

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика  
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. зав. кафедрой

В.В.Соловьев

« 10 » июля 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Проектная разработка системы заправки жидким водородом  
стартовых комплексов перспективных разгонных блоков ракет-носителей

Исполнитель  
студент группы 617-об

Д.В.Фоминых 10.07.2020  
(подпись, дата)

Д.В.Фоминых

Руководитель  
доцент, к.т.н.

А.В.Козырь 10.07.2020  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Консультант

К.А.Насуленко  
(подпись, дата)

К.А. Насуленко

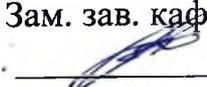
Нормоконтроль

М.А.Аревкин 10.07.2020  
(подпись, дата)

М.А. Аревкин

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. зав. кафедрой  
 В.В. Соловьев  
« 20 » марта 2020 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Фоминых Дениса Витальевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектная разработка системы заправки жидким водородом стартовых комплексов перспективных разгонных блоков ракет-носителей

(утверждена приказом от 14.04.2020 №711-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 14.07.2020
  3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: изделие: 12КРБ;  $P = 7100 \text{ кгс}$ ;  $T_{уд} = 462 \text{ с}$ ; Компонент топлива: жидкий водород;  $V_{т} = 27 \text{ м}^3$ .
  4. Содержание выпускной квалификационной работы: заправка РБ жидким водородом, основные проектные параметры, описание конструкции, технологическая часть, специальная часть, меры безопасности при работе с жидким водородом, организационно-экономическая часть
  5. Перечень материалов приложения: разгонный блок 12КРБ, пневмогидравлическая схема системы заправки жидким водородом, основные узлы системы заправки, расчетная схема, сетевой график испытаний, общий вид железнодорожной цистерны, пневмогидравлическая схема цистерны, теплоизоляция цистерны, запорный клапан.
  6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Насуленко К.А.
  7. Дата выдачи задания: 20 марта 2020г.
- Руководитель выпускного квалификационного проекта: Козырь А.В.  
Задание принял к исполнению (дата): 20.03.2020 

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 67 страниц, 4 рисунка, 12 таблиц, 12 источников.

### СИСТЕМА ЗАПРАВКИ, КРИОГЕННОЕ ТОПЛИВО, ЖИДКИЙ ВОДОРОД, ЗАПРАВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, РАЗГОННЫЙ БЛОК, БАК, ЗАПРАВКА

Цель работы – проектная разработка системы заправки жидким водородом стартовых комплексов перспективных разгонных блоков ракет-носителей, а также разработка технологического процесса пневмогидравлических испытаниях системы заправки

Задачи:

- 1) Провести проектный расчет системы заправки;
- 2) Составить описание системы;
- 3) Составить технологическую часть;
- 4) Провести специальную часть;
- 5) Описать меры безопасности при эксплуатации жидкого водорода и сжатых газов;
- 6) Экономически обосновать разработку и использование системы заправки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ЗАПРАВКА РБ ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ.....	7
1.1 Технология работы системы.....	7
2 ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ .....	10
2.1 Расчет основных проектных параметров.....	10
2.2 Расчёт топливного резервуара .....	11
2.2.1 Объёмный расчёт.....	11
2.2.2 Определение плотности топлива .....	12
2.2.3 Определение массового секундного расхода.....	12
2.3 Расчет размеров резервуара .....	14
2.3.1 Расчёт продольных размеров резервуара .....	16
2.4 Система наддува топливных резервуаров.....	19
2.4.1 Определение давления в газовой подушке резервуара .....	20
2.4.2 Расчёт максимального давления в подушке резервуара .....	22
2.4.3 Расчёт "холодной" системы наддува резервуара .....	23
2.5 Расчёт времени заправки.....	25
2.6 Тепловой расчет криогенной заправочной системы .....	26
3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ .....	34
3.1 Система заправки жидким водородом .....	34
3.2 Пневмогидравлическая схема.....	34
3.3 Состав системы.....	34
3.4 Разработка системы заправки .....	36
3.5 Основные и вспомогательные операции.....	36
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	38
4.1 Пневмогидравлическое испытание .....	38
4.1.1 Гидравлическое испытание.....	38
4.1.2 Пневматическое испытание .....	38

4.1.3	Определение параметров гидравлических (пневматических) испытаний	39
4.2	Пневмогидроиспытание ПГС заправочной системы РБ жидким водородом	41
	.....	41
5	СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	42
5.1	Криогенные транспортные средства доставки жидкого	42
	водорода.....	42
5.1.1	ТРЖВ-20	42
5.1.2	Железнодорожная цистерна 8Г514.....	43
5.2	Модернизация железнодорожной цистерны 8Г514.....	44
6	МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ	46
6.1	Меры безопасности при работе с сжатыми газами	51
6.1.1	Общие требования к сосудам, работающим под давлением.....	51
6.2	Проверочный расчет сосуда высокого давления.....	55
7	ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	58
7.1	Календарный план работы над проектированием заправочной системы ...	59
7.2	Себестоимость проектирования пневмогидравлической системы заправки	59
7.3	Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения ПП	65
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	67

## ВВЕДЕНИЕ

В данный момент в ракетно-космической технике в основном используются разгонные блоки на компонентах ракетного топлива диметилгидразине, окислителем которого является тетраоксид азота. Но также используются разгонные блоки на жидком водороде и кислороде. Данные криогенные компоненты ракетного топлива позволяют получать в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей значительно более высокие удельные импульсы, чем при использовании только высококипящих компонентов ракетного топлива. Кроме того, в отличие от высококипящих компонентов топлива, криогенные компоненты (за исключением фтора, который не получил применения из-за высокой токсичности) не токсичны и не загрязняют окружающую среду. Одним из таких компонентов является жидкий водород - один из самых эффективных криогенных горючих. Он используется в паре с кислородом в верхних ступенях носителя, в районных блоках, а также в бортовых электрохимических генераторах (ЭХГ), преобразующих энергию химической реакции соединения кислорода с водородом непосредственно в электрическую. Водород является экологически чистым горючим материалом. При сгорании он не загрязняет окружающую среду.

## 1 ЗАПРАВКА РБ ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ

Система заправки жидким водородом обеспечивает заправку РБ жидким охлажденным водородом в количестве 27 м<sup>3</sup> с расходом до 26 м<sup>3</sup>/ч и температурой 18К, а также термостатирование в баке РБ жидкого водорода с расходом 26 м<sup>3</sup>/ч и температурой 17К.

Также, система создает подачу в РБ азота, водорода и гелия, безопасное дренирование паров водорода, подготовку системы заправки и бака ракеты к приему жидкого водорода, слив продукта из бака РБ при несостоявшемся пуске, обратную подготовку системы, т. е. получение в баке РБ и в наземной системе нейтральной среды.

### 1.1 Технология работы системы

Цилиндрические резервуары РГЦ-100 хранилища объемом 109м<sup>3</sup> каждый с экранно-вакуумной изоляцией заполняют жидким водородом из железнодорожных цистерн 8Г514. Перед сливом жидкого водорода воздушную среду в подстыковочных участках 8Г514 и заправочных колонках вначале заменяют на азотную, а затем на водородную (газ) путем их продувки замещающим газом в течение определенного времени.

Для обеспечения слива жидкого водорода агрегаты 8Г514 наддувают до давления 0,25 МПа газообразным водородом, подаваемым от испарителей системы заправки. В процессе заполнения в резервуарах хранилища поддерживается избыточное давление не ниже 0,015 МПа, контролируется уровень и давление в железнодорожных цистернах и цилиндрических резервуарах. По окончании слива подстыковочные участки 8Г514 и заправочные колонки отогревают до температуры не ниже 100 К путем продувки газообразным водородом. После этого водородную среду в этих участках заменяют на азотную с концентрацией водорода в азоте не выше 1 %, а затем на воздушную с концентрацией кислорода в азоте не менее 19 % (об.).

Железнодорожные цистерны отстыковывают от заправочных колонок и отводят.

Хранение жидкого водорода в резервуарах производят с периодическим газосбросом при избыточном давлении 0,01...0,2 МПа. Перед началом работ на СК проверяют кондиционность жидкого водорода путем отбора проб из каждого резервуара и проведения их анализа. Пробоотборник расположен в резервуаре, поток жидкого водорода подают на приборы, позволяющие определить малые концентрации примесей.

За сутки до начала заправки давление в резервуарах хранилища сбрасывают до 0,0015 МПа (изб.) и поддерживают на этом уровне, что дает возможность охладить водород до температуры кипения, соответствующей указанному давлению, и тем самым снизить тепловую нагрузку на охладители при заправке и термостатировании. Заправка начинается с проведения подготовки азотной системы и бака РБ. Она осуществляется комбинацией способов продувки и «полоскания» (наддув-сброс). Выполнение операции заканчивают проведением газового анализа среды. Водородную подготовку системы и бака РБ осуществляют аналогично азотной подготовке. Резервуаров хранилища надувают до давления 1,0 МПа газифицированной жидкостью что обеспечивает подачу газообразного водорода в систему и РБ в течение всего времени работы. После замены азотной среды на водородную в магистральном трубопроводе подачи газа в РБ зажигаются дежурные факелы на площадке дожигания водорода, откуда дренируются водород из системы и бака РБ.

Для охлаждения и заполнения заправочных магистралей и охладителей системы производится наддув резервуара хранилища до давления 0,25 МПа и выдача из него жидкого водорода, соединяющие хранилище с блоком охлаждения. В блоке охлаждения проходят последовательно теплообменники охладителей, магистральный трубопровод до блока клапанов на заправочном трубопроводе, магистральные до блока охлаждения, затем поступают в резервуары охладителей и через эжекторы сбрасываются на площадку дожигания водорода. По сигналу уровнемеров после заполнения охладителей

жидким водородом операции прекращаются. Из этого же резервуара начинается выдача жидкого водорода на заправку РБ.

Сливаемый из бака РБ жидкий водород поступает по магистральному трубопроводу в блок клапанов и сливается в пустой резервуар. Из сливного резервуара компонент либо транспортируется, либо подается в рабочий резервуар через блок охлаждения и фильтров. Одновременно из рабочего резервуара выдают жидкий водород с давлением 1,0 МПа. Поток жидкого водорода проходит охладитель и по магистральному трубопроводу направляется к блоку клапанов и после в бак РБ. Термостатирование заканчивается за 2-3 минуты до пуска РБ. Перед отстыковкой из концевых участков всех водородных трубопроводов, подстыкованных к РБ, водород удаляют путем их продувки гелием. Гелий поступает в трубопроводы со стороны РБ; удаляемый из трубопроводов водород сбрасывается на площадку дожигания. Отстыковка коммуникаций от РБ при пуске является автоматической.

В случае отмены пуска жидкий водород из бака РБ сливают по трубопроводу слива и магистральному трубопроводу в сливную емкость.

## 2 ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

### 2.1 Расчет основных проектных параметров

Целью задачи выбора основных проектных параметров является нахождение такого их сочетания, оснащенных специальным оборудованием, обеспечивающим проведение заправки разгонного блока с целью определения их основных параметров и характеристик. Под ПГС понимается совокупность пневмогидравлических устройств и магистралей, обеспечивающих хранение топливных компонентов и газа, их подачу во время работы заправки под определенным давлением и с определенным расходом, а также выполнение некоторых других операций, определяемых назначением и спецификой эксплуатации ЛА. В свою очередь ПГС состоит из ряда систем, среди которых по функциональному назначению можно выделить следующие основные системы:

1. Поддачи топлива;
2. Наддува топливных резервуаров;
3. Регулирования;
4. Некоторые вспомогательные – заправки, блокировки, продувки, аварийного слива и др.

Исходные данные для расчета:

Таблица 1 – Исходные данные

Изделие	12КРБ
Заправляемый компонент топлива	жидкий водород
Плотность компонентов топлива, $\rho$	71 кг/м <sup>3</sup>
Соотношение компонентов топлива, $K_M$	6
Температура кипения, $T_{кип}$	-253 °С
Температура замерзания	-259 °С

## **2.2 Расчёт топливного резервуара**

### **2.2.1 Объёмный расчёт**

Заправочные системы предназначены для транспортировки, приема, хранения подачи на борт ЛА заданного количество топливного компонента требуемой кондиции.

Заправочные системы являются специфическими системами ракетных комплексов, практически не имеющими аналогов в других отраслях техники. Оборудование систем заправки в основном размещено в хранилищах состоящих из емкостей, средств подачи и другого оборудования, обеспечивающего хранение и подготовку компонентов к заправке по трассам прокладки магистральных трубопроводов (заправочно-сливных и дренажных); на агрегатах обслуживания – кабель-заправочных башнях (мачтах), башнях и фермах обслуживания, обеспечивающих подвод наземных магистралей к разъёмным соединениям ракеты. Объём топливных баков рассчитывается из условий размещения в них заданного весового количества топлива, называемого весовой заправкой топливных баков.

Для накопления, хранения и выдачи жидкого водорода в составе заправочных систем используют криогенные резервуары. Резервуары с входящими в них трубопроводами и арматурой объединяются в хранилище заправочной системы. Резервуары отличаются друг от друга конструктивными особенностями и используемыми материалами. Форму резервуаров выбирают с учетом необходимого объема, удобства изготовления, перевозки и монтажа, эксплуатационных особенностей. Заправочная система должна обеспечить подачу в ББ ЛА строго определенного количество топливного компонента – дозы. Величина дозы зависит от полетного задания ЛА и определяется в единицах массы.

Дозирование представляет собой процесс выделения из имеющегося в наземных емкостях запаса КТ количества, равного дозе. Способы дозирования топливных компонентов классифицируются по двум признакам:

1. По месту формирования дозы компонента:
  - а) внутреннее дозирование;
  - б) внешнее дозирование.
2. По единицам измерения количества компонента:
  - а) массовое дозирование;
  - б) весовое дозирование;
  - в) объемное дозирование.

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

### 2.2.2 Определение плотности топлива

Плотность топлива определяется по формуле:

$$\rho_T = \frac{(1+K_M) \cdot \rho_G \cdot \rho_{OK}}{\rho_{OK} + \rho_G \cdot K_M}, \quad (1)$$

$$\rho_T = \frac{(1+6) \cdot 71 \cdot 1140}{1140 + 71 \cdot 6} = 361,8 \text{ [кг/м}^3\text{]} .$$

### 2.2.3 Определение массового секундного расхода

Определение массового секундного расхода:

$$\dot{m}_M = \frac{P_M}{I_{удр}}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_M = \frac{7100}{462} = 15,368 \text{ [кг/с]} .$$

Расход горючего(жидкого водорода) определяется по следующей формуле:

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_M \cdot K_M}{1 + K_M}, \quad (3)$$

$$\dot{m}_r = \frac{15,368 \cdot 1}{1 + 6} = 2,195 \text{ [кг/с]}$$

Масса топлива, заправляемого в баки РБ определяется по следующей формуле:

$$m = \dot{m} \cdot t, \quad (4)$$

$$m = 2,195 \cdot 800 = 1756 \text{ [кг]}$$

Объём водорода необходимого для обеспечения заданного импульса

$$V = \frac{\dot{m} \cdot t}{\rho_r}, \quad (5)$$

$$V = \frac{2,195 \cdot 800}{71} = 24,73239 \text{ [м}^3\text{]}.$$

Объём газовой подушки топливных баков, исходя из расчёта: для окислителя 5% от рабочего запаса топлива

Объём газовой подушки бака горючего определяется по следующей формуле:

$$V_{\text{гпок}} = V \cdot 0,05, \quad (6)$$

$$V_{\text{гпок}} = 24,73239 \cdot 0,05 = 1,23662 \text{ [м}^3\text{]}.$$

Объём топлива, идущего на предстартовые потери (испарение, выброс через дренажные системы).

Объём горючего идущего на предстартовые потери определяется по следующей формуле

$$V_{\text{пр}} = 0,01 \cdot V, \quad (7)$$

$$V_{\text{пр}} = 0,01 \cdot 24,73239 = 0,24732 \text{ [м}^3\text{]} .$$

Объём, занимаемый арматурой топливных баков (трубопроводы, коллектор, арматура термостатирования, демпферы колебания жидкости и т.д.) рассчитан на основе статистики и берётся 3% от запаса топлива.

Объём занимаемый арматурой бака окислителя определяется по формуле:

$$V_{\text{ар}} = V \cdot 0,03 , \quad (8)$$

$$V_{\text{ар}} = 24,73239 \cdot 0,03 = 0,74197 \text{ [м}^3\text{]} .$$

Полный объём компонента топлива определяется по формуле:

$$V_{\text{п}} = V + V_{\text{пр}} + V_{\text{гп}} + V_{\text{ар}} \quad (9)$$

$$V_{\text{п}} = 24,73239 + 1,23662 + 0,24732 + 0,74197 = 26,9583 \text{ [м}^3\text{]} .$$

### **2.3 Расчет размеров резервуара**

Резервуары криогенных систем предназначены для накопления, хранения и выдачи жидких криогенных продуктов потребителю. Исходя из назначения, размеров и вида хранимого продукта криогенные резервуары отличаются по конструктивным особенностям.

Выделяют следующие группы резервуаров:

1. Стационарные резервуары;
2. Транспортные резервуары и цистерны;
3. Лабораторные сосуды.

Сосуды для хранения криогенных жидкостей заключены в герметичный кожух и пространство между ними используется для тепловой защиты внутреннего сосуда чаще всего на базе вакуумированных типов изоляции. Форма кожуха в основных очертаниях повторяет форму внутреннего сосуда.

Принципиальная конструктивная схема криогенного резервуара во многом определяется решением проблемы крепления внутреннего сосуда относительно кожуха. Обычно внутренний сосуд фиксируется относительно кожуха с помощью подвесок или опор. Их конструкция рассчитана на массу сосуда с жидкостью, а для транспортных резервуаров на дополнительные нагрузки, связанные с ускорением и торможением транспортного средства. На рисунке 1 основные конструктивные схемы криогенных резервуаров. Форму резервуара выбирают с учетом его назначения.

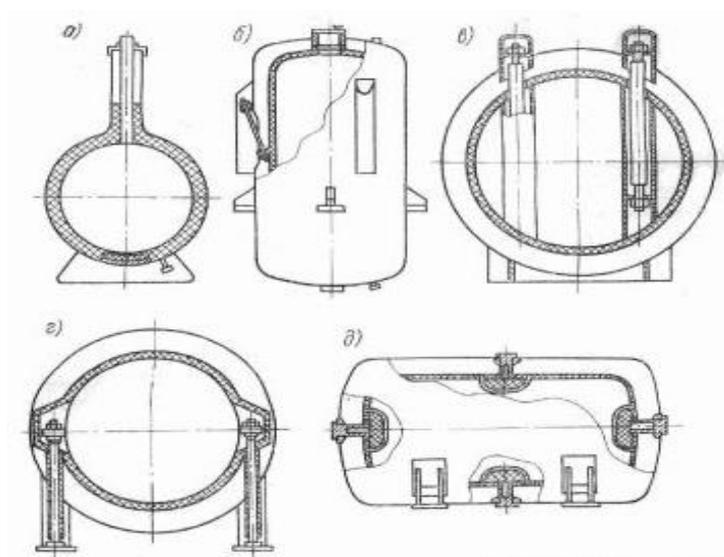


Рисунок 1 – Конструктивная схема криогенных резервуаров

Конструктивная схема криогенных резервуаров: а – крепление внутреннего сосуда на центральной горловине; б, в – крепление на подвесках; г – крепление на опорах; д – крепление на пластиковых опорах

С целью увеличения длины подвесок в крупных горизонтальных резервуарах они располагаются в специальных трубах, проходящих через сосуд с жидкостью полость труб сообщается с изоляционной полостью резервуара (рисунок 2).

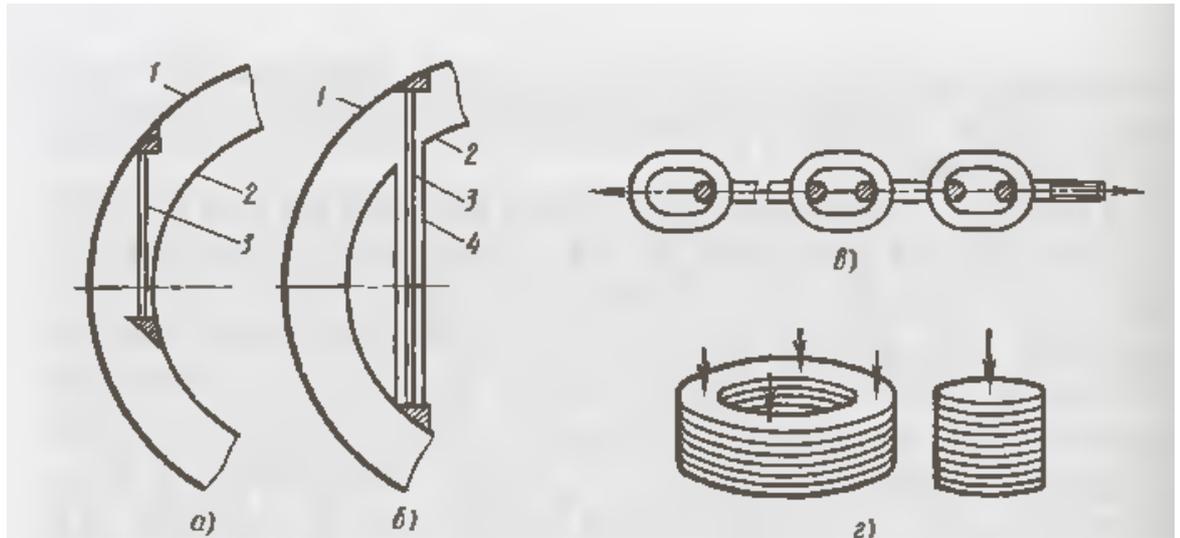


Рисунок 2 – Элементы тепловых мостов

Элементы тепловых мостов, обеспечивающих малые теплопритоки: а – вертикальная подвеска; б – удлиненная подвеска (1 – наружный кожух: 2 – внутренний сосуд: 3 – подвеска: 4 – труба); в – элемент цепной подвески; г – многослойные опоры из пластин.

### 2.3.1 Расчёт продольных размеров резервуара

Определяется радиус верхнего и нижнего днищ резервуара

$D = 3,68$  [м] – выбирается значение диаметра резервуара

$$R_{\text{цил}} = \frac{D}{2}, \quad (10)$$

$$R_{\text{цил}} = \frac{3,6}{2} = 1,8 \text{ [м]}.$$

$$R_{\text{сф}} = 1,3 \cdot R_{\text{цил}}, \quad (11)$$

$$R_{\text{сф}} = 1,3 \cdot 1,8 = 2,34 \text{ [м]},$$

$$R_{\text{сф}} = 2,34 \text{ [м]}.$$

Определяется высота верхнего и нижнего днища резервуара.

$$h_{\text{дн}} = R_{\text{сф}} - \sqrt{R_{\text{сф}}^2 - R_{\text{цил}}^2}, \quad (12)$$

$$h_{\text{дн}} = 2,34 - \sqrt{2,34^2 - 1,8^2} = 0,845 \text{ [м]},$$

$$h_{\text{дн}} = 0,845 \text{ [м]}.$$

Определяется объём днища резервуара

$$V_{\text{дн}} = \pi \cdot h_{\text{дн}}^2 \cdot \left( R_{\text{сф}} + \frac{h_{\text{дн}}}{3} \right), \quad (13)$$

$$V_{\text{дн}} = 3,14 \cdot 0,845^2 \cdot \left( 2,34 + \frac{0,845}{3} \right) = 5,87788 \text{ [м}^3\text{]},$$

$$V_{\text{дн}} = 5,87788 \text{ [м}^3\text{]}.$$

Размеры топливных резервуаров:

$$H_{\text{цил}} = \frac{4 \cdot (V_{\text{п}} - 2 \cdot V_{\text{дн}})}{\pi \cdot D^2}, \quad (14)$$

Подставляя значения бака горючего, получим:

$$H_{\text{цил}} = \frac{4 \cdot (119 - 2 \cdot 5,87788)}{3,14 \cdot 3,6^2} = 15,883 \text{ [м]}.$$

Полная высота топливного резервуара:

$$H_{\text{т}} = D + 2 \cdot h_{\text{дн}}, \quad (15)$$

Подставляя значения, получим:

$$H_{\text{т}} = 3,6 + 2 \cdot 0,845 = 5,29 \text{ [м]}.$$

Объём воздушной подушки:

$$V_{\text{вп}} = V_{\text{т}} \cdot \delta, \quad (16)$$

Подставляя значения, получим:

$$V_{\text{ВП}} = 119 \cdot 0,03 = 3,57 \text{ [м}^3\text{]}.$$

Высоту воздушной подушки от зеркала жидкости до полюса верхнего днища бака найдём из выражения:

$$V_{\text{ВП}} = \pi \cdot h_{\text{ВП}}^2 \cdot \left( R_{\text{сф}} + \frac{h_{\text{ДН}}}{3} \right), \quad (17)$$

Следовательно, высота воздушной подушки равна:

$$h_{\text{ВП}} = \sqrt{\frac{V_{\text{ВП}}}{\pi \cdot \left( R_{\text{сф}} + \frac{V_{\text{ВП}}}{3} \right)}}, \quad (18)$$

Подставляя значения, получим:

$$h_{\text{ВП}} = \sqrt{\frac{3,57}{3,14 \cdot \left( 0,845 + \frac{3,57}{3} \right)}} = 0,747 \text{ [м]}.$$

Высота уровня жидкости в баке:

$$H_{\text{Т}}^{\text{ж}} = H_{\text{Т}} - h_{\text{ВП}}, \quad (19)$$

Подставляя значения, получим:

$$H_{\text{Т}}^{\text{ж}} = 5,29 - 0,747 = 4,543 \text{ [м]}.$$

Гидравлический расчет заправочных систем заключается либо с определения напора, который должно развить расходопобуждающее устройство, чтобы обеспечить требуемый расход КТ, либо в определении расхода, который может обеспечить имеющееся устройство. В любом случае расчетная схема (рисунок 1.3) включает в себя емкость заправочной системы и бортовой бак, соединенные между собой трубопроводом определенной длины со встроенным побудителем расхода и содержащим некоторые элементы ЗС, обладающие гидравлическим сопротивлением. В газовых полостях могут быть различные пьезометрические давления, а уровни КТ в емкости и баке могут отличаться друг от друга на величину  $\Delta Z$ .

Расчетная величина разности высотных отметок бака РБ и резервуара определяется по следующей формуле:

$$\Delta Z = z_2 - z_1 \quad (20)$$

где  $z_1$  – расчетная высота уровня жидкости в резервуаре;  $z_2$  – расчетная высота уровня жидкости в баке РБ.

$$\Delta Z = 45 - 4,543 = 40,457 \text{ [м]}$$

#### **2.4 Система наддува топливных резервуаров**

Система наддува состоит из газовых баллонов высокого давления, запорных и регулирующих пневмоагрегатов и трубопроводов.

Рабочее тело системы наддува выбирается исходя из применяемых компонентов топлива. Газовый аккумулятор давления (ГАД) является простейшим типом АД и представляет собой сосуд (баллон) со сжатым газом, из которого газ выдается в газовую подушку емкости-хранилища. ЗС с подачей КТ вытеснением при использовании ГАД различаются по характеру поступления газа наддува: ЗС с импульсной подачей газа высокого давления и ЗС непрерывной подачей газа через редуктор давления.

Основное достоинства ГАД по сравнению с другими аккумуляторами давления состоит в том, что легко подобрать газ наддува, который не загрязнит КТ в процессе заправки. Даже насыщение поверхностного слоя КТ газом наддува может не нарушить требование к допустимой концентрации растворенного газа, если дополнительно насыщенный слой исключить из заправляемого объема.

Газ, необходимый для вытеснения КТ, хранится в батарее баллонов (ресиверной) под давлением (обычно 20 – 40 МПа). Вытеснительная система подачи с ГАД предполагает наличие на объекте запаса сжатого газа в размере, достаточном для выполнения заправки дозы КТ в бортовой бак ЛА. Потребное количество сжатого газа зависит от интенсивности таких сложных явлений при наддуве, как тепломассообмен между газовой подушкой и КТ в наддуваемой

емкости, теплообмен между газом в системе и ОС, деформация емкости и трубопровод при изменении давления среды внутри них.

#### **2.4.1 Определение давления в газовой подушке резервуара**

##### **2.4.1.1 Условия бескавитационной работы насоса в момент заправки**

Кавитационный запас прочности выбирается из диапазона

$$(5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5 \text{ [Па]})$$

$$\Delta p_k = 13,5 \cdot 10^4 \text{ [Па]}$$

Определяются суммарные потери давления.

Скорость течения компонента в магистрали:

$$V = 5 \text{ [м/с]}$$

Коэффициент местного сопротивления:

$$\zeta = 3,4$$

Суммарные потери давления, определяются по формуле:

$$\Delta p_{\Sigma} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot V^2}{2}, \quad (21)$$

$$\Delta p_{\Sigma} = 3,4 \cdot \frac{71 \cdot 5^2}{2} = 3017,5 \text{ [Па]}.$$

##### **2.4.1.2 Определяются гидростатического давления столба жидкости**

Высота столба жидкости:

$$H_{\text{ж}} = 11,507 \text{ [м]}$$

Гидростатическое давление столба жидкости определяется по формуле:

$$p_{\text{ст}} = \rho_{\Gamma} \cdot g \cdot H_{\text{ж}} \cdot n_x, \quad (22)$$

$$p_{\text{ст}} = 71 \cdot 9,81 \cdot 16,826 \cdot 1 = 11719,5 \text{ [Па]}.$$

##### **2.4.1.3 Расчёт минимального давления**

Давление насыщенных паров:

$$p_{\text{п}} = 101325 \text{ [Па]}$$

Минимальное давление определяется по формуле:

$$p_{min} = p_{п} + \Delta p_{к} + \Delta p_{\Sigma} - p_{ст}, \quad (23)$$

$$p_{min} = 101325 + 13,5 \cdot 10^4 + 3017,5 - 11719,5 = 227623 [\text{Па}].$$

#### 2.4.1.4 Условия бескавитационной работы насоса в конце заправки

Кавитационный запас прочности выбирается из диапазона

$$(5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5 [\text{Па}])$$

$$\Delta p_{к} = 13,5 \cdot 10^4 [\text{Па}]$$

Высота остатка незабора жидкости:

$$H_{нез} = 0,3091 [\text{м}]$$

Высота столба жидкости:

$$H_{жн} = H_{нез} + 1,115, \quad (24)$$

$$H_{жн} = 0,3091 + 1,115 = 1,4241 [\text{м}].$$

Гидростатическое давление столба жидкости определяется по формуле:

$$p_{ст} = \rho_{г} \cdot g \cdot H_{жн}, \quad (25)$$

$$p_{ст} = 71 \cdot 9,81 \cdot 1,4241 = 991,9 [\text{Па}].$$

Расчёт минимального давления:

$$p_{min} = p_{п} + \Delta p_{к} + \Delta p_{\Sigma} - p_{ст}, \quad (26)$$

$$p_{min} = 101325 + 13,5 \cdot 10^4 + 3017,5 - 991,9 = 238350,6 [\text{Па}].$$

Кавитационный запас прочности выбирается из диапазона

$$(3 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^4 [\text{Па}])$$

$$\Delta p_{к} = 6 \cdot 10^4 [\text{Па}]$$

Определяются потери давления заборном устройстве

Скорость течения компонента в магистрали:

$$V = 5[\text{м/с}]$$

Коэффициент местного сопротивления:

$$\zeta = 0,4$$

Суммарные потери давления, определяются по формуле:

$$\Delta p_{\Sigma} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot V^2}{2}, \quad (27)$$

$$\Delta p_{\Sigma} = 0,4 \cdot \frac{71 \cdot 5^2}{2} = 355[\text{Па}].$$

Высота остатка незабора жидкости:

$$H_{\text{нез}} = 0,901[\text{м}]$$

Гидростатическое давление определяется по формуле:

$$p_{\text{ст}} = \rho_{\text{ок}} \cdot g \cdot H_{\text{нез}}, \quad (28)$$

$$p_{\text{ст}} = 71 \cdot 9,81 \cdot 0,901 = 627,6[\text{Па}].$$

Расчёт минимального давления:

$$p_{\text{min}} = p_{\text{пок}} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\Sigma \text{зу}} - p_{\text{ст}}, \quad (29)$$

$$p_{\text{min}} = 101325 + 6 \cdot 10^4 + 355 - 627,6 = 161052,4[\text{Па}].$$

Из трех найденных минимальных давлений наддува в газовой подушке резервуара выбираем максимальное:

$$p_{\text{min}} = 238350,6[\text{Па}].$$

#### **2.4.2 Расчёт максимального давления в подушке резервуара**

Разница между максимальным и минимальным давлениями выбирается из диапазона ( $2 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$  [Па]):

$$D_p = 2,5 \cdot 10^5[\text{Па}]$$

Максимальное давление в подушке резервуара определяется по следующей формуле:

$$p_{max} = p_{min} + D_p, \quad (30)$$

$$p_{max} = 238350 + 2,5 \cdot 10^5 = 488350[\text{Па}].$$

#### 2.4.2.1 Расчёт номинального давления в подушке резервуара

Номинального давления в подушке резервуара определяется по следующей формуле:

$$p_{nom} = \frac{p_{min} + p_{max}}{2}, \quad (31)$$

$$p_{nom} = \frac{238350 + 488350}{2} = 363350[\text{Па}].$$

#### 2.4.3 Расчёт "холодной" системы наддува резервуара

##### 2.4.3.1 Определяется потребный объём аккумулятора давления

Коэффициент адиабаты азота:

$$k = 1,4$$

Начальное давление в аккумуляторе давления выбирается из диапазона ( $25 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$  [Па]):

$$p_H = 25,5 \cdot 10^6[\text{Па}]$$

Конечное давление в аккумуляторе давления:

$$p_K = 1,5 \cdot 10^6[\text{Па}]$$

Потребный объём аккумулятора давления определяется по следующей формуле:

$$V_{ад} = \frac{k \cdot p_{nom} \cdot V_3}{p_H - p_K}, \quad (32)$$

$$V_{ад} = \frac{1,4 \cdot 363350 \cdot 1400}{25,5 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^6} = 29,676[\text{м}^3].$$

Количество баллонов системы наддува резервуара:

$$Z_6 = 10[\text{шт}]$$

Радиус баллона определяется по следующей формуле:

$$R_6 = \sqrt{\frac{1}{Z_6} \cdot \frac{3 \cdot V_{\text{адок}}}{4 \cdot \pi}}, \quad (33)$$

$$R_6 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 29,676}{4 \cdot 3,14 \cdot 10}} = 0,892[\text{м}].$$

#### 2.4.3.3 Определение толщины стенки баллона аккумулятора давления

Коэффициент безопасности:

$$f = 2,0$$

Коэффициент прочности сварного шва выбирается из диапазона (0,85-0,95)

$$c = 0,88$$

Предел прочности материала ВТ6С

$$\sigma_B = 980 \cdot 10^6 [\text{Па}]$$

Толщина стенки баллона аккумулятора давления определяется по следующей формуле:

$$\delta_6 = \frac{p_n \cdot f \cdot R_6}{2 \cdot \sigma_B \cdot c}, \quad (34)$$

$$\delta_6 = \frac{25,5 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 0,892}{2 \cdot 980 \cdot 10^6 \cdot 0,88} = 0,026[\text{м}].$$

Определяется внешний объём баллона аккумулятора давления:

$$V_{\text{внб}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (R_6 + \delta_6)^3}{3}, \quad (35)$$

$$V_{\text{внб}} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot (0,892 + 0,026)^3}{3} = 3,23889[\text{м}^3].$$

Определяется объём оболочки баллона аккумулятора давления:

$$V_6 = V_{\text{внб}} - \frac{V_{\text{ад}}}{Z_6}, \quad (36)$$

$$V_6 = 3,23889 - \frac{29,676}{10} = 0,27129[\text{м}^3].$$

**2.4.3.4 Определяется масса конструкции баллона аккумулятора давления с учётом массы дополнительных устройств и элементов крепления**

Плотность материала баллона:

$$\rho_6 = 4450[\text{кг}/\text{м}^3]$$

Масса конструкции баллона аккумулятора давления определяется по формуле:

$$m_{\text{ад}} = V_6 \cdot \rho_6 \cdot Z_6, \quad (37)$$

$$m_{\text{ад}} = 0,27129 \cdot 4450 \cdot 10 = 12072,405 [\text{кг}].$$

**2.4.3.5 Определяется масса рабочего тела аккумулятора давления**

Температура газа наддува:

$$T_{\text{гн}} = 293[\text{К}]$$

Газовая постоянная для гелия:

$$R = 2078[\text{Дж}/\text{К} \cdot \text{кг}]$$

Масса рабочего тела аккумулятора давления определяется по следующей формуле:

$$m_{\text{рт}} = \frac{p_{\text{ном}} \cdot V}{R \cdot T_{\text{гн}}}, \quad (38)$$

$$m_{\text{рт}} = \frac{363350 \cdot 29,676}{293 \cdot 2078} = 17,710[\text{кг}].$$

**2.5 Расчёт времени заправки**

Исходные данные:

Расход подачи топлива заправочной системы:

$$Q_{\text{зс}} = 0,08831[\text{м}^3/\text{с}].$$

Время заправки:

$$t_{\text{запр.т}} = \frac{V_{\text{т}}}{Q_{\text{зс}}}, \quad (39)$$

$$t_{\text{запр.ок}} = \frac{26,9583}{0,088313} = 305,2 \text{ [с]}.$$

Таким образом, общее время заправки бака составляет  $t = 306$  секунд.

## 2.6 Тепловой расчет криогенной заправочной системы

Целью теплового расчета системы заправки является определение величины прогрева заправляемого продукта при его подаче в баки РБ.

Суммарный прогрев жидкости складывается из ее прогрева за счет теплопритоков из окружающей среды и прогрева за счет гидравлических потерь в коммуникациях:

$$\Delta T_{\text{с}} = \Delta T_{\text{о.с.}} + \Delta T_{\text{г}}, \quad (40)$$

Прогрев жидкости за счет теплопритоков из окружающей среды можно определить по следующей формуле:

$$\Delta T_{\text{о.с.}} = \sum Q / (c_p \cdot G), \quad (41)$$

где  $\sum Q$  – суммарный теплоприток к системе из окружающей среды;

$c_p = 9700$  – теплоемкость продукта;

$G$  – расход компонента топлива.

Прогрев жидкости за счет гидравлических потерь можно найти по формуле:

$$\Delta T_{\text{г}} = \Delta P / (\rho \cdot c_p), \quad (42)$$

где  $\Delta P = 238350,6$  – потери давления, Па;

$\rho = 71$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя значения, определим:

$$\Delta T_{\Gamma} \cong 238350,6 / (71 \cdot 9700) = 0,346 \text{ [K]}.$$

Для удобства расчета заправочную систему разбивают на отдельные участки. Теплоприток через слой теплоизоляции трубопроводов и рукавов можно определить по следующему выражению:

$$q_{\text{тр}} = (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{T}} \cdot (T_{\text{о.с.}} - T_{\text{к}}) \cdot l) / (\ln(d_{\text{н}}/d_{\text{вн}})), \quad (43)$$

где  $\lambda_{\text{T}}$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя;

$T_{\text{о.с.}}$  – расчетная температура окружающей среды;

$T_{\text{к}}$  – температура компонента;

$l$  – длина трубопровода;

$d_{\text{н}}$  и  $d_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний диаметр трубопровода.

Подставляя значения, определим:

$$q_{\text{тр}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot (293 - 17) \cdot 1000}{\ln\left(\frac{0,158}{0,15}\right)} = 116753,5 \text{ [Вт]}.$$

Теплоприток через штыковые соединения криогенных трубопроводов:

$$q_{\Sigma\text{шт}} = q_{\text{шт}} + q_{\text{изл.}} + q_{\text{о.г.}}, \quad (44)$$

где  $q_{\text{шт}}$  – теплоприток к штыку;

$q_{\text{изл.}}$  – теплоприток излучением;

$q_{\text{о.г.}}$  – теплоприток остаточных газов.

Рассмотрим каждую составляющую отдельно.

Определим теплоприток к штыку

$$q_{\text{шт}} = (1/R) \cdot (T_{\text{о.с.}} - T_{\text{к}}), \quad (45)$$

где  $R$  – тепловое сопротивление разъема.

$$R = l/(\lambda_T \cdot F), \quad (46)$$

где  $l$ – длина штыкового разъема;

$\lambda_T$ – коэффициент теплопроводности материала;

$F$ – площадь контакта.

Подставляя значения, определим:

$$R = 0,75/(3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 17,662) = 12,132 \text{ [К/Вт]}.$$

$$q_{\text{шт}} = (1/12,132) \cdot (293 - 17) = 22,8 \text{ [Вт]}.$$

Определим теплоприток излучением

$$q_{\text{изл.}} = (((\sigma_s \cdot 10^8)/((1/\varepsilon_1) + ((F_1/F_2) \cdot ((1/\varepsilon_2) - 1)))) \times \\ \times [(T_{\text{о.с.}}/100)^4 - (T_{\text{к.}}/100)^4] \cdot F_1, \quad (47)$$

где  $\sigma_s$ – постоянная Стефана-Больцмана;

$F_1$  и  $F_2$ – площади поглощающей и излучающей поверхностей, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ – степень черноты поверхностей.

Подставляя значения, получим:

$$q_{\text{изл.}} = (((5,77 \cdot 10^{-8} \cdot 10^8)/((1/0,05) + (1 \cdot ((1/0,05) - 1)))) \times \\ \times [(293/100)^4 - (17/100)^4] \cdot 22,75 = 248,1 \text{ [Вт]}.$$

Определим теплоприток остаточных газов:

$$q_{\text{о.г.}} = (2 \cdot \pi \cdot (T_{\text{о.с.}} - T_{\text{к.}}) \cdot r_1 \cdot l)/((r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)) + (2 \cdot \beta \cdot L \cdot (r_1/r_2) + 1)), \quad (48)$$

где  $r_1$  и  $r_2$ – радиусы поглощающей и излучающей поверхностей, м;

$\beta$ – коэффициент аккомодации остаточного газа.

$L$ – длина свободного пробега молекулы, м.

$$L = (\kappa/P) \cdot (1/(1 + (T_y/T_{\text{ср}}))), \quad (49)$$

где  $P$  – давление остаточных газов в изоляции, МПа;

$\kappa = 8,42 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_y = 133$  – постоянная, зависящая от рода газов (водород), Н/м и К соответственно;

$T_{cp}$  – средняя температура газов, К.

$$T_{cp} = (T_{o.c.} - T_k)/2, \quad (50)$$

Подставляя значения, получим:

$$T_{cp} = (293 - 17)/2 = 138 \text{ [К]}.$$

$$L = (8,42 \cdot 10^{-3}/1,33) \cdot (1/(1 + (133/138))) = 0,0032 \text{ [м]}.$$

$$q_{o.g.} = (2 \cdot 3,14 \cdot (293 - 17) \cdot 0,1 \cdot 0,75)/((0,1 \cdot \ln(0,1/0,1)) + (2 \cdot 1 \cdot 0,0032 \cdot (0,1/0,1) + 1)) = 129,2 \text{ [Вт]}.$$

Подставляя значения, определим теплоприток через штыковые соединения криогенных трубопроводов:

$$q_{\Sigma шт} = 22,8 + 248,1 + 129,2 = 400,1 \text{ [Вт]}.$$

Величина теплопритока, проходящего по стыковочному соединению через сильфон:

$$q_{\Sigma c} = q_c + q_{из}, \quad (51)$$

где  $q_c$  – теплоприток непосредственно через сильфон, Вт;

$q_{из}$  – теплоприток через изоляцию, Вт.

Определим значение теплопритока непосредственно через сильфон:

$$q_c = \lambda \cdot (F/L) \cdot \Delta T, \quad (52)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала сильфона, Вт/м·К;

$F$  – площадь поперечного сечения сильфона;

$$F = (\pi/2) \cdot (D_{\text{н.с}} + D_{\text{вн.с}}) \cdot S, \quad (53)$$

где  $D_{\text{н.с}} = 0,195$  и  $D_{\text{вн.с}} = 0,15$ – наружный и внутренний диаметр стенки соответственно, м;

$S = 0,002$ – толщина стенки сальфона, м.

Подставляя значения, определим:

$$F = (3,14/2) \cdot (0,195 + 0,15) \cdot 0,002 = 0,00108 \text{ [м}^2\text{]}.$$

$L$ – развернутая длина сальфона, м;

$$L = (D_{\text{н.с}} - D_{\text{вн.с}}) \cdot n + (\pi/2 - 1) \cdot l, \quad (54)$$

где  $n$ – число гофров по длине сальфона, шт.;

$l = 0,15$ – длина сальфона, м.

Подставляя значения, определим:

$$L = (0,195 - 0,15) \cdot 9 + \left(\frac{3,14}{2} - 1\right) \cdot 0,15 = 0,491 \text{ [м]}.$$

$$q_c = 13,18 \cdot (0,00108/0,491) \cdot 5,18 = 0,15 \text{ [Вт]}.$$

Определим значение теплопритока через изоляцию:

$$q_{\text{из}} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta T \cdot (l/\ln(D/D_{\text{н.с}})), \quad (55)$$

$$q_{\text{из}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 13,18 \cdot 5,18 \cdot (0,15/\ln(0,158/0,15)) = 1237,75 \text{ [Вт]}.$$

Подставляя значения, определим величину теплопритока, проходящего по стыковочному соединению через сальфон:

$$q_{\Sigma c} = 0,15 + 1237,75 = 1237,9 \text{ [Вт]}.$$

Теплоприток по опорным элементам коммуникаций (пальчиковые опоры) определяют по следующему выражению:

$$q_{\text{оп}} = \lambda \cdot (F/l) \cdot \Delta T, \quad (56)$$

где  $\lambda$ – коэффициент теплопроводности опор, Вт/м·К;

$l$  – расчетная длина опоры, м;

$F$  – площадь сечения опоры, м<sup>2</sup>;

$$F = (\pi/4) \cdot d^2, \quad (57)$$

где  $d$  – диаметр опоры, м;

$\Delta T$  – разность наружной и внутренней температур, К;

$$\Delta T = T_{\text{н}} - T_{\text{вн}}, \quad (58)$$

Подставляя значения, определим:

$$F = (3,14/4) \cdot 0,2^2 = 0,0314 \text{ [м}^2\text{]}.$$

$$\Delta T = 293 - 17 = 276 \text{ [К]}.$$

$$q_{\text{оп}} = 0,3 \cdot (0,0314/0,1) \cdot 276 = 26 \text{ [Вт]}.$$

Теплоприток по арматуре:

$$q_{\text{арм}} = q_{\text{из}} + q_{\text{шт}} + q_{\text{шт.с}}, \quad (59)$$

где  $q_{\text{из}}$  – теплоприток через вакуумную изоляцию;

$q_{\text{шт}}$  – теплоприток, проходящий по штоку, Вт;

$q_{\text{шт.с}}$  – теплоприток, поступающий к стыковому соединению, Вт.

Определим значение теплопритока через вакуумную изоляцию:

$$q_{\text{из}} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta T \cdot ((l_1/\ln(D_1/d_1)) + (l_2/\ln(D_1/d_2))), \quad (60)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности остаточного воздуха в изоляции при вакууме, Вт/м·К;

$\Delta T = 276$  – разность наружной и внутренней температур, К;

Подставляя значения, определим:

$$q_{\text{из}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 276 \cdot ((1000/\ln(0,158/0,15)) + (1000/\ln(0,158/0,15))) = 86731,2 \text{ [Вт]}.$$

Определим значение теплопритока, проходящего по штоку:

$$q_{\text{шт}} = \Delta T/R, \tag{61}$$

где  $R$ – термическое сопротивление по штоку.

$\lambda_i$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К.

Подставляя значения, определим:

$$q_{\text{шт}} = 276/12,132 = 22,7 \text{ [Вт]}.$$

Подставляя значения, определим теплоприток по арматуре:

$$q_{\text{арм}} = 86731,2 + 22,7 + 22,7 = 86776,6 \text{ [Вт]}.$$

Прогрев жидкости за счет теплопритоков из окружающей среды

$$\Delta T = 1237,9/(9700 \cdot 6,27) = 0,203 \text{ [К]}.$$

Величину прогрева продукта в системе заправки:

$$\Delta T_{\text{пр}} = 0,203 + 0,346 = 0,549 \text{ [К]}.$$

Температура жидкого компонента на входе в наполнительное соединение криогенной системы заправки испытательного стенда:

$$T_{\text{н.с}} = T_{\text{рез}} + \Delta T_{\text{пр}}, \tag{62}$$

где  $T_{\text{рез}}$ – температура в резервуаре заправочной системе, К;

$\Delta T_{\text{пр}}$ – величина прогрева, К.

Подставляя значения, определим:

$$T_{\text{н.с}} = 17 + 0,549 = 17,549 \text{ [К]}.$$

Давление, создаваемое в системе при оптимальном режиме заправки:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{равн}} + \Delta P - \Delta Z \cdot g \cdot \rho, \tag{63}$$

где  $P_{\text{равн}}$  – давление, равновесное температуре жидкого компонента, поступающего на вход в РБ, Па;

$\Delta P = 238350,6$  – потери давления в системе при заправке, Па;

$\Delta Z = 40,457$  – разность высотных отметок баков РБ и резервуара, м;

$g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;

$\rho = 71$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя значения, определим:

$$P_{\text{н}} = 488350 + 238350,6 - 40,457 \cdot 9,81 \cdot 71 = 698522 \text{ [Па]}.$$

В целях упрощения и удешевления конструкции заправочных систем заправку при большом и малом расходе целесообразно проводить по тем же заправочным магистралям. Переключение расходов осуществляется по электрическим командам с борта РН в зависимости от уровня продукта.

Весовой принцип подачи криогенных компонентов топлива в баки РН использовать не удастся, т. к. в процессе проведения заправки трудно контролировать количество образующихся и улетучивающихся паров продуктов.

## 3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

### 3.1 Система заправки жидким водородом

Заправочное оборудование жидким водородом на СК предназначено для приема, хранения, подготовки КРТ и заправки РБ.

Состоит из следующих систем:

1. Система заправки водородом;
2. Система автоматизированного дистанционного управления (САДУ) заправкой;
3. Система сбора и нейтрализации промстоков;
4. Система автоматизированного дистанционного управления (САДУ) сбором и нейтрализацией промстоков;
5. Система контроля заправки.

### 3.2 Пневмогидравлическая схема

Пневмогидравлическая схема заправочной системы жидким водородом— это один из основных документов, отражающий в схемном решении облик системы. На ней показаны средства хранения компонентов, обвязочная система резервуаров, пути движения потоков криогенной жидкости для заправки баков потребителя, способы подачи продукта, средства охлаждения компонентов топлива, различная необходимая арматура, дренажные и предохранительные устройства, приборное обеспечение, пневмо- и электроуправление, т.е. то, что требуется для выполнения системой заправки заданного для нее технического задания по исходным данным разработчика разгонного блока.

### 3.3 Состав системы

Система заправки жидким водородом состоит из:

1. Хранилища, в котором размещены цилиндрические резервуары; воздушный испаритель; газоразливочные эстакады для слива жидкого водорода из железнодорожных цистерн; рекуперативного теплообменника, предназначенного для охлаждения вытесняемого из хранилища жидкого

водорода потоком жидкого водорода, сливаемого из бака РБ при термостатировании;

2. Магистральных криогенных трубопроводов;
3. Блока охлаждения, состоящего из двух резервуаров жидкого водорода объемом 12 м<sup>3</sup> каждый со встроенными теплообменниками с капиллярно-пористым покрытием, эжекторами и струйными насосами с соответствующей обвязкой трубопроводами и арматурой;
4. Концевых блоков арматуры с фильтрами и узлами стыковки с РБ;
5. Оборудования дренажной площадки;
6. Средств подачи технологических, регламентных и управляющего газов, трубопроводов, редукторов, арматуры, фильтров;
7. Средств вакуумирования теплоизоляционных полостей;
8. Средств измерения параметров давления, уровня и температуры;
9. Средств газоаналитического контроля чистоты подготовки бака РБ и оборудования системы: газоанализаторов, определяющих концентраций кислорода в азоте, кислорода в водороде, а также азота в водороде;
10. Система дистанционного управления.

Клапаны – это устройства для герметичного разделения двух участков трубопровода. Различают клапаны запорные (отсечные), дренажные, предохранительные, сливные и обратные.

Вентили и дроссели устанавливают в местах жесткого отсечения резервуара или части системы.

Задвижки используют для полного или частичного перекрытия сечения запорным органом. Их устанавливают на трубопроводах большого диаметра.

Вентили и задвижки используют для выполнения вспомогательных технологических операций в процессе заправки. Пневмогидравлическая схема оснащена приборным обеспечением – датчиками давления, датчиками температуры, расходомерами, в большей части дистанционно управляемыми для дистанционного и автоматизированного проведения технологического процесса заправки, а также визуальными приборами.

Заправочные системы жидким водородом также снабжены приборами контроля качества подготовки системы, к примеру, основного продукта с дистанционным управлением, в том числе хроматографическими.

### **3.4 Разработка системы заправки**

Разработку систем заправки необходимо осуществлять в соответствии с техническим заданием на заправочную систему и исходными данными разработчиков разгонного блока.

При разработке схемы заправочных систем стоит помнить, что эти системы для ракетно-космической техники разрабатываются в единственном экземпляре. В схемных решениях следует учитывать возможные доработки, которые могут возникнуть в процессе отработки системы.

### **3.5 Основные и вспомогательные операции**

При разработке пневмогидравлической схемы заправочной системы выделяют основные и вспомогательные операции.

К основным операциям относятся:

1. Захолаживании (охлаждение) коммуникаций, заполнение насосов и магистралей;
2. Заправка при большом расходе;
3. Заправка при малом расходе;
4. Термостатирование продукта в баках РБ, направленное на достижение и поддержание в течение заданного времени уровня жидкости и температуры;
5. Слив из коммуникаций и шлангов в сливную емкость или в коммуникации системы;
6. Продувка коммуникаций;
7. Слив из баков РБ в случае отмены пуска или аварийной ситуации.

К вспомогательным операциям относятся:

1. Прием компонента в резервуары системы;
2. Слив из коммуникаций;
3. Перекачивание насосами;

4. Сбор проб или выдача продукта в прибор для его анализа.

При заправке в баки ракеты, разгонного блока и космического корабля охлажденного продукта в целях достижения и поддержания в течение заданного времени температуры и уровня продукта проводят операцию термостатирования.

Для поддержания заданного уровня продукта в объекте термостатирования в течение необходимого времени система заправки в своем составе должна иметь приемный резервуар, функции которого обычно выполняет один из резервуаров хранилища.

Пневмогидравлическая схема наземной системы заправки должна быть состыкована с пневмогидравлической системой РБ.

## 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 4.1 Пневмогидравлическое испытание

#### 4.1.1 Гидравлическое испытание

Гидравлическое испытание – необходимая процедура, свидетельствующая о надёжности оборудования и трубопроводов, работающих под давлением, в течение всего срока их службы, что крайне важно, учитывая серьёзную опасность для жизни и здоровья людей в случае их неисправностей и аварий.

##### 4.1.1.1 Ход процедуры

В испытываемом оборудовании, трубопроводе или системе создаётся пробное давление, которое превышает рабочее на 20 %. При этом контролируют повышение давления по двум независимым манометрам или каналам измерений, на этом этапе допускается слабое колебание давления. В процессе набора давления должны быть приняты меры по исключению скопления газовых пузырей в полостях, заполненных жидкостью.

После, в течение времени выдержки, оборудование находится под повышенным давлением, которое не должно падать. Затем давление понижается до рабочего. При выполнении этих фаз персонал должен находиться в безопасном месте. После понижения давления, рабочий персонал проводит визуальный осмотр оборудования и трубопроводов в доступных местах.

##### 4.1.1.2 Оценка результатов

Оборудование и трубопроводы считаются выдержавшими гидравлические испытания, если в процессе испытаний и при осмотре не обнаружено различных дефектов.

#### 4.1.2 Пневматическое испытание

Иногда допускается замена гидравлических испытания пневматическими. В некоторых случаях пневматические испытания являются подготовительным

этапом гидравлических испытаний. Они проходят аналогично гидравлическим. Дефекты легко обнаружить, так как, на их месте вздуваются мыльные пузыри, поскольку предварительно места возможной неплотности покрывают мыльным раствором. Таким способом определяется плотность оборудования.

#### **4.1.3 Определение параметров гидравлических (пневматических) испытаний**

##### **4.1.3.1 Определение давления**

Давление гидравлических испытаний должно быть не менее определяемого по формуле (нижняя граница):

$$P_h = K_h P \frac{[\sigma]^{Th}}{[\sigma]^T} \quad (64)$$

и не более давления, при котором в испытуемом изделии возникнут общие мембранные напряжения, равные  $1,35[\sigma]^{Th}$ , а сумма общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений достигнет  $1,7[\sigma]^{Th}$  (верхняя граница).

где,  $P$  – расчётное давление при испытаниях на предприятии-изготовителе или рабочее давление при испытаниях после монтажа и в процессе эксплуатации,

$[\sigma]^{Th}$  – номинальное допустимое напряжение при температуре гидравлических испытаний  $T_h$  для рассматриваемого элемента конструкции,

$[\sigma]^T$  – номинальное допускаемое напряжение при расчетной температуре  $T$  рассматриваемого элемента конструкции.

$K_h$  – коэффициент.

Для элементов, нагружаемых наружным давлением, должно также выполняться условие:

$$P_h \leq 1,25[P]$$

Гидравлическое испытание должно проводиться определенным давлением, определяемым по формуле:

$$P_h = 1,25P - 0,1\text{Мпа} \quad (65)$$

Значения давления гидравлических испытаний для оборудования и сборочных единиц трубопроводов указаны предприятием-изготовителем в паспорте оборудования и свидетельстве об изготовлении деталей и сборочных единиц трубопровода.

Параметры давлений гидравлических (пневматических) испытаний систем должны быть определены организацией-изготовителем, которая должна сообщить владельцу оборудования и трубопроводов, которое уточнит эти значения на основе значений, находящихся в паспортах оборудования и трубопроводов, комплектующих систему.

#### **4.1.3.2 Определение времени выдержки**

Время выдержки под пробным давлением регламентируется разработчиком проекта, однако не может быть менее 10 мин. При отсутствии указаний в проектной документации время выдержки выбирается исходя из данных таблицы 2.

Таблица 2 – Время выдержки при ПГИ

Толщина стенки,мм	Время выдержки,мин
До 55	10
Свыше 55 до 100	25
Свыше 100	40
Для литых, неметаллических и многослойных сосудов независимо от толщины стенки	70

## **4.2 Пневмогидроиспытание ПГС заправочной системы РБ жидким водородом**

Испытания на прочность под воздействием избыточного давления имеют следующие цели:

1. Свидетельство прочности сборочных единиц КА;
2. Согласование окончательных размеров сборочных единиц РБ.

Испытания на прочность осуществляются путем нагружения объекта испытаний (ОИ) избыточным давлением. Давление следует выбирать исходя из соотношений:

1. Если рабочее давление ОИ меньше 0,5 МПа, то испытательное давление принимается равным полуторам рабочим давлениям;
2. Если рабочее давление превышает 0,5 МПа, то испытательное давление принимается равным 1.25 рабочего давления.

При производстве КА используются два метода проверки на прочность: гидравлическая и пневматическая. Так как жидкость практически несжимаема, а воздух сжимаем, пневматические испытания более опасны, поскольку наступает разрушение ОИ. После гидравлических испытаний необходима сушка, именно поэтому невзирая на дополнительные затраты проводят пневматические испытания. Так же гидравлические испытания некоторых элементов КА невозможны.

Технологический процесс испытаний на прочность разрабатывается с учетом конструкторской документации (КД).

Основные операции, входящие в процесс испытаний на прочность к воздействию давления:

1. Внешний осмотр ОИ, проверка оформления технологической документации.
2. Сборка схемы испытаний:
  - установка технологических заглушек;
  - подсоединение ОИ к пневмо- или гидростенду.

## 5 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 5.1 Криогенные транспортные средства доставки жидкого водорода

#### 5.1.1 ТРЖВ-20

Первым агрегатом для транспортировки жидкого водорода была автоцистерна ТРЖВ-20, разработанная в 1966 г. на базе автоприцепа для доставки жидкого водорода на испытательный стенд предварительной отработки жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с завода-производителя водорода. Для его доставки к стенду применялась емкость объемом не менее 20 м<sup>3</sup> и рабочим давлением 0.7 МПа.



Рисунок 3 – Транспортный резервуар модели ТРЖВ-20  
для транспортировки жидкого водорода

Следующий экземпляр этой цистерны был разработан с полезным объемом емкости на 24 м<sup>3</sup>.

Внутренний сосуд транспортного агрегата ТРЖВ-20 был изготовлен из сплава алюминия АМг5, оболочка – из стали О9Г2С. Крепление осуществлялось при помощи цепных растяжек и текстолитовых опор.

Таблица 3 – основные характеристики резервуара модели ТРЖВ-20

Геометрический объем сосуда, м <sup>3</sup>	20,0
Рабочее давление, МПа	0,7
Масса перевозимого водорода, т	1,3
Теплоизоляция	Порошково-вакуумная
Потери продукта, % в сутки	2,7
Способ слива продукта	Наддув сторонним источником

### 5.1.2 Железнодорожная цистерна 8Г514

Следующим агрегатом для транспортирования жидкого водорода стала железнодорожная цистерна модели 8Г514, материалом внутреннего сосуда которой послужил алюминиевый сплав АМЦС, стойкий при низких температурах.



Рисунок 4 – Железнодорожная цистерна модели 8Г514 для транспортировки жидкого водорода

Таблица 4 – основные характеристики железнодорожной цистерны 8Г514

Геометрический объем сосуда, м <sup>3</sup>	34,0
Рабочее давление, МПа	0,25
Масса перевозимого водорода, т	2,2
Теплоизоляция	Порошково-вакуумная
Суточные потери продукта при транспортировке, %	2,4
Способ слива продукта	Наддув сторонним источником

Недостатки:

1. Малоэффективна теплоизоляция сосуда емкости;
2. Недостатки конструкции запорной арматуры.

### **5.2 Модернизация железнодорожной цистерны 8Г514.**

При модернизации железнодорожной цистерны модели 8Г514 для транспортировки жидкого водорода требуется решить следующие задачи:

1. Снижение потерь водорода при транспортировке с 2,4 % в сутки до 1,4...1,6 % в сутки;
2. Усовершенствование запорной арматуры.

Для решения проблемы потерь водорода при транспортировке было принято решение о совмещении силовых элементов в схеме сосуд – оболочка – рама платформы с выбором более эффективной схемы теплоизоляции емкости, так как при транспортировке железнодорожным транспортом наиболее жесткие требования. Требуется внедрение прогрессивной технологии нанесения слоисто-вакуумной теплоизоляции и засыпки межстенного пространства емкости теплоизолирующим порошком – аэрогелем с последующим вакуумированием.

Многослойно(экранный)-порошково-вакуумная изоляция представляет собой несколько слоев вакуумно-порошковой изоляции разделенной экранами в виде тонкой металлической фольги. Такой вид изоляции незаменим в тех случаях, когда требуется наилучшая изоляция с минимальным весом и

объемом. Её целесообразно использовать прежде всего в транспортируемых, а также в стационарных сосудах малой емкости с большой удельной поверхностью.

Многослойно-порошково-вакуумная изоляция на примере железнодорожных цистерн с данной изоляцией позволит снизить потери жидкого водорода при транспортировке с 2,4% до 1,2% в сутки.

Проблему несовершенства криогенной запорной арматуры можно решить с помощью замены исходны запорных вентилях на криогенные запорные клапаны типа DJ-B со средним штоком. Данные криогенные запорные проходные сальниковые клапаны относятся к стандартным криогенным вентилям со средней длиной штока. Они используются при ограничении в пространстве при монтаже изделия. Латунный кожух штока, имеющий низкую теплоемкость, изолирует маховик и трущиеся поверхности от низких температур, что предотвращает образование намерзания на корпусе запорного вентиля, что приводит к дополнительному теплопритоку к жидкому водороду в процессе работы с компонентом.

**Вывод:** разработаны конструкционные и теплоизоляционные решения, работоспособные при температуре жидкого водорода, позволяющие улучшить эксплуатационные характеристики железнодорожной цистерны модели 8Г514 для транспортировки жидкого водорода.

## 6 МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ

Опасности эксплуатации водородного оборудования обусловлены следующими факторами:

1. Образованием пожаровзрывоопасных смесей паров водорода с воздухом, т.е. “тремучего газа”;
2. Образованием детонирующих смесей из жидкого водорода и твердого кислорода;
3. Низкой энергией воспламенения и большой скоростью распространения пламени;
4. Низкой температурой жидкости (20 К).

Сам по себе водород не токсичен, но его обильное испарение в замкнутом объеме сооружения приводит к относительному снижению содержания кислорода и асфиксии персонала. Здесь картина получается такая же, как и при больших утечках азота в помещениях. Коварство такого удушья заключается в том, что пострадавший вначале не испытывает никаких отрицательных явлений вроде слабости, головокружения и т.п., а просто внезапно теряет сознание.

Смеси водорода с воздухом воспламеняются в весьма широком диапазоне концентраций водорода - от 4 до 75% в объёмных долях и детонируют в диапазоне от 18,3 до 74%. Ни одно другое горючее не имеет такого широкого диапазона воспламенений. В смеси с чистым кислородом эти диапазоны еще шире: по воспламенению – от 4 до 96% и по детонации от 15 до 94% по объему.

Энергия воспламенения смесей ничтожно мала всего  $19 \cdot 10^{-6}$  Дж. Столько энергии выделяется от электростатического разряда на одежде или при расчесывании волос. Взрыв 1кг воздушно-водородной смеси, компоненты которой находятся в стехиометрическом соотношении, эквивалентен взрыву 10,6кг тринитротолуола. Наиболее взрывоопасен газообразный водород. Сообщения о его взрывах от различных загрязнений поступали из многих стран. В системах заправки образование облаков газа и смесей с воздухом

может возникнуть при проливах и испарениях жидкого водорода, при выполнении дренажных операций и при подсосе воздуха внутрь резервуаров, теплообменников-охладителей, через фланцевые соединения трубопроводов, если давление в них станет ниже атмосферного.

При проливах малых количеств жидкого водорода, порядка нескольких литров, он испаряется практически мгновенно и при отсутствии источников воспламенения опасности взрыва или пожара практически нет. При проливах же нескольких сотен литров водорода и более грунт или бетон замерзают, окружающий воздух конденсируется и образуется облако с кристаллами воздуха и воды. Облако представляет собой детонирующую смесь, имеет плотность большую плотности воздуха, и поэтому некоторое время держится у поверхности земли, пока не нагреется. Обычно высота видимой части облака составляет 2.0-2,5м, но и в своей верхней невидимой части оно остаётся взрывоопасным. При воспламенении нижней части облака образуется шаровое пламя, поднимающееся вверх со скоростью примерно 6,5м/с.

Опасность взрыва пролитого водорода уменьшается при увеличении скорости его испарения. Опытами было установлено, что при выливании водорода на гравий скорость подъёма облака составляет 1.5-1,8 м/с, а при выливании на асфальт или стальные плиты 0,6-1,2 м/с. В первом случае водород в атмосфере будет рассеиваться быстрее и продолжительность существования взрывоопасной ситуации сократится. Следовательно, целесообразно окружать резервуары хранилища водорода подушкой из раздробленного камня, гравия или щебня.

В опытах с выливанием жидкого водорода образующиеся облака паров простирались на высоту до 60 м в направлении ветра. При больших проливах водорода глубина лужи уменьшалась со скоростью 8... 12мм/с. Большие проливы могут произойти при разрушении резервуара или трубопровода. При этом образуются огромные объемы воздушно-водородной смеси. Так при проливе 27т жидкого водорода может образоваться 950т детонирующей смеси.

В процессе эксплуатации водородного оборудования нельзя исключить возможность попадания воздуха внутрь системы заправки и постепенного накопления кристаллов  $O_2$  и  $N_2$  в жидком водороде. Примерно 10% из них выпадает в виде твёрдого осадка на дне резервуаров и карманов, откуда вымывание в процессе заправки баков ЛА маловероятно, а 90% находится во взвешенном состоянии. Если толщина осадка кристаллов  $O_2$  достигает 10мкм, то смесь жидкого водорода и твёрдого кислорода может детонировать. Для предотвращения взрыва рекомендуется через каждые 5-10 циклов заполнения-опоржнения резервуары отогревать до 100-110К, выше температуры кипения жидкого кислорода и вентилировать вначале азотом, а затем воздухом, чтобы кислород испарился и был удалён из резервуара.

Перед заполнением жидким водородом резервуар должен быть тщательно подготовлен: воздух в нём заменяют на газообразный азот, а азот - на испарившийся водород. Одновременно с этими заменами резервуар постепенно охлаждается. Окончательное захлаживание происходит при приёме жидкого водорода из железнодорожных цистерн.

Замена воздуха на азот может выполняться двумя способами.

Первый способ используется с применением высокопроизводительных механических вакуумных насосов. Вначале воздух из резервуара откачивается до давления примерно 3000Па. Затем резервуар наддувается азотом до атмосферного давления, даётся выдержка по времени, чтобы азот равномерно распределился по всему объёму резервуара и снова вакуумируется до 3000 Па. Содержание кислорода в резервуаре контролируется автоматическим газоанализатором. Процесс заполнения и вакуумирования продолжается до тех пор, пока концентрация кислорода не станет ниже допустимой величины - 4%.

Второй способ заключается в многократном полоскании резервуара парами азота. Резервуар наддувается азотом до 2-3атм, а затем смесь азота и воздуха выбрасывается наружу через дренаж до 0,2-0,3 атм, чтобы предотвратить натекание воздуха внутрь. Цикл “наддув - сброс” повторяется

большее число раз по сравнению с первым способом, пока остаточное содержание кислорода не станет ниже допустимого значения.

На следующем этапе подготовки резервуара азот замещается на газообразный водород так же методом полоскания со сбросом через дренаж в атмосферу, но уже через работающую установку со сжиганием выбрасываемого водорода. Далее резервуар заполняется жидким водородом с одновременным захлаживанием его металлоконструкции и изоляции. Для предотвращения попадания воздуха в заполненный резервуар он наддувается гелием до 0,3-0,5МПа, а система поддержания избыточного давления должна поддерживать давление постоянным за все время хранения жидкого водорода.

Чтобы исключить загрязнение водорода в процессе заправки все трубопроводы и баки ЛА сначала вентилируются газообразным азотом, а затем водородом. После опорожнения наземного резервуара или бака РН в случае несостоявшегося старта остатки водорода и его пары необходимо удалить, т.к. высока вероятность пожара или взрыва. Для этого полосканием водород замещают на азот, а азот на воздух, т.е. приводят ёмкость в исходное состояние.

Ввиду малой энергии воспламенения смесей водорода с воздухом или с кислородом необходимо предусмотреть меры борьбы с зарядами статического электричества, которые могут накапливаться даже в хорошо заземлённых конструкциях заправочного оборудования. Электропроводность жидкого водорода равна  $10^{-17}$  Ом·см<sup>-1</sup>, т.е. намного меньше, чем у других углеводородных горючих. Поэтому время релаксации зарядов в жидком водороде в 1000 раз больше, чем в углеводородных горючих и стекают заряды в заземление значительно медленнее.

Электростатическую опасность жидкого и газообразного водорода следует оценивать, по трём показателям:

1. По способности жидкости или газа к накоплению зарядов;
2. По энергии искры, способной к воспламенению вещества;
3. По способности горючего к воспламенению или детонации от искры.

В газообразном водороде при расстоянии между электродами в 1см электрический разряд происходит при напряжённости электрического поля в 17500 В/см. Для воспламенения воздушно-водородной смеси (при стехиометрическом соотношении по кислороду) выделяемая энергия должна быть не менее  $19 \cdot 10^{-6}$  Дж, а разряд  $1,1 \cdot 10^{-9}$  Кл. Такой разряд получается при токе 1,1 мкА в течение 1мсек.

Двухфазные потоки, возникающие при захолаживании трубопроводов, способствуют большему накоплению зарядов по сравнению с чистыми жидкостями.

Электрооборудование и измерительные приборы для водородных систем должны изготавливаться во взрывобезопасном исполнении, а шкафы с оборудованием должны быть герметичными и наддуваться азотом до 0,01-0,02 МПа.

Безопасный сброс паров водорода через дренажную магистраль получается путём выполнения следующих операций:

1. Разбавления потока паров водорода газообразным азотом до безопасной концентрации ниже 4%;
2. Подогрева паров водорода до температуры выше температуры конденсации воздуха, например, смешением с горячим азотом;
3. Продувки дренажной магистрали до начала сброса паров водорода и после газообразным азотом со скоростью не менее 0,1 м/с и десятикратным обменом по объёму магистрали;
4. Сжигание смеси на срезе дренажной трубы с целью сокращения зоны опасных выбросов.

Хранилище и коммуникации водорода должны размещаться на безопасном расстоянии от других объектов заправочного комплекса. Выбор дистанции зависит от количества хранимого водорода. Например, для объёма хранилища более 455 м<sup>3</sup> рекомендуются следующие расстояния:

1. От хранилищ керосина  $\geq 30$ м;
2. От рабочих площадок, зданий, дорог  $\geq 60$ м;

3. От испытательного стенда  $\geq 120$ м;
4. От хранилища жидкого  $O_2 \geq 60$ м;
5. От коммуникаций жидкого  $O_2 \geq 30$ м;
6. От незащищенного электрооборудования  $\geq 30$ м.

При ёмкости каждого резервуара от 27000 кг до 45000 кг расстояние между резервуарами должно быть не менее 90 м. Расстояние 150 м считается уже вполне безопасным в случае воздействия ударной волны и осколков при взрыве соседнего резервуара. Резервуары с жидким азотом целесообразно устанавливать между резервуаров с жидким  $O_2$  и  $H_2$ .

Территория водородного комплекса должна иметь охрану и противопожарные посты, чтобы исключить допуск на неё посторонних лиц, курение и разведение огня.

## **6.1 Меры безопасности при работе с сжатыми газами**

### **6.1.1 Общие требования к сосудам, работающим под давлением**

На предприятиях широко используются системы с сосудами, работающими под давлением: газовые и водогрейные котлы, компрессорные установки, автоклавы, паро- и газопроводы, газовые баллоны, цистерны и бочки для транспортировки и хранения.

Сосуды, работающие под давлением, представляют потенциальную опасность т.к. вследствие нарушения режима эксплуатации и дефектов могут происходить взрывы с разрушением зданий, сооружений, оборудования и гибели людей из-за высвобождения при разрушении сосуда огромной энергии.

При взрыве происходит расширение, находящегося в нем сжатого газа (адиабатный процесс), практически без потерь энергии в окружающую среду.

Мощность взрыва определяется по формуле (кВт):

$$N = \frac{A}{102 \cdot t}, \quad (66)$$

где  $A$  – работа расширения газа, Дж;

102 – коэффициент перевода размерности кг\*м/с в кВт;

t– продолжительность взрыва, с.

К сосудам, работающим под давлением, относятся герметично закрытые емкости, которые предназначены для осуществления химических и тепловых процессов, а также для хранения и перевозки сжатых, сжиженных газов и жидкостей.

Основные требования к устройству, монтажу, ремонту и эксплуатации сосудов, работающих под давлением, изложены в ДНАОП 0.00-1.07-94 "Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением". Эти правила распространяются на:

1. Сосуды, которые работают под давлением воды с температурой выше 115°С или с другой жидкостью с температурой, которая превышает температуру кипения при давлении 0,07 МПа (0,7 кгс/см<sup>2</sup>), без учета гидростатического давления;

2. Сосуды, которые работают под давлением пара или газа выше 0,07МПа;

3. Баллоны, предназначенные для транспортировки и хранения сжиженных и сжатых газов под давлением выше 0,07МПа;

4. Цистерны и бочки для транспортировки и хранения сжиженных газов, давление газов в которых, при нагревании до 50 оС, превышает давление 0,07МПа;

5. Цистерны и сосуды для транспортировки и хранения сжиженных и сжатых газов, жидкостей и сыпучих тел, в которых давление выше 0,07МПа, открываемых периодически для их опустошения;

6. Барокамеры.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, не распространяются на:

1. Приборы парового и водяного отопления;

2. Сосуды из не металлических материалов;

3. Сосуды, работающие под давлением воды при температуре не выше 115 °С и сосуды под давлением других жидкостей при температуре не выше точки кипения и давлении 0,07МПа.

В зависимости от температуры и давления эксплуатации сосуды подразделяются на 4 группы (таблица 4).

Таблица 5 – Группы сосудов в зависимости от расчетного давления

Расчетное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Температура, °С	Характер рабочей среды
1 Более 0,07 (0,7)	Независимо	Взрыво - или пожароопасная, или 1,2-го класса безопасности по ГОСТ12.1 007
2 До 2,5 (25) Более 2,5 (25) до 4 (40) Более 4 (40) до 5 (50) Более 5 (50)	Ниже -70 выше 400 Ниже -70 выше 200 Ниже -70 выше 200 Независимо	Любая, за исключением указанной для первой группы сосудов
3 До 1,6 (16) Более 1,6 (16) до 2,5 (25) Более 2,5 (25) до 4 (40) Более 4 (40) до 5 (50)	От -70 до -20 От 200 до 400 От -70 до 400 От -70 до 200 От -40 до 200	Любая, за исключением указанных для первой и второй групп сосудов
4 До 1,6 (16)	От -20 до 200	

Регистрация сосудов производится по письменному заявлению владельца сосуда с предъявлением: паспорта на сосуд, удостоверения о качестве сборки, схемы включения сосуда (с указанием рабочих параметров), паспорта предохранительного клапана с указанием расчетной пропускной способности.

Разрешение на пуск в работу сосудов, подлежащих регистрации, выдается инспектором надзора после их регистрации и технического освидетельствования.

Разрешение же на пуск в работу сосудов, не подлежащих регистрации в органах надзора, выдается лицом, назначенным приказом по предприятию для осуществления надзора за ними, на основании результатов технического освидетельствования. Эти разрешения (с указанием срока следующего технического освидетельствования) записываются в паспорт и "Книгу учета и освидетельствования сосуда".

Техническое освидетельствование сосудов, подлежащих регистрации в ЭТЦ, проводят представители Госнадзора охраны труда в присутствии представителей технической службы предприятия. Сосуды, которые не подлежат регистрации в органах Госнадзора охраны труда лицом, отвечающим за их техническое и безопасное состояние на предприятии. Техническое освидетельствование включает внешний и внутренний осмотр и испытание давлением, согласно паспорту на сосуд.

При перестановке сосуда на новое место или передаче другому владельцу, а также изменении схемы его работы сосуд подлежит обязательной перерегистрации.

Для обслуживания сосудов, работающих под давлением, могут быть допущены лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, обученные по утвержденной программе, аттестованные с выдачей удостоверения на право выполнения работ.

Аттестация персонала, который работает с сосудами под давлением вредных веществ 1, 2, 3 и 4<sup>го</sup> классов опасности по ГОСТ 12.1 007 производится комиссией с обязательным участием представителя Госнадзора охраны труда (в остальных случаях участие представителя Госнадзора охраны труда в комиссии не обязательно). Проверка знаний персонала, обслуживающего сосуды, работающие под давлением, проводится не реже 1 раза в год.

Внеочередная проверка знаний персонала проводится в следующих случаях:

1. - При перерыве в работе более 12 месяцев;
2. - По требованию представителя Госнадзора охраны труда при обнаружении нарушений в работе персонала или технического состояния сосуда;
3. - При смене места работы;
4. - При смене типа или группы сосудов, работающих под давлением;
5. - При изменении схемы и режима работы сосуда под давлением.

Учитывая высокую потенциальную опасность сосудов, работающих под давлением, на рабочем месте должна быть вывешена инструкция безопасной работы, порядок допуска и включения. Запрещено находиться на рабочем месте с сосудами под давлением посторонним лицам.

## **6.2 Проверочный расчет сосуда высокого давления**

Для конструкций с многократным повторным действием нагрузок возникающие при эксплуатационной нагрузке напряжения не должны превышать значения предела текучести и обязаны иметь по отношению к нему некоторый запас прочности, который гарантирует не снижение прочности в течение установленного срока службы изделия даже в результате накопления усталостных повреждений в металле. Учитывая это, расчеты прочности удобнее проводить по эксплуатационным нагрузкам.

Исходные данные для расчета:

1. Рабочее давление в баллоне

$$p_p = 400 \cdot 10^5 \text{ [Па];}$$

2. Испытательное гидравлическое давление

$$p_{\text{исп}} = 425 \cdot 10^5 \text{ [Па];}$$

3. Наружный диаметр корпуса баллона

$$D = 1,784 \text{ [м];}$$

4. Толщина стенки

$$\delta_{\text{min}} = 0,026 \text{ [м];}$$

5. Механические свойства материала ВТ6С;

6. Предел прочности

$$\sigma_B = 980 \cdot 10^6 [\text{Па}];$$

Внутренний диаметр баллона:

$$D_B = D - 2 \cdot \delta_{min}, \quad (67)$$

$$D_B = 1,784 - 2 \cdot 0,026 = 1,732 [\text{м}].$$

Напряжения, возникающие при рабочем давлении:

$$\sigma_p = \frac{p_p \cdot D_B}{2 \cdot \delta_{min}}, \quad (68)$$

$$\sigma_p = \frac{400 \cdot 10^5 \cdot 1,732}{2 \cdot 0,026} = 1332,3 \cdot 10^5 [\text{Па}].$$

Запас прочности баллонов:

$$f = \frac{\sigma_B}{\sigma_p}, \quad (69)$$

$$f = \frac{980 \cdot 10^6}{1332,3 \cdot 10^5} = 7,3.$$

Напряжения, возникающие при испытательном давлении:

$$\sigma_{исп} = \frac{p_{исп} \cdot D_B}{2 \cdot \delta_{min}}, \quad (70)$$

$$\sigma_{исп} = \frac{425 \cdot 10^5 \cdot 1,732}{2 \cdot 0,026} = 1415,6 \cdot 10^5 [\text{Па}].$$

Запас прочности баллонов при испытаниях:

$$f = \frac{\sigma_B}{\sigma_p}, \quad (71)$$

$$f = \frac{980 \cdot 10^6}{1415,6 \cdot 10^5} = 6,9.$$

## 7 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В экономической части бакалаврской работы представлено экономическое обоснование проекта «Проектная разработка системы заправки жидким водородом стартовых комплексов перспективных разгонных блоков ракет-носителей и разработка технологического процесса пневмогидравлических испытаний системы заправки».

Цель данной части бакалаврской работы обосновать экономическую целесообразность разработки пневмогидравлической системы.

Недостаточно полные знания о закономерностях протекания рабочих процессов в системе заправки, сложность прогнозирования свойств конструкционных материалов в условиях конкретных систем заправки, высокие требования к надежности функционирования систем – все это обуславливает необходимость их экспериментальной отработки. Одно из основных требований при создании современных автоматизированных систем заключается в том, что при отработке заправки должно использоваться ограниченное количество экземпляров. В связи с этим разработка в сжатые сроки и с минимальными стоимостными затратами, обладающей высокой надежностью и безопасностью, наряду с конструктивными и технологическими факторами определяется системы заправки и отработкой, проводимые по определенным программам. Этап отработки является самым трудоемким, продолжительным и дорогостоящим этапом в процессе создания автоматизированной системы заправки. В связи с этим вопросы оптимального планирования этапа отработки, в частности разработка оптимальной конструкций ПГС и технологий, особо актуальны.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемого комплекса необходимо рассчитать затраты на проектирование ПГС, затраты на приобретение материалов и комплектующих элементов, необходимых для проектирования.

### **7.1 Календарный план работы над проектированием заправочной системы**

В таблице приведен план работы над проектированием заправочной системы.

Таблица 6– План работ над проектированием заправочной системы

Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, дни
1 Разработка технического задания	Инженер	2
2 Изучение литературы	Инженер	1
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	7
8 Построение графиков (проверка расчетов)	Инженер	3
9 Подготовка документации	Инженер	1
ИТОГО		28

### **7.2 Себестоимость проектирования пневмогидравлической системы заправки**

Определяющей чертой проводимых работ служит их теоретическая направленность.

В себестоимость проекта следует включить затраты, связанные с ее выполнением, не учитывая возможности финансирования. Суммирование себестоимости составляется по следующим критериям:

- основная и дополнительная заработная плата основных исполнителей.
- страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования
- затраты на расходные материалы.
- прочие расходы.
- накладные расходы.

В таблице 6 приведены затраты на расходные материалы.

Таблица 7– Затраты на расходные материалы

Наименование материала	Кол-во	Цена, руб.	Сумма затрат, в руб.
1 Канцелярские товары	-	-	900,00
2 Лицензионная версия MS Office2019	1 шт.	5990	5990
3 КОМПАС v18	1 шт.	1490	1490
4 Бумага для офисной техники	1 пачка	250,00	250,00
5 Тонер для принтера HPDesignJetT125	1 шт.	2199	2199
Итого:			10829

В таблице 8 приведены затраты на основную заработную плату работников.

Таблица 8 – Затраты на основную заработную плату работников

Наименование этапа	Трудоем кость этапа, чел/день	Трудоемк ость этапа, чел/мес.	Заработная плата, руб.	Затраты по заработной плате, руб.
Разработка технического задания	2	0,095	12130,00	1150,35
Изучение литературы	1	0,048	12130,00	582,24
Разработка структурной схемы	3	0,142	12130,00	1722,46
Разработка принципиальной схемы	3	0,142	12130,00	1722,46
Разработка функциональной схемы	3	0,142	12130,00	1722,46
Разработка конструкции	5	0,238	12130,00	2886,94
Изготовление рабочих чертежей	7	0,333	12130,00	4039,29
Построение графиков (проверка расчетов)	3	0,142	12130,00	1722,46
Подготовка документации	1	0,048	12130,00	582,24
Итого				16130,90

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

$$16130,90 \cdot 20\% / 100\% = 3226 \text{ рублей.}$$

Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования составляют 30,2% от фонда оплаты труда:

$$(16130,90 + 3226) \cdot 30,2\% / 100\% = 5845,78 \text{ рублей.}$$

Обычно накладные расходы составляют 180-250% от величины основной

заработной платы. При проектировании и создании данной установки примем их равными 180%:

$$16130 \cdot 180\% / 100\% = 29035.62 \text{ рублей.}$$

Прочие расходы включают стоимость машинного времени на разработку, отладку, и подготовку технической документации и рассчитываются по формуле:

$$Z_{пр} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (72)$$

где  $N$  – количество часов, необходимых на создание, отладку, и подготовку технической документации,

$C_{мч}$  – стоимость машино-часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 65 рублей,

$K_{загр}$  – коэффициент загрузки ПЭВМ, равный 0,7-0,9, в данном случае он равен 0,7.

$N$  рассчитаем исходя из таблицы 4, учитывая дни затраченные на выполнение этапов, принимая, что каждый день работы длились 8 часов:

$$N = (3 + 3 + 3 + 5 + 7 + 3 + 1) \cdot 8 = 200 \text{ часов.}$$

$$Z_{пр} = 200 \cdot 65 \cdot 0,7 = 9100.00 \text{ рублей.}$$

Сведем полученные данные по затратам на приобретение расходных материалов, основную и дополнительную заработную плату рабочих, затраты по страховым взносам в пенсионный фонд и фонды социального страхования, накладные и прочие расходы в единую таблицу. Себестоимость разработки пневмогидравлической системы заправки жидким водородом перспективных разгонных блоков на стартовом комплексе представлена таблице 9.

Таблица 9– Стоимость разработки ПГС

Наименование статей расходов	Затраты, руб.
Затраты на приобретение расходных материалов	10829.00

Затраты на основную заработную плату разработчиков	16130.00
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	3226.00
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	5845.78
Накладные расходы	29035.62
Прочие расходы	9100.00
Итого	74166.40

Для создания опытного образца необходимы комплектующие изделия, стоимость которых приведена в таблице 10.

Таблица 10– Расходы на приобретение комплектующих изделий

Наименование изделия	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
1 Емкость для жидкого водорода	1	587000	587000
2 Емкость теплообменника	3	208000	624000
3 Сливная емкость жидкого водорода	1	437000	437000
4 Испаритель	3	100800	100800
5 Вакуумный насос	6	159000	954000
6 Вакуумметр	8	3800	30400
7 Фильтр	4	8000	32000
8 Пневмоклапан	34	19000	646000
9 Электропневмоклапан	72	23470	1689840
10 Дренажно-предохранительный клапан	23	18500	425000
11 Манометр	82	3690	302580
12 Реле давления	67	3970	265990
13 Датчик температуры	4	1274	5096
14 Редуктор	4	17000	68000

15 Расходомер	4	43210	172840
16 Трубопровод	1000	527	527000
17 Сигнализатор наличия жидкости	33	2500	82500
18 Газоанализатор	29	7730	224170
Итого:			7174216

Затраты на стоимость основных расходных материалов, используемых при строительстве системы заправки

Таблица 11 – Расходы на строительство стенда

Наименование элемента	Материал	Масса, т	Цена, руб/т	Сумма, руб.
1 Элементы крепления	30ХГСН2А	10	108000	1080000
2 Железобетонный фундамент	Железобетон марки М400	70	7400	518000
Итого:				1598000

Затраты на основные КРТ и СГ для подготовки и заправки РБ включают стоимость рабочего тела расходуемого в процессе подготовки и заправки.

Таблица 12– Затраты на основные расходные материалы для заправки РБ

Наименование материала	Объем, л.	Цена, л./руб.	Сумма затрат, в руб.
1 Жидкий водород	26958,3	52.5	1415310.75
2 Азот	14838	20	296760,00
3 Гелий	14838	190	2819220.00
Итого:			4531290.75

### **7.3 Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения ПП**

Ранее были рассмотрены вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на создание заправочной системы.

Были определены затраты:

1. На проектирование ПГС системы 74166.40 руб;
2. На приобретение комплектующих изделий для опытного образца системы 7174216 руб;
3. На стоимость основных расходных материалов, используемых при строительстве системы заправки 1598000 руб;
4. На основные КРТ и СГ для подготовки и заправки РБ 4531290.75 руб.

Разработка пневмогидравлической системы заправки с экономической точки зрения позволит:

1. Уменьшить временные и финансовые затраты на заправку пневмогидравлической системы за счет применения быстродействующих электроклапанов и уменьшение теплопроводности арматур криогенной системы;
2. Увеличить точность измерения расхода топлива за счет применения высокоточных сигнализаторов наличия жидкости, расходомеров и других средств измерения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе исходя из исходных данных задания была спроектирована система заправки разгонного блока 12КРБ.

В разделе определения основных проектных данных была разработана схема пневмогидравлической системы заправки. Были произведены оценочные, гидравлические и другие расчёты. Составлена принципиальная схема ПГС заправки. Основываясь на анализе систем основного наддува, выбрана «холодная» система наддува.

В разделе описания конструкции был рассмотрен состав пневмогидравлической схемы системы заправки жидким водородом. А также описаны некоторые агрегаты и узлы схемы.

В технологической части были рассмотрены теоретические основы пневмогидравлических испытаний ПГС ЗС жидким водородом. В графической части представлен технологический процесс пневмогидроиспытаний системы заправки жидким водородом РБ.

В специальной части была предложена идея модернизации железнодорожной цистерны 8Г514 для транспортировки жидкого водорода которая заключается в изменении конструкции теплоизоляции и замене запорных клапанов на более технологичные.

В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрены меры безопасности при работе с жидким водородом и сжатыми газами. В расчетной части проведен проверочный расчет сосуда высокого давления.

В экономической части был проведен расчет косвенного эффекта от применения данной заправочной системы.

Спроектированная в рамках данной работы система заправки жидким водородом отвечает заданным техническим требованиям, а также в полной мере соответствует всем предъявляемым мерам безопасности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Архаров А.М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. / А.М. Архаров, И.Д. Кунис. –М.: МГТУ им. М.Э. Баумана, 2006. – 249 с.
- 2 Белова Л.Д. Сетевые графики в планировании. / Л.Д. Белова, И.М. Разумов – М.: МАИ, 1981. – 125 с.
- 3 Зашляпин Р.А. Создание транспортных и стационарных средств заправки жидким водородом лунного орбитального комплекса. / Р.А. Зашляпин, С.Т. Павленко, О.Я. Черемных – Технические газы, 2007. – 291 с.
- 4 Зотов Б.И. Безопасность жизнедеятельности на производстве. / Б.И. Зотов, В.И. Курдюмов – М.: Колос, 2003. – 273 с.
- 5 Зрелов В.Н. Жидкие ракетные топлива. / В.Н. Зрелов, Е.П. Серегин – М.: Химия, 1975. – 320 с.
- 6 Караштин В.М. Основы проектирования систем наземного обеспечения. / В.М. Караштин, А.Г. Катков – М.: МАИ, 1998. – 315 с.
- 7 Кузьменко И.Ф. Современные тенденции в конструировании и изготовлении резервуаров для хранения и транспортирования жидкого водорода. / И.Ф. Кузьменко, Ю.Н. Румянцев, Г.И Сайдадь – Технические газы, 2008. – 193 с.
- 8 Попов Г.Н. Машиностроительное черчение: Справочник. / Г.Н. Попов, С.Ю Алексеев – Л.: Машиностроение, 1987. – 262 с.
- 9 Осипов С.О. Ракеты-носители. / С.О. Осипов – М.: Воениздат, 1981. – 256 с.
- 10 Бармин В.А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве ЛА. / В.А. Бармин – М.: Машиностроение, 2005. – 242 с.
- 11 Филин Н.В. Жидкостные криогенные системы. / Н.В. Филин, А.Б. Буланов – М.: Машиностроение, 1985. – 328 с.

12 Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования. / В.Ф. Хлыбов – М.: РВСН, 2003. – 271 с.