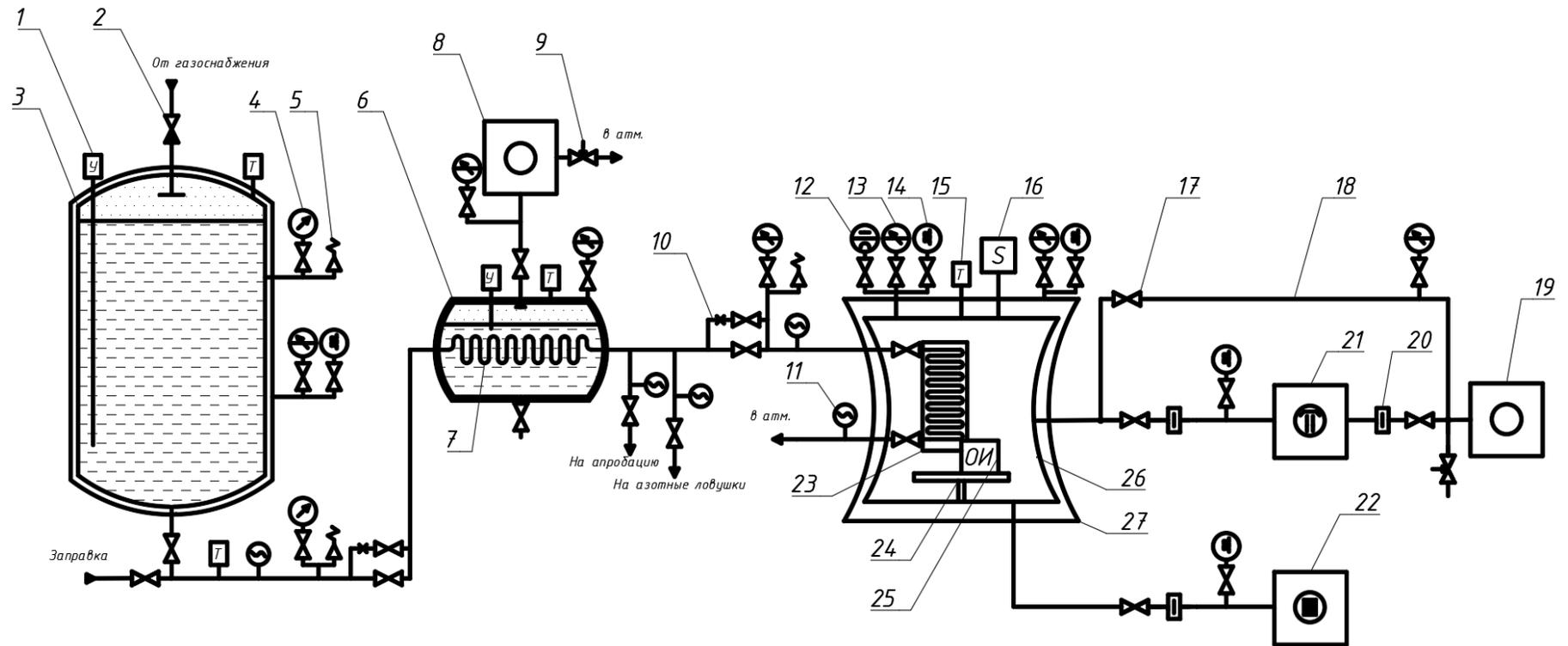


Рисунок А.1 — Принципиальная схема стенда криогенных испытаний

- 1 — Датчик уровня; 2 — Обратный клапан; 3 — Бак хранилище; 4 — Манометр; 5 — ДПК; 6 — Бак теплообменник;
 7 — Сильфон; 8 — Насос объемный; 9 — Натекатель; 10 — Жиклёр; 11 — Сигнализатор жидкости;
 12 — Вакууметр ионизационный; 13 — Вакууметр деформационный; 14 — Вакууметр термопарный;
 15 — Датчик температуры; 16 — Масс-спектрометр; 17 — Клапан; 18 — Байпасная линия;
 19 — Насос вакуумный вращательный; 20 — Азотная ловушка; 21 — Насос диффузионный; 22 — Насос турбомолекулярный;
 23 — Криопанель; 24 — Стапель стенда; 25 — Объект испытания; 26 — Вакуумная камера;
 27 — экранно-вакуумная теплоизоляция.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(Обязательное)

Циклограмма подготовки и проведения испытаний

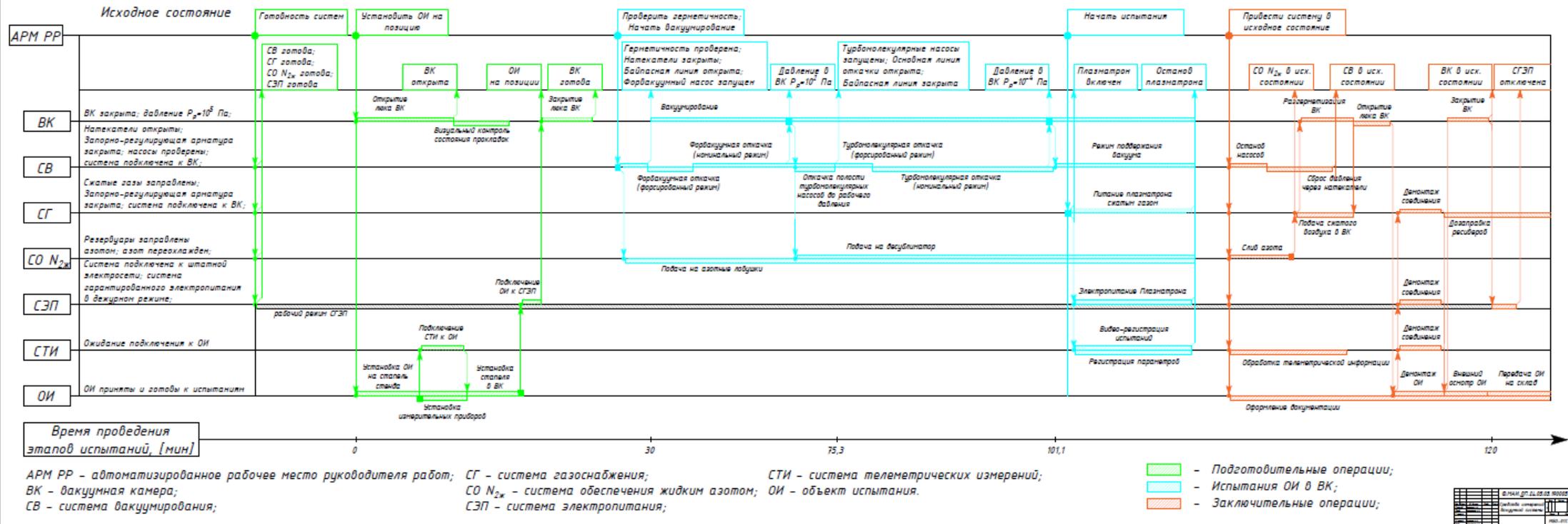


Рисунок Б.1 — Циклограмма испытаний