

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
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

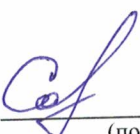
В.В. Соловьев

«» 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

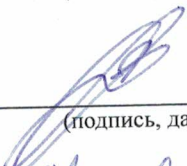
на тему: Совершенствование системы приёма, хранения, газификации жидкого азота и процесса заправки ракет среднего класса

Исполнитель
студент группы 1109-об2


(подпись, дата)

О.В. Савин

Руководитель
доцент, канд.техн.наук


(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант по БЖД
доцент, канд.техн.наук


(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
стар. преп. кафедры СиТРК


(подпись, дата)

М.А. Аревков

Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУВО «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 Савина Олега Васильевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Совершенствование системы

приёма, хранения, газификации жидкого азота и процесса заправки ракет

среднего класса

(утверждена приказом от 22.04.2025 г. №1055-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 06.06.2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: процесс
разработки криогенной заправочной системы РН среднего класса, система

заправки – стационарная; подача компонента – вытеснительным методом;

компонент ракетного топлива – жидкий азот; время хранения КРТ – 1 год; время

подготовки КРТ – 10 дней; время заправки РН – 20 минут; давление выдаваемого

газообразного азота – 40 МПа; температура выдаваемого газообразного азота –

плюс 20 °С; точка росы газообразного азота – минус 65 °С.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих
разработке вопросов): описание конструкции системы хранения, заправки и

выдачи жидкого азота, оптимизация технических характеристик по входным

параметрам принимаемого жидкого азота, расчет количества жидкого азота

необходимого для режима подпитки, заправки и захолаживания ракеты-

носителя, разработка технологического процесса работы системы, экономический расчет разработки системы приёма, хранения, газификации и заправки ракеты-носителя.

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, иллюстративного материала и т.п.): справочные гидравлические параметры; блок-схема системы приёма, хранения, газификации жидкого азота и процесса заправки ракет среднего класса; пневмогидравлическая схема приёма, хранения, газификации и выдачи жидкого азота; вагон-цистерна для жидкого азота; экранно-порошково-вакуумная теплоизоляция вагон-цистерны; резервуар цилиндрический горизонтальный; технологический процесс подготовки системы к заправке жидким азотом; технологический процесс заправки ракеты-носителя жидким азотом; элементы фильтрующие; графики зависимости.

6. Консультант по выпускной квалификационной работе раздела безопасности жизнедеятельности: 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 выпускной квалификационной работе содержит 72 с., 8 таблиц, 12 рисунков, 12 источников, 1 прил.

КОМПОНЕНТЫ РАКЕТНОГО ТОЛИВА, ЖИКИЙ АЗОТ, РАКЕТА-НОСИТЕЛЬ, СИСТЕМА ЗАПРАВКИ, СТАРТОВЫЙ КОМПЛЕКС, РАКЕТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Цель:

1. Провести анализ существующих систем заправки криогенными компонентами топлива.
2. Провести расчёт режимов заправки, захолаживания и подпитки баков ракет-носителей среднего класса жидким азотом.
3. Рассмотреть газификационные установки высокого давления и выбрать для них насосный агрегат наиболее эффективный с точки зрения производительности.

Задачи:

1. Разработать пневмогидравлическая схему для системы приёма, хранения, газификации и заправки жидким азотом для ракет-носителей среднего класса.
2. Провести гидравлический расчёт системы заправки ракеты-носителя
3. Разработать технологический процесс работы системы.
4. Проработать вопросы, связанные с проведение работ на заправочных системах, а также с оборудованием работающем под давлением и сделать расчёт средств обеспечения вентиляции рабочей зоны заправочной станции жидким азотом.
5. Рассмотреть вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на улучшение системы.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	9
1.1 Анализ систем заправки низкокипящими компонентами топлива	9
1.2 Средства хранения, транспортировки и заправки РКН низкокипящими компонентами топлива	10
1.2.1 Транспортировка низкокипящих компонентов топлива	11
1.2.2 Хранение и выдача потребителям низкокипящих компонентов топлива..	12
1.2.3 Газификации жидкого азота	13
1.3 Описание проектируемой системы заправки РН.....	15
1.3.1 Резервуары хранения жидкого азота	16
1.3.2 Трубопроводы системы.....	17
1.4.3 Запорно-регулирующая арматура, контрольно-измерительные приборы, предохранительные устройства.....	18
1.4.4 Запорно-регулирующая арматура	18
1.4.5 Манометры, датчики давления.....	19
1.4.6 Приборы для измерения температуры.....	19
1.4.7 Предохранительные устройства.....	19
1.4.8 Указатель уровня КРТ	20
2 РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ	22
2.1 Расчёт количества жидкого азота для заправки, захолаживания и подпитки баков РН	22
2.1.2 Определение давления в газовой подушке резервуара.....	29
2.1.3 Расчет процессов теплообмена в криогенной заправочной системе....	30
2.1.4 Расчёт процесса наддува емкости хранилища жидкого азота	33
2.1.4 Расчёт насосной системы подчи жидкого азота для процесса газификации.....	36

2.2 Гидравлический расчёт системы заправки ракеты-носителя.....	39
2.3 Оптимизация технических характеристик по входным параметрам принимаемый криогенных компонентов.....	44
2.3.1 Обеспечение чистоты криогенных продуктов.....	44
2.3.2 Материалы фильтроэлементов КРТ.....	46
2.3.3 Расчет фильтров КРТ.....	46
3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАПРАВКИ	50
3.1 Основные операции системы заправки жидким азотом	50
4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ.....	53
4.1 Общие требования техники безопасности при работе с криогенными компонентами топлива (жидким азотом)	54
4.1.1 Защита от ожогов и обморожения	54
4.1.2 Защита от воздействия термических деформаций	56
4.1.3 Защита превышения давления при испарении и нагреве жидкого азота.....	56
4.1.4 Требования к подготовке системы перед заполнением жидким азотом.....	57
4.2 Расчет средств обеспечения вентиляции рабочей зоны заправочной станции жидким азотом.....	58
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	65
5.1 Календарный план работы над проектированием системы	65
5.2 Себестоимость проектирования системы заправки	66
5.3 Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения системы.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ	72
ПРИЛОЖЕНИЕ А	74

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ГА – газообразный азот;

ГАД – газовый аккумулятор давления;

ГУВД – газификационная установка высокого давления;

ЖА – жидкий азот;

ЗРА – запорно-регулирующая арматура;

ЗС – заправочная система;

КРТ – компонент ракетного топлива;

ПГС – пневмогидравлическая схема;

ПУ – пусковое устройство;

РКК – ракетно–космический комплекс;

РКН – ракета космического назначения;

РН – ракета–носитель;

СЗ – система заправки;

СК – стартовый комплекс;

ТБ – топливный бак;

ТЗ – техническое задание.

ВВЕДЕНИЕ

Двигательные установки, входящие в состав ракет-носителей, играют важную роль, так как для их работы необходимы соответствующие компоненты ракетного топлива следует тщательно подходить к процессу их подготовки перед заправкой в топливные баки. При проектировании систем заправки и хранения криогенных продуктов необходимо учитывать специфические свойства рассматриваемых криогенных компонентов топлив, так как это отражается на эксплуатации и их работе.

Криогенные ракетные топлива играют ключевую роль в обеспечении эффективности работы ракетных двигателей. Их использование значительно повышает удельный импульс, что является важным для достижения высоких характеристик полёта. В условиях современного ракетостроения, оптимизация процессов работы с криогенными ракетными топливами становится одной из приоритетных задач. Кроме того, правильная организация приёма, хранения и заправки РН криогенными компонентами топлива не только влияет на эффективность работы агрегатов, систем и ракетных двигателей, но и обеспечивает безопасность всего процесса подготовки к пуску РН.

Неправильные условия хранения могут привести к ухудшению физико-химических свойств топлива и, как следствие, к потере надёжности и работоспособности систем и РН.

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются различные подходы к совершенствованию системы приёма, хранения, газификации жидкого азота, а также процесса заправки ракет среднего класса, а также вопросы связанные с безопасностью и при работе с криогенными компонентами топлива и экономическое обоснование создаваемого комплекса.

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Анализ систем заправки низкокипящими компонентами топлива

Криогенные заправочные системы (КЗС) являются ключевым элементом подготовки ракетно-космической техники к запуску. Они обеспечивают безопасное и эффективное обращение с криогенными топливами, такими как жидкий кислород и водород, которые используются для запуска. Основные задачи КЗС включают:

1. Хранить криогенные топлива в специальных резервуарах, которые поддерживают низкую температуру и защищают компоненты топлива от воздействия внешней среды.

2. Подачу топлива в баки ракеты-носителя (РН) и разгонного блока, которая осуществляется с учётом определённых технологических процессов, включая контроль температуры и давления.

3. Поддержку постоянного уровня компонентов топлива и соответственно их температуру в баках перед пуском.

4. Предварительное охлаждение топливных магистралей и баков, предназначенное для предотвращения испарения и обеспечивает стабильность при заправке.

5. Подпитки или повторной заправки топливных баков ракеты-носителя.

6. Слива топлива из топливных баков для обеспечения безопасности и последующей подготовки к следующему запуску.

Общие принципы проектирования оборудования, разработки схемных решений, технологии работы системы, хранения и выдачи продуктов отличаются рядом особенностей, вызванных свойствами криогенных продуктов (см. рис 1.1).

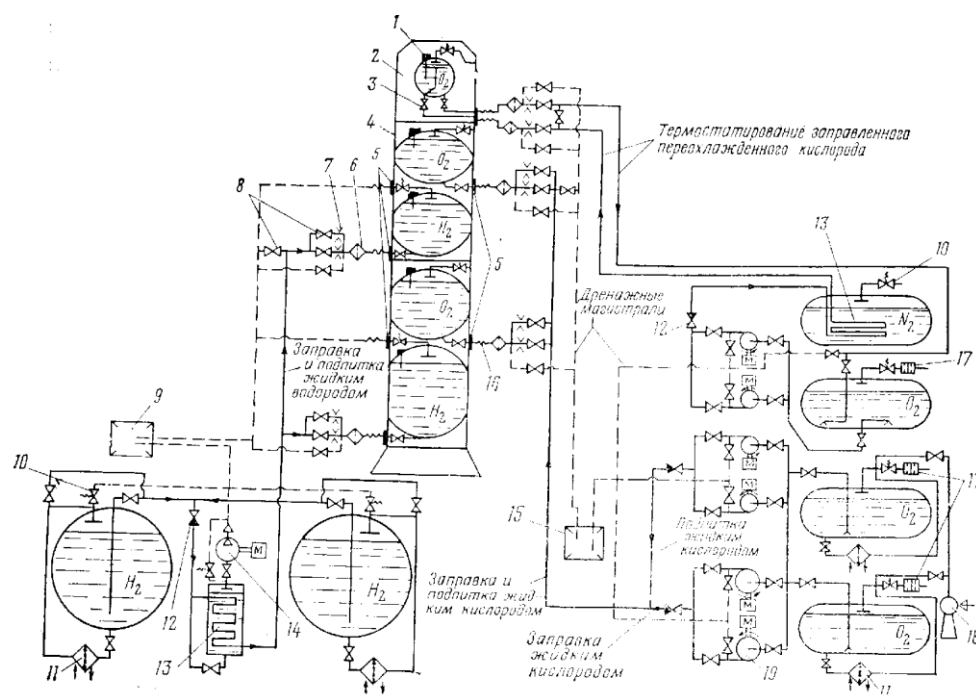


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема заправки РКН криогенными компонентами топлива

- 1 – датчики уровня; 2 – космический блок; 3, 8 – отсечные клапаны (вентили); 4 – ракета-носитель; 5 – разъемные соединения ракеты-носителя; 6 – фильтры; 7 – дроссельные шайбы; 9 – площадка для сжигания водорода; 10 – дренажно-предохранительные клапаны; 11 – теплообменники-испарители; 12 – обратные клапаны; 13 – теплообменник-охладитель; 14 – вакуумный насос; 15 – площадка для дренажа кислорода; 16 – гибкие соединения; 17 – мембраны герметизации; 18 – эжектор охлаждения кислорода; 19 – центробежные насосы с электроприводом.

1.2 Средства хранения, транспортировки и заправки РКН низкокипящими компонентами топлива

Оборудование для хранения, транспортировки и заправки ракет-носителей низкокипящими компонентами ракетного топлива играет важную роль в инфраструктуре Стартовых комплексов. Криогенные ракетные топлива, такие как жидкий азот, жидким кислород, жидкий водород – требуют особых условий

для хранения и транспортировки, обусловленных их физико-химическими характеристиками.

1.2.1 Транспортировка низкокипящих компонентов топлива

Транспортировка низкокипящих компонентов топлива, таких как жидкий азот, требует соблюдения определённых мер безопасности и использования специализированного оборудования. Вот некоторые основные рекомендации и аспекты, которые следует учитывать:

1. Использование специализированных контейнеров (вагон-цистерн). Жидкий азот и другие низкокипящие вещества транспортируются в ВЦ или танках. ВЦ специально разработаны для поддержания очень низких температур и имеют надёжную изоляцию.

2. Температурный контроль. Во время транспортировки необходимо контролировать температуру, чтобы гарантировать, что азот остаётся в жидком состоянии. Это обычно требует использования вакуумной изоляции и других технологий для минимизации теплопотерь.

Вагон-цистерна (рис. 1.2) предназначена для транспортировки жидкого азота, кислорода, аргона по сети железных дорог.



Рисунок 1.2 – Вагон-цистерна для транспортировки криогенных продуктов

ВЦ представляет собой криогенную ёмкость, установленную на железнодорожной платформе на четырёх опорах. К опорам ёмкость притянута хомутами, предназначенными для предотвращения перемещений ёмкости.

Система коммуникаций включает в себя:

- запорно-предохранительную аппаратуру;
- КИП;
- испаритель для создания избыточного давления в сосуде при вытеснении продукта и для выдачи газификационного продукта.

Работа ВЦ заключается в наполнении ёмкости жидким продуктом, транспортировании, хранении, сливе продукта или выдаче газификационного продукта потребителю. [3]

1.2.2 Хранение и выдача потребителям низкокипящих компонентов топлива

Хранение и выдача потребителям низкокипящих компонентов топлива требует особого внимания к условиям хранения и безопасности. Низкокипящие компоненты топлива, как правило, легко испаряются и могут быть чрезвычайно опасными.

Для накопления, хранения и выдачи криогенной жидкости в составе заправочных систем служат криогенные резервуары. Резервуары с входящими в них трубопроводами и арматурой (обычно называемые «обвязкой») объединяются в хранилище заправочной системы.

Хранилище в целом и его составные элементы являются частью пневмогидравлической схемы заправки и должны обеспечивать выполнение технологических операций, быть удобными в эксплуатации и увязаны со строительной частью (сооружения, фундаменты, навесы и т.д.).

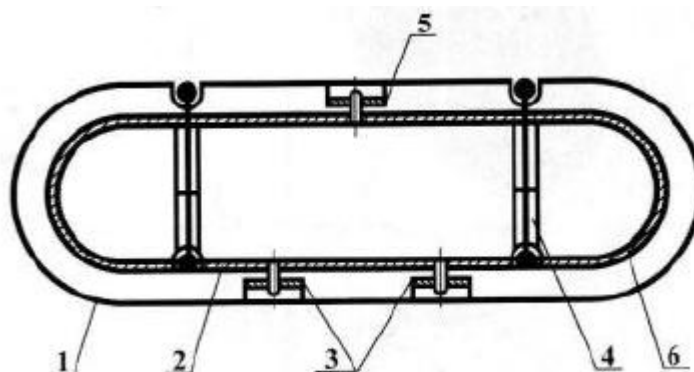


Рисунок 1.3 – Конструктивная схема криогенного резервуара

1 – кожух; 2 – тепловая изоляция; 3, 5 – дисковые опоры; 4 – подвески;
6 – внутренний сосуд

Емкости хранилища (резервуары), предназначенные для криогенных компонентов, заполняются жидким азотом по трубопроводу, который входит в резервуар сверху. Объем заполнения составляет 85-95% от общего объема емкости. Подача жидкого азота из резервуара хранилища потребителям осуществляется вытеснительным методом, за счёт наддува резервуара газообразным сухим азотом, который подаётся от хранилища сжатых газов до того момента, пока не будет достигнуто заданное давление в резервуаре. [4]

1.2.3 Газификации жидкого азота

Для преобразование жидкого азота в газообразный необходимо использование в составе системы газификационных установок высокого давления (ГУВД). ГУВД являются важной составляющей части любого технологического процесса заправки, так как поддают газообразный азот потребителям под высоким давлением для использования в различных системах.

Размещение ГУВД в том же здании (сооружении), где располагаются резервуары хранилища с жидким азотом позволяют оптимизировать процесс газификации.

В процессе газификации участвует следующее оборудование:

— пневмоцисты управления пневматическими клапанами, используемыми на системе;

- насосный агрегат;
- испаритель.

ГУВД обеспечивают заполнение ресиверов (реципиентов), общего хранения сжатыми газами, сухим газообразным азотом высокого давления (до 400 кгс/см²). Для осуществления процесса преобразования ЖА в ГА испарительный аппарат устанавливается за насосом, который закачивает ЖА в испаритель. [5]

Из резервуара емкости хранения ЖА под собственным наддувом подается в поршневой одноцилиндровый простого действия. Поршень приводится в действие кривошипно-шатунным механизмом, который соединяется с электродвигателем клиноременной передачей. Методом вытеснения, по действию давления наддува (0,25-0,35 МПа), ЖА подается из резервуара хранения ЖА на всасывание насоса.

Сжатый до давления нагнетания ЖА поступает в электрический испаритель, который необходим для газификации ЖА, подаваемого насосным агрегатом, а также выдачи ГА давлением 40 МПа в общее хранилище газов.

Система наддува включает в себя комплекс оборудования, которое необходимо для создания и поддержания требуемого избыточного давления в топливных баках во время испытаний.

Принципиальная схема ЗС с импульсной подачей газа высокого давления в основную емкость приведена на рис. 1.4.

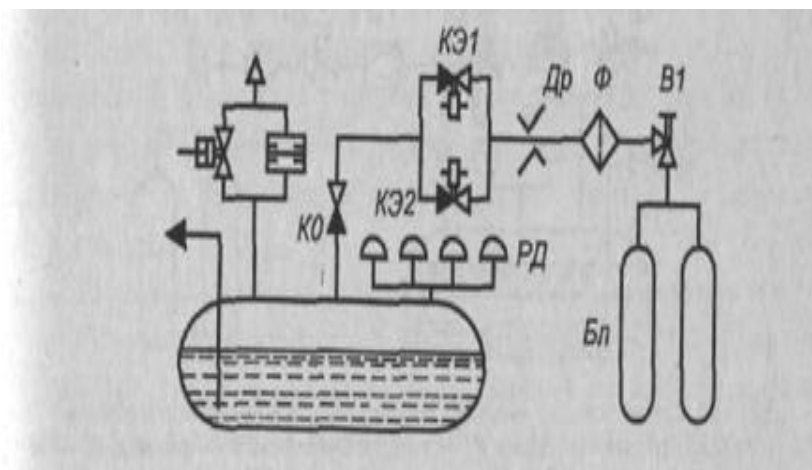


Рисунок 1.4 – Схема система наддува с импульсной подачей газа

1.3 Описание проектируемой системы заправки РН

Криогенное заправочное оборудование, используемое на СК (рис. 1.5) должно включать в себя:

- транспортные резервуары (вагон-цистерны) для доставки на СК ЖА железнодорожным транспортом;
- стационарные резервуары (емкости-хранилища) для приёма, накопления, хранения и выдачи в ТБ РН ЖА;
- стационарные резервуары (сливные емкости) для приёма остатков ЖА из трубопроводов по окончании заправки РН;
- трубопроводы для транспортировки жидкого и газообразного ЖА;
- насосные установки, в которых используются плунжерные насосы для заполнения баллонов газообразным азотом высокого давления;
- газификационные установки используются на СК для испарения ЖА с целью наддува резервуаров до 4...10 атм, при насосных и вытеснительных способах заправки;
- криогенную арматуру: запорную, ЗРА, предохранительную, дроссельную, обратного действия, наполнительные соединения;
- общее хранилище газоснабжения, включающее в себя ресиверные с запасами сжатого воздуха и азота.



Рисунок 1.5 – Блок-схема размещения и взаимодействия оборудования

1.3.1 Резервуары хранения жидкого азота

Криогенные резервуары играют важную роль в приёме и хранении криогенных компонентов топлива, таких как жидкий азот, жидкий кислород и других. Разработка резервуаров требует соблюдение специфических требований, касающихся выдержки температуры и давления, которые напрямую зависят от физико-химических свойств хранимых криогенных продуктов.

Резервуары криогенных систем предназначены для накопления, хранения и выдачи жидких криогенных продуктов потребителю. В ряде случаев в резервуарах осуществляется обеспечения требуемой температуры жидкости. В зависимости от назначения, размеров и вида хранимого продукта криогенные резервуары отличаются своими конструктивными особенностями. [6]

Резервуар, предназначенный для длительного хранения и выдачи жидкого азота, представляет собой горизонтальный двустенный аппарат, который состоит из кожуха и внутреннего сосуда. Теплоизоляционная полость (вакуум) между сосудом и кожухом должна быть отвакуумирована до давления согласно паспорту на резервуар. [7]

На рисунке 1.6 представлены основные конструктивные схемы криогенных резервуаров

При выборе формы резервуара необходимо учитывать его назначение, удобство в эксплуатации. В проектируемой системе предлагается выбрать и рассмотреть резервуар цилиндрический горизонтальный, так как его установка и эксплуатация во многом проще, чем резервуаров сферических, несмотря на то, что минимальные теплопритоки в них обеспечиваются лучше.

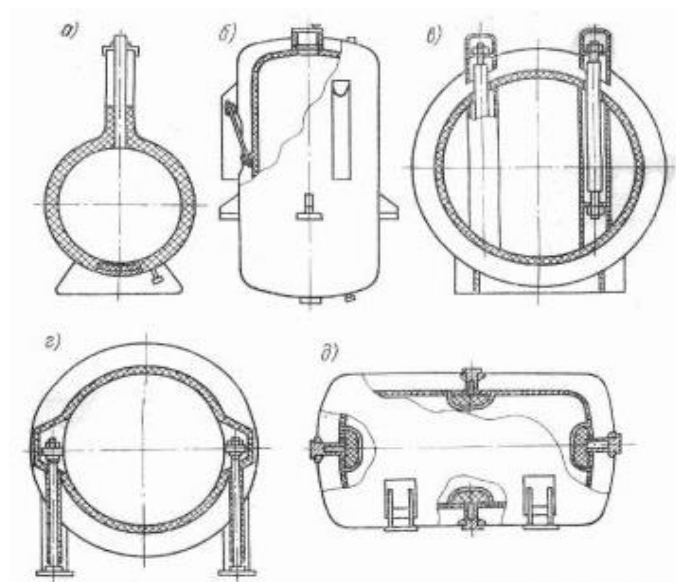


Рисунок 1.6 – Конструктивная схема криогенных резервуаров

а – крепление внутреннего сосуда на центральной горловине; б, в – крепление на подвесках; г – крепление на опорах; д – крепление на пластиковых опорах

Резервуар, который предназначен для эксплуатации в составе криогенных систем должен быть обеспечен:

- трубопроводами обвязки;
- запорной и предохранительной арматурой;
- манометрами и указателями уровня.

На обечайке кожуха резервуара должна быть прикреплена фирменная табличка с паспортными данными резервуара, а также эти данные должны быть нанесены ударным способом на обечайке кожуха под табличкой.

1.3.2 Трубопроводы системы

Трубопроводы системы заправки, хранения и газификации жидкого азота выполняют ключевую роль для и используются для подачи компонента из вагон-цистерны в резервуар хранения жидкого азота, из резервуара хранения в газификационную установку высокого давления, а также выдачу продукта в системы потребления. В процессе эксплуатации трубопроводы подвергаются статическим и динамическим нагрузкам, которые стоит учитывать при

разработке системы заправки. Материал изготовления трубопроводов — нержавеющая сталь.

1.4.3 Запорно-регулирующая арматура, контрольно-измерительные приборы, предохранительные устройства

Для управления работой и обеспечения безопасных условий эксплуатации емкости в зависимости от назначения должны быть оснащены:

- запорной или запорно-регулирующей арматурой;
- приборами для измерения давления;
- приборами для измерения температуры;
- предохранительными устройствами;
- указателями уровня КРТ.

1.4.4 Запорно-регулирующая арматура

Запорно-регулирующая арматура обеспечивает управление потоками различных компонентов топлива. В связи с применением ЗРА в области ракетно-космической техники к ней должны предъявляться строгие требования. Особенности условий эксплуатации, среди которых широкий диапазон температур, усложняет требование герметичности затворов. ЗРА должна обладать низким гидравлическим сопротивлением, чтобы минимизировать потери давления. Важными характеристиками применяемых ЗРА является их высокая надёжность и долговечность, которые будут гарантировать безопасность и эффективность работы на протяжении всего срока службы системы.

Запорно-регулирующая арматура обеспечивает перекрытие или регулирование потока подаваемого компонента ракетного топлива или других веществ. К арматурам предъявляются высокие требования, основным из которых является широкий диапазон изменения температуры, который затрудняет герметизацию затворов, что требует увеличения мощности приводов арматуры, а также обуславливает необходимость использования специальных материалов и высокие требования к тепловой изоляции. При этом должно обеспечиваться

небольшое гидравлическое сопротивление арматуры, отсутствие утечек, высокая надежность и большой ресурс работы.

Для корректной работы системы приёма, хранения и выдачи ЖА должны использоваться соответствующие запорные элементы, такие как: пневмоклапаны, предохранительные клапаны, вентили ручные. Каждая запорно-регулирующая арматура имеет своё назначение.

1.4.5 Манометры, датчики давления

Каждая емкость (ее самостоятельные полости с разными давлениями) любого назначения должны быть снабжены манометрами прямого действия, установленными на штуцере емкости (между емкостью и запорной арматурой).

Манометры должны иметь класс точности не ниже 2,5 для емкости с рабочим давлением до 2,5 МПа (25 кгс/см²), 1,5 - при рабочем давлении свыше 2,5 МПа (25 кгс/см²). Манометр должен выбираться с такой шкалой, чтобы предел измерения рабочего давления находился во второй трети шкалы.

Для дистанционного контроля заданного давления и получения сигналов для системы управления параллельно с манометрами визуального контроля устанавливаются датчики давления.

1.4.6 Приборы для измерения температуры

Емкости для КРТ должны быть оснащены приборами контроля температуры (термометрами визуального контроля и датчиками температуры).

Места установки термометров по высоте и длине емкости для определения среднемассовой температуры КРТ определяются разработчиком проекта СЗ.

Для дистанционного контроля заданной температуры и получения сигналов для системы управления параллельно с термометрами визуального контроля устанавливаются датчики температуры.

1.4.7 Предохранительные устройства

Каждый сосуд должен быть оборудован предохранительным устройством, которое защищает его от превышения допустимого давления. На емкостях заправочных систем, баллонах систем газоснабжения и трубопроводах устанавливаются:

- пружинные предохранительные клапаны;
- разрывные мембраны.

Предохранительные клапаны служат для контроля давления в резервуаре и трубопроводах системы, так как любое превышение или понижение давления может сказаться на работе системы.

Количество предохранительных клапанов, их условный диаметр и пропускная способность должны быть выбраны так, чтобы в емкости или баллоне не создавалось давление, превышающее расчетное более чем на 0,05 МПа (0,5 кг/см²) для сосудов с давлением до 0,3 МПа (3 кгс/см²), на 15% - для сосудов с давлением от 0,3 до 6,0 МПа (от 3 кгс/см² до 60 кгс/см²) и на 10% - для сосудов с давлением свыше 6,0 МПа (60 кгс/см²).

1.4.8 Указатель уровня КРТ

На всех емкостях, входящих в СЗ, должны устанавливаться указатели уровня КРТ. Указатели уровня должны быть снабжены запорными элементами для отключения их от емкости. Конструкция, количество и места установки указателей уровня определяются разработчиком СЗ или емкости.

Для дистанционного контроля количества КРТ и получения сигналов для системы управления на емкости устанавливаются дистанционные указатели уровня показания, которые для конкретной емкости пересчитываются в объем и массу КРТ в каждый конкретный отрезок времени.

Для исключения перелива КРТ при его приеме от железнодорожных емкостей и исключения попадания газового пузыря в насос при выдаче КРТ на емкости устанавливаются датчики верхнего и нижнего уровней КРТ, по сигналам которых система управления закрывает клапаны на приемном и выдающем трубопроводах СЗ.

Вывод по разделу

В данной части выпускной квалификационной работы определены общие проектные параметры заправочных систем РН компонентами ракетного топлива, рассмотрены общие принципы проведения отработки режимов заправки

топливных баков РН и создания заправочных систем, разработана принципиальная расчетная гидравлическая схема систем заправки РН жидким азотом.

2 РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Расчёт количества жидкого азота для заправки, захолаживания и подпитки баков РН

Процесс разработки криогенной заправочной системы РН среднего класса производится в соответствии со следующими исходными данными:

Система заправки – стационарная.

Подача компонента – вытеснительным методом.

Компонент ракетного топлива – жидкий азот.

Время хранения КРТ – 1 год.

Время подготовки КРТ – 10 дней.

Время заправки РН среднего класса – 20 минут.

Давление выдаваемого газообразного азота – 40 МПа.

Температура выдаваемого газообразного азота – плюс 20 °С.

Точка росы газообразного азота – минус 65 °С.

Необходимое количество криогенного компонента топлива, жидкого азота, достаточного для обеспечения проведения отработки режимов заправки топливного бака складывается из следующих составляющих:

$$G_{\text{нкт}} = G_1 + G_2 + G_3 + 2G_4 + 2G_5 + 2G_6 + 2G_7 + G_8 + G_9, \quad (2.1)$$

где G_1 – масса одной заправляемой дозы компонента топлива;

G_2 – масса жидкости, расходуемой на заполнение заправочных трубопроводов от хранилища до бака;

G_3 – конструктивный и тепловой недозабор криогенного продукта из резервуара, обусловленный геометрическими характеристиками резервуара и температурным расслоением жидкости;

G_4 – потери жидкости на охлаждение трубопроводов и бака до температуры кипения компонента топлива;

G_5 – потери жидкости на газификацию в теплообменнике-испарителе для

создания необходимого давления наддува в резервуаре;

G_6 – потери жидкости на испарение при охлаждении ее до заданной температуры перед подачей в бак;

G_7 – количество жидкости, расходуемое на подпитку бака в течение времени от конца заправки до пуска или же переноса пуска на заправленное количество часов;

G_8 – количество жидкости, необходимое для термостатирования заправленного бака;

G_9 – потери при сливе жидкости из бака в резервуары, если затем должна быть выполнена повторная заправка.

Масса одной заправляемой дозы жидкого азота рассчитывается по формуле:

$$G_1 = V_{\text{зк}} \cdot \rho_{\text{жА}}, \quad (2.2)$$

где $\rho_{\text{жА}}$ – плотность жидкого азота.

Определим массу одной заправляемой дозы компонента топлива:

$$G_1 = 12 \cdot 808 = 9696 \text{ кг.}$$

Находим приближенные значения относительных потерь

Масса жидкости, расходуемой на заполнение заправочных трубопроводов от хранилища до бака, определяются формулой:

$$G_2 = 0,2 \cdot G_1, \quad (2.3)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_2 = 0,2 \cdot 9696 = 1939,2 \text{ кг.}$$

Конструктивный и тепловой недозабор криогенного продукта из резервуара, обусловленный геометрическими характеристиками резервуара и температурным расслоением жидкости:

$$G_3 = 0,1 \cdot G_1, \quad (2.4)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_3 = 0,1 \cdot 9696 = 969,6 \text{ кг.}$$

Потери жидкости на охлаждение трубопроводов и бака до температуры кипения компонента топлива:

$$G_4 = 0,3 \cdot G_1, \quad (2.5)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_4 = 0,3 \cdot 9696 = 2908,8 \text{ кг.}$$

Потери жидкости на газификацию в теплообменнике-испарителе для создания необходимого давления наддува в резервуаре:

$$G_5 = 0,35 \cdot G_1, \quad (2.6)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_5 = 0,35 \cdot 9696 = 3393,6 \text{ кг.}$$

Потери жидкости на испарение при охлаждении ее до заданной температуры перед подачей в бак:

$$G_6 = 0,3 \cdot G_1, \quad (2.7)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_6 = 0,3 \cdot 9696 = 2908,8 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, расходуемое на подпитку бака в течение времени от конца заправки до пуска или же переноса пуска на заданное количество часов:

$$G_7 = 0,13 \cdot G_1, \quad (2.8)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_7 = 0,13 \cdot 9696 = 1260,48 \text{ кг.}$$

Количество жидкости, необходимое для термостатирования заправленного бака:

$$G_8 = 0,2 \cdot G_1, \quad (2.9)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_8 = 0,2 \cdot 9696 = 1939,2 \text{ кг.}$$

Потери при сливе жидкости из бака в резервуары, если затем должна быть выполнена повторная заправка:

$$G_9 = 0,2 \cdot G_1, \quad (2.10)$$

Подставляя значения, получим:

$$G_9 = 0,2 \cdot 9696 = 1938,2 \text{ кг.}$$

Определим необходимое количество для обеспечения проведения отработки режимов заправки в соответствии с формулой (2.1):

$$G_{\text{нктЖА}} = 9696 + 1939,2 + 969,6 + 2908,8 + 2 \cdot 3393,6 + 2 \cdot 2908,8 + 2 \cdot 1260,48 + 1939,2 + 2 \cdot 1939,2 = 36462,96 \text{ кг.}$$

Необходимо определить общее количество топлива системы для обеспечения проведения отработки режимов повторной заправки с учетом потерь компонента:

$$G_{\text{октЖА}} = G_{\text{нктЖА}} + G_4 + 2G_5 + 2G_6 + 2G_9, \quad (2.11)$$

Подставляя значения в формулу (2.11), получим:

$$G_{\text{октЖА}} = 36462,96 + 2908,8 + 2 \cdot 3393,6 + 2 \cdot 2908,8 + 2 \cdot 1939,2 = 55854,96 \text{ кг.}$$

Объем внутренних сосудов резервуаров хранилища имеет следующий вид:

$$V_{\text{рхЖА}} = \frac{G_{\text{октЖА}}}{(1 - \delta) \cdot \rho_{\text{ЖА}}}, \quad (2.12)$$

Подставляя значения, получим:

$$V_{\text{рхЖА}} = \frac{55854,96}{(1 - 0,03) \times 808} = 71,265 \text{ м}^3.$$

В соответствии с полученным значением выбираем резервуар горизонтальный цилиндрический РЦГ-100/0,4 для хранения кислорода, аргона,

азота. Резервуар состоит из внутреннего сосуда, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, который помещён в кожух из углеродистой стали 09Г1С. Пространство между внутренним сосудом и кожухом отвакуумировано до достаточного давления 0,001 Па. [8]

2.1.1 Расчет криогенного резервуара

2.1.1.1 Расчет цилиндрической обечайки резервуара жидкого азота

Для обечайки при $D \geq 200$ [мм] расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру:

$$\frac{s - c}{D} \leq 0,1, \quad (2.13)$$

Цилиндрическая обечайка представлена на рисунке 2.1

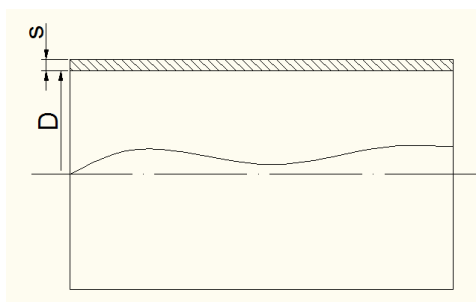


Рисунок 2.1 – Цилиндрическая обечайка

Толщину стенки гладкой цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением, следует рассчитывать по формуле:

$$s \geq s_p + c, \quad (2.14)$$

где $c = 0,001$ – прибавка на коррозию.

Для конструкционного материала 12Х18Н10Т:

Предел прочности: $\sigma_B = 570$ МПа,

Предел текучести: $\sigma_T = 210$ МПа.

Избыточное внутреннее давление $p = 0,4$ МПа;

Диаметр цилиндрической обечайки: $D = 2,8$ м.

Для данного вида материала допустимое напряжение принимается равным

наименьшему из двух значений:

$$\sigma_{\delta} = \frac{\sigma_B}{3}, \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\delta} = \frac{\sigma_T}{1,5}, \quad (2.16)$$

В соответствии с формулами (2.15), (2.16) получается:

$$\sigma_{\delta} = \frac{570}{3} = 190 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\delta} = \frac{210}{1,5} = 140 \text{ МПа}.$$

Таким образом, допустимое напряжение равно: $\sigma_{\delta} = 140 \text{ МПа}$.

Расчетная толщина стенки:

$$s_p = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 2,8}{2 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 1 - 0,5 \cdot 10^6} = 0,005 \text{ м}.$$

Действительная толщина:

$$s = 0,005 + 0,001 = 0,006 \text{ м}.$$

$$\frac{0,006}{2,8} = 0,002 \leq 0,1 \text{ — условие выполняется.}$$

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

$$[p]_n = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c)}{D+(s-c)}, \quad (2.17)$$

$$[p]_n = \frac{2 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (0,006 - 0,001)}{2,8 + (0,006 - 0,001)} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

2.1.1.2 Расчет эллиптического днища резервуара жидкого азота

Для эллиптических днищ расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру:

$$0,002 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0,1, \quad (2.18)$$

Эллиптическое днище представлено на рисунке 2.2.

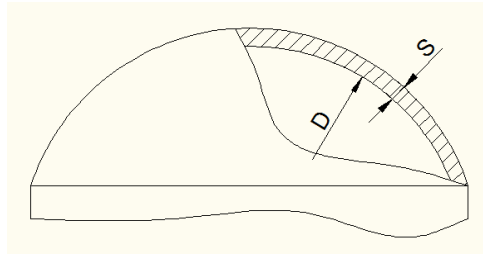


Рисунок 2.2 – Эллиптическое днище

Толщину стенки эллиптического днища, нагруженной внутренним избыточным давлением, следует рассчитывать по формуле:

$$s_1 \geq s_p + c, \quad (2.19)$$

где $c = 0,001$ – прибавка на коррозию.

Избыточное внутреннее давление $p = 0,4$ МПа.

Диаметр кривизны вершины днища: $D = 1,8$ м.

Для конструкционного материала 12X18H10T:

предел прочности: $\sigma_B = 570$ МПа,

предел текучести: $\sigma_T = 210$ МПа.

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

$$\sigma_\delta = \frac{\sigma_B}{3}, \quad (2.20)$$

$$\sigma_\delta = \frac{\sigma_T}{1,5}, \quad (2.21)$$

В соответствии с формулами (2.20), (2.21) получается:

$$\sigma_\delta = \frac{570}{3} = 190 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\delta} = \frac{210}{1,5} = 140 \text{ МПа.}$$

Таким образом, допустимое напряжение равно: $\sigma_{\delta} = 140 \text{ МПа}$.

Расчетная толщина стенки:

$$s_p = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 1,8}{2 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 1 - 0,5 \cdot 10^6} = 0,003 \text{ м.}$$

Действительная толщина:

$$s = 0,003 + 0,001 = 0,004 \text{ м.}$$

$$0,002 \leq \frac{0,004}{1,8} = 0,002 \leq 0,1 \text{ — условие выполняется.}$$

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

$$[p]_n = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c)}{D+(s-c)}, \quad (2.22)$$

$$[p]_n = \frac{2 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (0,004 - 0,001)}{1,8 + (0,004 - 0,001)} = 4,7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

2.1.2 Определение давления в газовой подушке резервуара

Расчёт минимального давления определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{мин.т}} = P_{\text{нт.т}} + P_{\kappa} + P_{\Sigma} - P_{\text{ст}}, \quad (2.23)$$

где P_{κ} – запас прочности выбирается из диапазона $0,5 \dots 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$;

P_{Σ} – суммарные потери давления, которые определяются по следующей формуле:

$$P_{\Sigma} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{кт}}^2}{2}, \quad (2.24)$$

где $V_{\text{кт}}$ – скорость истечения компонента в заправочной магистрали;

ζ – коэффициент местного сопротивления.

Подставляя значения в формулу (2.24), получим:

$$P_{\Sigma} = 3,4 \cdot \frac{808 \cdot 5^2}{2} = 34340 \text{ Па.}$$

Гидростатическое давление столба жидкости:

$$P_{ст} = \rho_{ж} \cdot g_o \cdot H_{ж} \cdot n_x, \quad (2.25)$$

где n_x – осевая перегрузка.

Подставляя значения в формулу (2.25), получим:

$$P_{ст} = 808 \cdot 9,81 \cdot 2,2 \cdot 1 = 17438,256 \text{ Па.}$$

Подставляя все найденные значения в формулу (23), получим:

$$P_{мин.} = 1,013 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5 + 34340 - 17438,256 = 318201,744 \text{ Па.}$$

Максимальное давление в подушке резервуаров хранилища:

$$P_{max,т} = D_{\delta} + P_{мин.т}, \quad (2.26)$$

где D_{δ} – разница между максимальным и минимальным давлениями, в пределах $2 \dots 4 \cdot 10^5$ Па

Подставляя значения в формулу (2.26), получим:

$$P_{max.} = 2 \cdot 10^5 + 318201,744 = 5,18202 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Номинальное давление в подушке резервуаров хранилища:

$$P_{ном.т} = \frac{P_{max.т} + P_{мин.т}}{2}, \quad (2.27)$$

Подставляя все найденные значения в формулу (2.27), получим:

$$P_{ном.} = \frac{5,18202 \cdot 10^5 + 318201,744}{2} = 4,18202 \cdot 10^5 \approx 0,4 \text{ МПа.}$$

2.1.3 Расчет процессов теплообмена в криогенной заправочной системе

Процессы теплообмена в криогенных заправочных системах являются критическим фактором, который в дальнейшем определяет эффективность и безопасность заправочных процессов.

В криогенной заправочной системе из-за разности температур между компонентом и окружающей средой происходит процесс теплообмена в резервуарах, трубопроводах и арматуре, в баках разгонного блока.

Взаимосвязь параметров теплообмена с множеством факторов усложняет расчёты криогенных заправочных систем и требует использования эмпирических зависимостей для их проведения.

Процесс испарения, происходящий при фазовом переходе жидкого азота в газообразное состояние определяется следующей формулой:

$$\Delta T = T_c - T_n, \quad (2.28)$$

где T_c – температура поверхности стенок;

T_n – температура насыщения жидкости.

Различают два типа систем, в которых происходит кипение:

- в большом объеме (резервуар);
- вынужденное движение жидкости (трубопроводы).

Плотность теплового потока q :

$$q = \alpha \cdot \Delta T, \quad (2.29)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

ΔT – разность температур.

Критические удельные тепловые потоки $q_{кр1}$ и $q_{кр2}$ определяют границы областей пузырькового и пленочного кипения. Верхняя граница эффективного и устойчивого пузырькового кипения определяется значением $q_{кр1}$ и соответствующим значением $\Delta T_{кр}$. Минимальное критическое значение $q_{кр2}$ в свою очередь определяет начало развития пленочного режима кипения. Между указанными режимами находится переходная зона неустойчивого режима кипения.

Определим критическое значение теплового потока $q_{кр1}$ при кипении в большом объеме:

$$q_{кр1} = K \cdot r \cdot \rho_n \cdot \left[\frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho_{жс} - \rho_z)}{\rho_z^2} \right]^{0,25}, \quad (2.30)$$

где $K = 0,16$ – постоянная;

$r = 199 \cdot 10^3$ – теплота фазового перехода, Дж/кг;

$\sigma = 8,5 \cdot 10^{-3}$ – поверхностное натяжение, Н/м;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²;

$\rho_{жс} = 808$ и $\rho_z = 1,25$ – плотность жидкости и газа, кг/м³.

Подставляя значения в формулу (2.30), получим:

$$q_{кр1} = 0,16 \cdot 199 \cdot 10^3 \cdot 1,25 \cdot \left[\frac{9,81 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot (808 - 1,25)}{1,25^2} \right]^{0,25} = 101949,42 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Примерное значение критического параметра $\Delta T_{кр}$ для криогенной жидкости (ЖА), кипящий в большом объеме, можно определить по максимальному значению удельного теплового потока $q_{кр1}$.

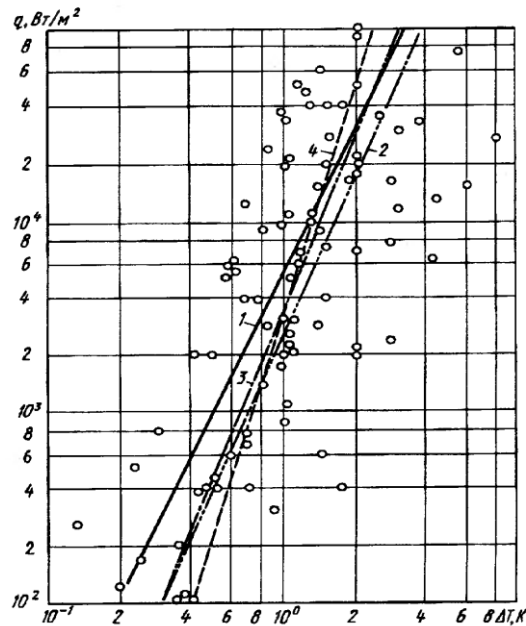


Рисунок 2.3 – Опытные и расчетные данные по пузырьковому кипению

Используя следующее соотношение, определим минимальный тепловой поток $q_{кр2}$:

$$\frac{q_{кр1}}{q_{кр2}} = \sqrt{\frac{\rho_{жс}}{\rho_s}}, \quad (2.31)$$

Определим из формулы (2.31) минимальный тепловой поток:

$$q_{кр2} = \frac{101949,428}{\sqrt{\frac{808}{1,25}}} = 4009,905 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Термическое сопротивление низкотеплопроводного слоя пара между стенкой и жидкостью определяет удельный тепловой поток q и коэффициент теплоотдачи α . Решение данной задачи сводится к применению следующей зависимости для кипения на поверхности сферы:

$$\alpha = 0,62 \cdot \left[\frac{\lambda_n^2 \cdot \rho_n \cdot (\rho_{жс} - \rho_n) \cdot g \cdot r^1}{(\mu_n \cdot \Delta T \cdot D)} \right]^{0,25}, \quad (2.32)$$

где $\lambda_n = 0,026$ – теплопроводность пара, Вт/м·К;

$\mu_n = 17,2$ – динамическая вязкость пара, мкПа·с;

$r^1 = 199 \cdot 10^3$ – теплота фазового перехода, Дж/кг;

$D = 2,8$ – диаметр цилиндра, [м].

Подставляя значения в формулу (2.32), определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 0,62 \cdot \left[\frac{0,026^2 \cdot 1,25 \cdot (800 - 1,25) \cdot 9,81 \cdot 199 \cdot 10^3}{17,2 \cdot 1,7 \cdot 2,8} \right]^{0,25} = 6,983 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

2.1.4 Расчёт процесса наддува емкости хранилища жидкого азота

Наддув резервуара производится газообразным азотом, подаваемым из хранилища газов. Поскольку жидкий азот должен храниться при очень низких температурах, важно учитывать температуру окружающей среды и возможное изменение температуры в процессе наддува.

Суммарная масса газа для наддува резервуара будет складываться из:

— массы газа, заполняющего подушку резервуара - M_n ;

— массы газа сконденсировавшегося на стенке сосуда при нагревании её от начальной температуры до температуры конденсации - M_{cm} .

$$M_{\Sigma} = M_n + M_{cm}, \quad (2.33)$$

Масса газа, заполняющего подушку резервуара определяется по формуле:

$$M_n = \frac{P_n V}{R_g T_g} - M_{ост}, \quad (2.34)$$

где $M_{ост}$ — масса газа, зполняющего подушку в первоначальный момент, кг.

V — объём газовой подушки;

P_n — даление наддува резервуара;

R_g — уддельная газова постоянная газообразного азота;

T_g — температура газообразного азота.

Начальный объём жидкого азота:

$$V_{ж_1} = \varphi_1 \cdot V. \quad (2.35)$$

Подставляя значения в формулу (2.35) получим:

$$V_{ж_1} = 0,95 \cdot 112 = 106,4 \text{ м}^3.$$

Конечный объём жидкого азота:

$$V_{ж_2} = \varphi_2 \cdot V. \quad (2.36)$$

Подставляя значения в формулу (2.36) получим:

$$V_{ж_1} = 0,05 \cdot 112 = 5,6 \text{ м}^3.$$

Объём газовой подушки:

$$V_{n_1} = V - V_{ж_n}. \quad (2.37)$$

Подставляя значения в формулу (2.37) получим:

$$V_{n_1} = 112 - 106,4 = 5,6 \text{ м}^3,$$

$$V_{n_2} = 112 - 5,6 = 106,4 \text{ м}^3.$$

Подставляя найденные значения в формулу (2.34) получим:

$$M_n = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 106,4}{297 \cdot 77} - 24,5 = 13933,259 \text{ кг.}$$

Масса продукта, сконденсировавшегося на стенке сосуда определяется по формуле:

$$M_{cm} = \frac{Q_{cm}}{r + \int_{T_s}^{T_p} c_p \cdot dT}, \quad (2.38)$$

где Q_{cm} – количество тепла, полученное стенкой резервуара над зеркалом жидкости при нагревании её от начальной температуры T_1 до температуры конденсации T_s , Вт.

$$Q_{cm} = \alpha A \cdot Tt. \quad (2.39)$$

Подставляя значения в формулу (2.39) получим:

$$Q_{cm} = 6,558 \cdot 172,3 \cdot (115 - 70) \cdot 900 = 45762,708 \text{ кДж.}$$

Масса сконденсировавшегося азота согласно формуле (2.38) получим:

$$M_{cm} = \frac{45762,708}{120 + 67,5} = 244 \text{ кг.}$$

Суммарная масса газа для наддува резервуара согласно формуле (2.33) будет равна:

$$M_{\Sigma} = 13933,259 + 244 \approx 14177 \text{ кг.}$$

В зависимости от применяемых топлив, для наддува используются воздух, азот, гелий или водород. Для проектируемой системы заправки в качестве рабочего тела системы наддува выбирается газообразный азот. Давление в газовой подушке должно быть 3 МПа.

Зная объем баллонов, после выбора типа баллонов для газа наддува можно определить их количество, которое необходимо для компоновки отсеков и

системы наддува. Азотные баллоны могут иметь различную емкость – от 5 до 50 литров. Выбираются баллоны по ГОСТ 949-73 объемом 40 л, вмещающие 16 м³ под давлением 400 атм. Тогда количество баллонов:

$$V_{\text{необх.}} = 106,4 \cdot \frac{3}{0,1} = 3192 \text{ м}^3.$$

$$N_{\text{бал}} = 3192/16 \approx 200.$$

Массовый расход газа наддува:

$$\dot{m}_{\text{газ}} = \frac{M_{\text{газ}}}{\tau}. \quad (2.40)$$

Тогда:

$$\dot{m}_{\text{газ}} = \frac{14177}{900} = 15,752 \text{ кг/с}.$$

2.1.4 Расчёт насосной системы подчи жидкого азота для процесса газификации

Газификация жидкого азота — это процесс, при котором жидкий азот превращается в газообразный азот путем нагрева.

Жидкий азот имеет температуру около минус 196 °С. При нагревании до комнатной температуры он быстро превращается в газообразный азот.

Газификация происходит путём подачи ЖА с помощью насосного агрегата из резервуара системы в электрический испаритель, где жидкий азот испаряется и переходит в газообразное состояние и затем поступает потребителю, в данном случае – ресиверы хранилища СГ (рисунок 2.4).

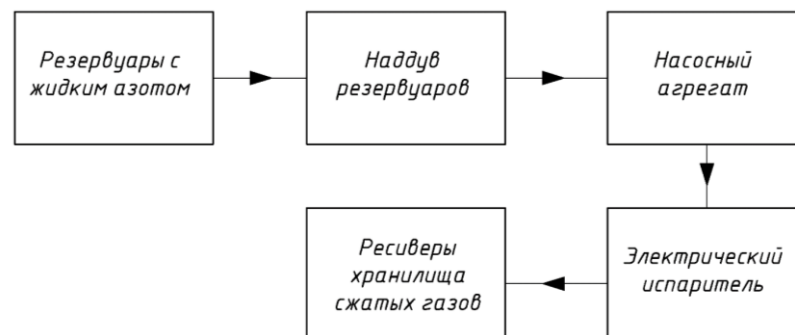


Рисунок 2.4 – Процесс газификации жидкого азота

Для обеспечения процесса газификации необходимо правильно подобрать насосный агрегат. В связи с чем возникает выбор между поршневым и центробежным насосом для сжиженных газов, который зависит от нескольких факторов, таких как: требования к давлению, производительности.

В соответствии с исходными данными, выбирается поршневой насос для перекачки сжиженных газов под высоким давлением, так как центробежный насос может быть более эффективным вариантом, если давление не является критическим фактором.

Требуется оценить основные параметры насоса для компоновки системы. К таким параметрам относятся:

- напор и угловая скорость ротора;
- геометрические параметры насосного агрегата (диаметры входного и выходного патрубков, габаритные размеры – диаметр и осевая длина корпуса насоса);
- масса и мощность насоса.

Знать диаметры патрубков нужно для определения диаметров подводящих и отводящих трубопроводов, размеры насоса – для его правильного размещения, массу насоса – для расчета фундамента.

В качестве прототипов насосов выбираются поршневые насосы высокого давления для перекачки сжиженного газа.

В соответствии с вышеуказанными требованиями система должна обеспечивать следующие технологические операции в части газификации ЖА для закачки ресиверов общего хранилища газов азотом высокого давления:

- первоначальную закачку ресиверов (70000 кг);
- дозакачку ресиверов перед песком РН (15000 кг);
- дозакачку ресиверов при повторном переносе пуска РН (10000 кг).

Мощность насоса, необходимая для процесса газификации, определяется формулой:

$$N_{\text{н}} = \frac{Q \cdot P}{\eta_{\text{н}}}, \quad (2.41)$$

где $\eta_{\text{н}} = 0,60 \dots 0,85$ – КПД насоса.

Q – производительность $\text{м}^3/\text{с}$;

P – давление (Па).

Производительность определяется формулой:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.42)$$

где V – объём жидкого азота, необходимого для закачки ресиверной м^3 .

В соответствии с формулой (2.42), определяется производительность:

$$Q_1 = \frac{70000 / 808}{3600} = 0,024 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_2 = \frac{15000 / 808}{3600} = 0,005 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_3 = \frac{10000 / 808}{3600} = 0,003 \text{ м}^3/\text{с}.$$

В соответствии с формулой (2.41), определяется мощность насоса:

$$N_{\text{н}_1} = \frac{0,024 \cdot 40}{0,8} = 1,2 \text{ кВт},$$

$$N_{\text{н}_2} = \frac{0,005 \cdot 40}{0,8} = 0,25 \text{ кВт},$$

$$N_{\text{н}_3} = \frac{0,003 \cdot 40}{0,8} = 0,15 \text{ кВт}.$$

Поршневые насосы предназначены для подачи сжиженных газов (азота, аргона, кислорода, метана, водорода, гелия, двуокиси углерода и др.) из криогенных и изотермических резервуаров под давлением до 500 бар. Насосы имеют широкий диапазон производительностей – от 0,6 до 25 л/мин. Возможно увеличение подачи до 50 л/мин. Выбирается поршневой насос Поршневой насос Cryostar LDPD (рисунок 2.5) с ходом поршня 40-50 мм

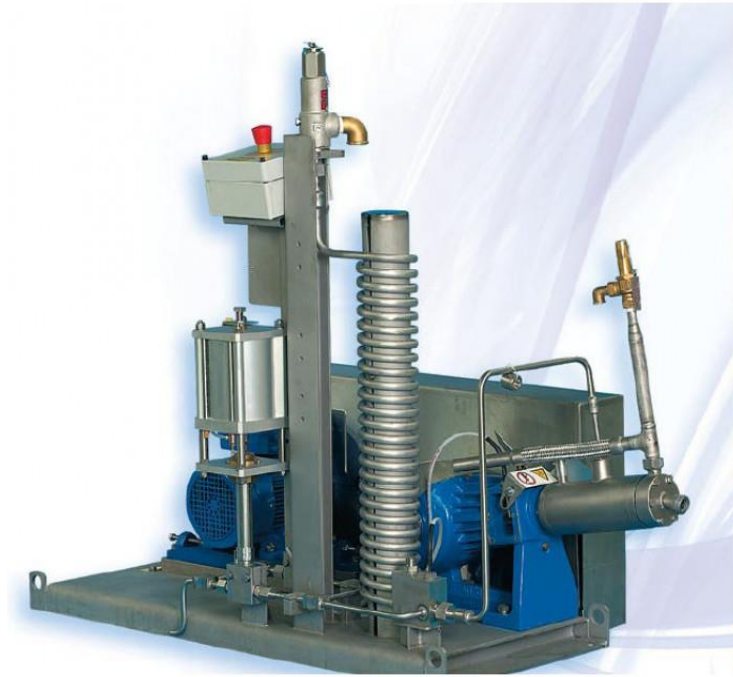


Рисунок 2.5 – Поршневой насос Cryostar PDP

2.2 Гидравлический расчёт системы заправки ракеты-носителя

Исходные данные:

Топливо: жидкий азот;

Плотность $\rho = 808 \text{ кг/м}^3$;

Динамическая вязкость $\eta = 1,58 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

Общий объем заправляемой дозы: $V = 2030 \text{ л}$;

Время заправки: $T_{\text{мин}} = 20 \text{ мин}$;

Расположение уровней КРТ в рабочей емкости системы заправки и заправляемом баке РН относительно «нулевой» отметки: $Z_{\text{емк}}^{\text{мин}} = 0,9 \text{ м}$, $Z_{\text{бак}}^{\text{макс}} = 3,0 \text{ м}$.

Ориентировочное расстояние между рабочей емкостью и заправляемым баком: $l = 850 \text{ м}$.

Методом подачи компонента – вытеснительный.

Определим необходимую производительность заправки:

$$Q = \frac{V_{\text{зк}}}{T_{\text{запр}}}, \quad (2.43)$$

где $V_{\text{зк}}$ – объем заправляемой дозы;

$T_{\text{запр}}$ – желаемое суммарное время заправки.

Подставляя значения, получим:

$$Q = \frac{2030}{20} = 101,5 \text{ л/мин.}$$

Зная Q и принимая во внимание рекомендуемую зону скоростей (по таблице А.1 из Приложения А) находим значение желательных диаметров D_y арматуры и трубопроводов для заправки жидкого азота – ступеней РН. [9]

Используя осредненные данные из таблицы А.1 значений коэффициентов местных сопротивлений $\xi_{\text{мест}}$ и коэффициента трения λ , составим таблицу элементов системы по схеме рисунок 2.5 и их собственных коэффициентов гидравлического сопротивления $\xi_{\text{собст}}$ представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчёт коэффициентов местных сопротивлений участков магистрали захолаживания, подпитки и заправки РН

№	Наименование	D_y , мм	$\xi_{\text{собст}}$	n , шт.	$\Sigma \xi_n = \xi_{\text{собст}} \cdot n$
1	Вход в трубу	50	0,5	1	$0,5 \cdot 1 = 0,5$
2	Трубопрово $L=7$ [м]	50	$\frac{0,03 \cdot 7}{2} = 0,105$	1	$0,105 \cdot 1 = 0,105$
3	Поворот плавный на 90°	65	0,3	7	$0,3 \cdot 11 = 3,3$
4	Поворот плавный на 90°	25	0,2	2	$0,2 \cdot 2 = 0,4$
5	Трубопровод $L=2,2$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 2,2}{2} = 0,033$	1	$0,033 \cdot 1 = 0,033$
6	Трубопровод $L=1$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 1}{2} = 0,033$	2	$0,033 \cdot 1 = 0,033$
7	Трубопровод $L=2$ [м]	25	$\frac{0,03 \cdot 2}{2} = 0,03$	2	$0,03 \cdot 3 = 0,06$
8	Поворот плавный на 90°	25	0,2	2	$0,2 \cdot 2 = 0,4$
9	Трубопровод $L=2,2$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 2,2}{2} = 0,033$	1	$0,033 \cdot 1 = 0,033$
10	Трубопровод $L=1$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 1}{2} = 0,033$	2	$0,033 \cdot 1 = 0,033$
11	Трубопровод $L=2$ [м]	25	$\frac{0,03 \cdot 2}{2} = 0,03$	2	$0,03 \cdot 3 = 0,06$
12	Трубопровод $L=2,2$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 2,2}{2} = 0,033$	1	$0,033 \cdot 1 = 0,033$

Продолжение таблицы 2.1

	Наименование	D_y , мм	$\xi_{\text{собст}}$	n , шт.	$\Sigma \xi_n = \xi_{\text{собст}} \cdot n$
13	Клапан	25	5	2	$5 \cdot 2 = 10$
14	Трубопровод $L=35$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 35}{2} = 0,525$	1	$0,525 \cdot 1 = 0,525$
15	Трубопровод $L=2$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 2}{2} = 0,03$	1	$0,03 \cdot 1 = 0,03$
16	Трубопровод $L=50$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 50}{2} = 0,75$	1	$0,75 \cdot 1 = 0,75$
17	Трубопровод $L=20$ [м]	65	$\frac{0,03 \cdot 20}{2} = 0,3$	1	$0,3 \cdot 1 = 0,3$
18	Трубопровод $L=5$ [м]	50	$\frac{0,03 \cdot 5}{2} = 0,075$	5	$0,075 \cdot 5 = 0,375$
19	Трубопровод $L=7$ [м]	50	$\frac{0,03 \cdot 7}{2} = 0,105$	5	$0,105 \cdot 5 = 0,525$
20	Поворот плавный на 90°	50	0,3	20	$0,3 \cdot 20 = 6,0$
21	Клапан	50	5	10	$5 \cdot 10 = 50$
22	Трубопровод $L=1$ [м]	50	$\frac{0,03 \cdot 1}{2} = 0,015$	10	$0,015 \cdot 10 = 0,15$
23	Трубопровод $L=3$ [м]	50	$\frac{0,03 \cdot 3}{2} = 0,045$	5	$0,045 \cdot 10 = 0,225$
24	Металлорукав $L=5$ [м]	50	$\frac{0,3 \cdot 5}{2} = 0,75$	5	$0,75 \cdot 5 = 3,75$
$\Sigma \xi_{\varnothing 65} = \sum_{i=1}^n \Sigma \xi_n$					78,854

Рассчитаем необходимый напор, требуемый на преодоление местных сопротивлений и сопротивления трения трубопровода:

$$\Delta H_{\text{гидр}} = \Sigma \xi_{\varnothing 65} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2.44)$$

где $\frac{v^2}{2g} = 0,053$, для $Q = 101,5$ л/мин;

Подставляя значения, получим:

$$\Delta H_{\text{гидр}} = 78,854 \cdot 0,053 = 7,146 \text{ м.ж.ст.}$$

Определим напор, необходимый для подъема жидкости от уровня рабочей емкости до уровня бака:

$$\Delta H_{\text{стат}}^{\text{max}} = Z_{\text{бак}}^{\text{max}} - Z_{\text{емк}}^{\text{min}}, \quad (2.45)$$

где $Z_{емк}^{min}$, $Z_{бак}^{max}$ – расположение уровня КРТ в рабочей емкости системы заправки и заправляемом баке РН относительно «нулевой» отметки;

Подставляя значения, получим:

$$\Delta H_{стат}^{max} = 3 - 0,9 = 2,1 \text{ м.ж.ст.}$$

Находим полный напор, необходимый для заправки с производительностью:

$$H_{полн} = \Delta H_{гидр} + \Delta H_{стат}^{max}, \quad (2.46)$$

$$H_{полн} = 7,146 + 2,1 = 9,246 \text{ м.ж.ст.}$$

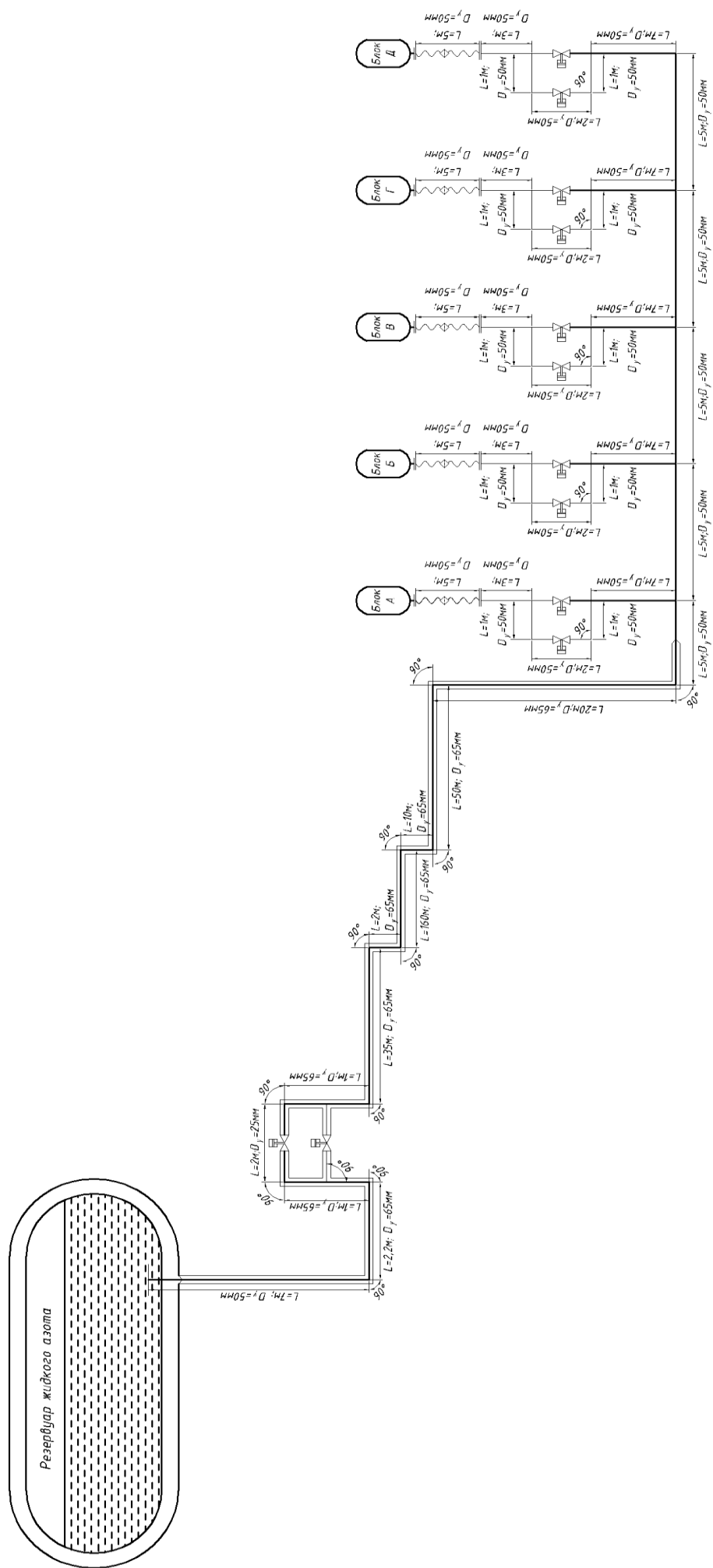


Рисунок 2.6 – Гидравлический расчёт системы заправки жидким азотом

2.3 Оптимизация технических характеристик по входным параметрам принимаемый криогенных компонентов

2.3.1 Обеспечение чистоты криогенных продуктов

В связи с теми, что криогенные продукты могут содержать различные виды примесей, что в свою очередь может привести к выходу оборудования из строя, снижению его эффективности или потребности в частом техническом обслуживании и ремонте. Присутствие примесей также может изменять такие характеристики, как точка кипения или замерзания, текучесть и теплопроводность, что может усложнить управление температурными режимами и ухудшить общую надежность системы. Чтобы минимизировать риск возникновения описанных ситуаций, криогенные продукты должны соответствовать установленным стандартам чистоты. Специалисты эксплуатационных подразделений совместно с представителями физико-химической лаборатории должны регулярно проводить анализы для выявления примесей и использовать фильтрационные и очистные системы, если это необходимо. Качественный контроль и правильное обслуживание оборудования помогают обеспечить надежную и безопасную работу криогенных систем в различных применениях, от промышленного производства до медицинских технологий. [10]

Подобное загрязнение криогенных продуктов посторонними газами из-за их конденсации может происходить при первичном заполнении резервуаров, последующем наддуве газами паровых полостей и в результате подсоса воздуха из окружающей среды. Комплекс мероприятий для обеспечения нужной чистоты продуктов включает подготовку рабочих поверхностей оборудования, обеспечение герметичности оборудования, подготовку внутренних объемов систем к приему продуктов, а также технологические мероприятия, такие как эксплуатация под избыточным давлением в системе и использование чистых газов для наддува. Также применяются методы фильтрационной и адсорбционной очистки криогенных жидкостей. Наибольшую популярность для

фильтрации криогенных жидкостей с размером ячеек 70...30 мкм получили сетчатые фильтры, изготовленные из проволоки из нержавеющей стали.

Комплекс мероприятий по обеспечению требуемой чистоты продуктов включает: подготовку рабочих поверхностей оборудования; обеспечение герметичности оборудования; подготовку внутренних объемов систем к приему продуктов; технологические мероприятия (эксплуатацию под избыточным давлением в системе, использование чистых газов для наддува); фильтрационную и адсорбционную очистку криогенных жидкостей.

Наибольшее распространение для фильтрации криогенных жидкостей с размером ячейки 70...30 мкм получили сетчатые фильтры из нержавеющей стальной проволоки.

При необходимости фильтрации криогенных продуктов от частиц размером менее 20 мкм применяют выпускаемые промышленностью металлические пористые ленты, полученные из порошков прессованием или прокаткой с последующим спеканием (типа ФНС), также используют фильтры из пористого фторопласта (типа ФЭП) и волокнистых тканей (типа ФПП). Достоинство пористого фторопласта помимо высокой тонкости очистки заключается в значительно большем ресурсе работы по сравнению с материалами типа (ФНС).

В сетчатых фильтрующих элементах используется металлическая проволока, которая служит для обеспечения соответствующей степени очистки для криогенных компонентов топлива. Формирование квадратного или саржевого плетения ячейки сетки позволяет создать эффективную структуру для фильтрации.

Пористые фильтрующие элементы очищают криогенные продукты за счёт прохождения компонента через поры. Такие фильтры позволяют обеспечить тонкую или особо тонкую степени фильтрации, так как их применение связано с необходимостью более глубокой очистки, чего невозможно в сетчатых фильтрах. [11]

2.3.2 Материалы фильтроэлементов КРТ

Фторопласт – 4 (Ф – 4) обладает исключительной химической инертностью по отношению практически ко всем агрессивным средам (за исключением расплавов щелочных металлов и трифторида хлора). Это качество фторопласта используется при эксплуатации трубопроводов для транспортировки высоко агрессивных сред, футеровке реакторов, аппаратов колонного типа, запорной арматуры, фильтров, насосов, ёмкостей для хранения химически активных сред, прокладочно-уплотнительных деталей контактирующих с агрессивными средами и др.

Эти свойства делают его незаменимым в различных применениях, где важны надежность и долговечность, особенно в условиях влияния агрессивных сред и экстремальных температур.

Нержавеющая сталь, со своей стороны, широко используется благодаря своей коррозионной стойкости, прочности и долговечности, что делает её востребованной в самых разных отраслях — от пищевой промышленности до энергетики и транспорта.

Обе эти группы материалов — фторопласты и нержавеющая сталь — играют ключевую роль в обеспечении надежности и эффективности производственных процессов и оборудования.

2.3.3 Расчет фильтров КРТ

Характеристики фильтров для жидкого азота представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики фильтров

Марка фильтроматериала	Толщина, мм	Тонкость филтрации, мкм	Пористость	Материал
С450(ТУ14-4-432-73)	0,2	60	0,43	12Х18Н10Т
ФЭП10-12(МРТУ6-23)	3-5	10-12	0,78-1,9	Фторопласт-4

Гидравлическое сопротивление фильтра определяют по формуле:

$$\Delta p = \frac{2fpW^2h}{d_{\text{пор}}g\varepsilon^2}, \quad (2.47)$$

где f – коэффициент, зависящий от критерия Рейнольдса;

p – плотность протекающей жидкости, кг/м³;

h – толщина фильтрующего элемента, м;

$d_{\text{пор}}$ – средний диаметр пор, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ε – пористость;

W – скорость фильтрации, обычно принимают $W = 0,015$ м/с;

По результатам экспериментов принимают:

при $Re < 10$

$$f = \frac{38}{Re}, \quad (2.48)$$

при $10 < Re < 250$

$$f = \frac{38}{Re} + \frac{1,25}{Re^{0,15}}, \quad (2.49)$$

при $250 < Re < 5000$

$$f = \frac{1,56}{Re^{0,15}}. \quad (2.50)$$

При этом критерий Рейнольдса для фильтров:

$$Re = \frac{Wd_{\text{пор}}p}{\mu g\varepsilon}, \quad (2.51)$$

где μ – динамическая вязкость, кгс/м².

Окончательное сопротивление фильтрующего элемента определяется уровнем его загрязнения. Для обеспечения чистоты жидкого азота, поступающего в резервуары хранилища системы, следует проводить очистку фильтрующих элементов перед каждым приёмом.

Гидравлическое сопротивление сетчатого фильтра С450 (ТУ14-4-432-73), $d_{пор} = 25$ мкм, $\mu = 1920$ кгс / м², критерий Рейнольдса для фильтров определяем по формуле:

$$Re = \frac{W d_{пор}^p}{\mu g \varepsilon}, \quad (2.52)$$

$$Re = \frac{0,015 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 1141}{1920,8 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot 0,43} = 0,052$$

По формуле (2.48) определяем коэффициент, зависящий от критерия Рейнольдса:

при $Re < 10$

$$f = \frac{38}{0,052} = 730,76.$$

По формуле (2.47) определяем гидравлическое сопротивление фильтра:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 730,6 \cdot 1141 \cdot (0,015)^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot (0,43)^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2.$$

Гидравлическое сопротивление фильтра ФЭП 10-12(МРТУ6-2-35) из высокопористого фторопласта, $d_{пор} = 38$ мкм, $\mu = 1920$ кгс / м² критерий Рейнольдса для фильтров определяем по формуле (2.52):

$$Re = \frac{0,015 \cdot 38 \cdot 10^{-6} \cdot 1141}{1920,8 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot 0,78} = 0,04.$$

По формуле (2.48) определяем коэффициент, зависящий от критерия Рейнольдса

при $Re < 10$

$$f = \frac{38}{0,04} = 950.$$

По формуле (2.47) определяем гидравлическое сопротивление фильтра, но у фильтра ФЭП пропускная способность меньше, чем у сетчатого (С450) фильтра, для этого поставили четыре пакетных фильтров, чтобы пропускная способность было больше.

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 950 \cdot 1141 \cdot (0,015)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{38 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot (0,78)^2} / 4 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2.$$

Вывод по разделу

В данном разделе выпускной квалификационной работы произведены расчеты гидравлические заправочных систем, процессов теплообмена, а также охлаждения криогенного продуктов.

Результаты проведенных расчетов показывают соответствие выбранной компоновочной схемы, способов подачи топлива в баки РН, геометрических характеристик элементов заправочных систем.

Выполнены работы по улучшения эксплуатационных характеристик криогенных компонентов ракетного топлива при заправке РН. Оптимизации приемного сетчатого фильтра с толщиной 60 мкм на пористый фторопластный фильтр (4-пакетный) с толщиной 10-12 мкм. Был произведен гидравлический расчет на сопротивление фильтра и сравнительный анализ. При сравнении была выбрана пористый фторопластный фильтр по причине тонкости очистки 10-12 мкм и сопротивление меньше, а проницаемость больше. Также данная модернизация позволяет повысить герметичность запорных и регулирующих устройств, а также увеличить межремонтное время эксплуатации системы. Уменьшается износ рабочих поверхностей и повышается точность работы расходомеров.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАПРАВКИ

Технологический процесс (ТП) — это упорядоченный алгоритм действий, которые выполняются с момента возникновения исходных данных до получения требуемого результата.

Исходя из типа КРТ, выделяют СЗ криогенного и СЗ высококипящего топлива. Отличие этих двух систем в общем виде состоит в том, что все оборудование СЗ криогенными КРТ имеет вакуумную изоляцию (экранно-вакуумную или порошково-вакуумную).

Система контроля заправкой — предназначена для управления технологическим оборудованием системы заправки РН окислителем и системы заправки РН горючим.

Система состоит из двух подсистем: САДУ системой заправки окислителем; САДУ системой заправки горючим.

Режимами работы системы контроля заправкой являются автоматический при заправке и пооперационный для заключительных операций после пуска, при задержке пуска, при стоянке заправленной РН и работах при несостоявшемся пуске.

3.1 Основные операции системы заправки жидким азотом

Захолаживание СЗЖА. По команде РР оператор АРМ СЗЖА включает операцию «Захолаживание СЗЖА» и начинается процесс захолаживания системы и кольцевого коллектора до блока клапанов, расположенных в стартовом сооружении. Параллельно начинается подъём давления в резервуаре с жидким азотом, до рабочего давления 0,3 МПа. Надув резервуара осуществляется подачей газообразного азота от общего хранилища газов через редуктор колонки выдачи, понижающей давление газообразного азота до значения от 0,44 до 0,46 МПа. Для исключения гидроудара при подаче в ЖА в теплые трубопроводы системы захолаживание системы начинается подачей ЖА малым расходом. Пар азота, образующийся при захолаживании трубопроводов, поступает в магистральный трубопровод.

После чего пар поступает в кольцевой коллектор заправки РН, охлаждая оборудование и трубопроводы, и сбрасывается в атмосферу через предохранительный клапан.

Захлаживание осуществляется не менее 10 минут до получения необходимо температуры ЖА в кольцевом коллекторе (меньше 83К). Через 1 минуту при достижении температуры закрывается предохранительный клапан. Через 1 минуту при достижении давления в резервуаре 0,28 МПа открывается клапан для увеличения расхода подачи ЖА из резервуара жидкого азота. Проливка трубопровода продолжается жидким азотом и параллельно поддерживается давление в резервуаре до 0,3 МПа.

После процесса захлаживание по команде РР включается одновременная заправка ЖА баков блоков А-Д РН.

Операция начинается подачей ЖА в бак каждого блока МР через соответствующие клапана для захлаживания концевых клапанов системы, заправочных цепочек и соответствующих баков РН. Пары азота при этом сбрасываются в атмосферу через дренажные клапаны баков и по переливным коммуникациям в газоход. Через 5 минут открываются соответствующие клапана и начинается подача ЖА в каждый бак блока А-Д РН большим расходом заправки.

Заправка БР каждого бака осуществляется до получения сигнала «ПЕРЕЛИВ» в нём от соответствующего датчика перелива, после чего для данного блока закрывается клапан и включается операция «ПОДПИТКА».

В ходе подачи ЖА в РН БР заправки осуществляется контроль температуры в кольцевом коллекторе в диапазоне от 80,8 до 80,7 К проливкой трубопроводов ЖА при повышении температуры (больше 80,8 К). При переходе на подпитку РН контроль температуры прекращается.

После получения сигналов перелива по всем блокам Р автоматически формируется операция «ПОДПИТКА» РН. Рабочее давление в резервуаре понижается до 0,2 МПа и поддерживается в диапазоне 0,19-0,20 МПа.

Подпитка баков продолжается до объявления «ГОТОВНОСТЬ К ПУКУ 15 МИНУТ». Прекращается подпитка баков РН. Закрываются клапана подачи ЖА всех баков и включается дренаж ЖА из заправочных магистралей в газоход. Параллельно прекращается наддув резервуара. Подается газообразный азот от общего хранилища газ и осуществляется продувка трубопроводов. По команде КП осуществляется автоматическая отстыковка заправочных и переливных коммуникаций.

Вывод по разделу

В данной части выпускной квалификационной работы была изучена техническая документация, рассмотрен процесс заправки РН среднего класса жидким азотом. Рассмотрены основные команды и операции согласно разработанной циклограммы заправки для проектируемой СЗ.

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ

Безопасность жизнедеятельности является важнейшим аспектом в процессах эксплуатации промышленных систем и оборудования, особенно когда речь идет о работе с потенциально опасными веществами, такими как жидкий азот.

Жидкий азот широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим особенностям, включая низкую температуру и инертность. Однако его использование связано с рядом рисков, таких как опасность обморожения и удушья. В связи с этим крайне важно разработать и строго соблюдать технику безопасности при приеме, хранении и заправке жидким азотом.

Одним из ключевых аспектов безопасности при работе с жидким азотом является обеспечение надлежащей вентиляции. Поскольку жидкий азот при испарении создает большой объем газа, который может вытеснять кислород в рабочей зоне, это создает риск удушья для персонала. Поэтому расчет и внедрение эффективной системы вентиляции заправочной станции становится критически важным для поддержания безопасных условий труда.

В данном разделе работы будет рассмотрена техника безопасности при эксплуатации системы приема, хранения и заправки жидким азотом, а также будет проведен расчет средств обеспечения вентиляции рабочей зоны. Главной целью является создание условий, при которых потенциальные риски использования жидкого азота минимизируются, а здоровье и безопасность работников находятся под надежной защитой. Рассмотрим основные требования к безопасности, включая установку и обслуживание вентиляционных систем, чтобы гарантировать, что рабочая среда остается безопасной и соответствует стандартам охраны труда.

4.1 Общие требования техники безопасности при работе с криогенными компонентами топлива (жидким азотом)

Общие требования техники безопасности при работе с жидким азотом, а также его характеристики описаны в ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) «Азот газообразный и жидкий. Технические условия».

Азот не токсичен, но при повышении его содержания в закрытых пространствах из-за снижения содержания кислорода в воздухе может вызвать удушье и потерю сознания.

ЖА при испарении обогащается кислородом. При повышении объёмной доли кислорода в ЖА до 30% возможно образование пожаро- и взрывоопасной смеси с органическими веществами. Поэтому в открытых сосудах с ЖА присутствие масла, органических растворителей и других пожаро- и взрывоопасных веществ недопустимо.

Для слива ЖА необходимо использовать специально отведённые участки, предусмотренные для слива-приёма. Важно, чтобы эти места не имели горючих покрытий.

4.1.1 Защита от ожогов и обморожения

При работе с жидким ЖА быть приняты меры, исключающие контакт обслуживающего персонала с ЖА, а также с поверхностями, находящимися при низких температурах. С этой целью применяют герметизацию, теплоизоляцию, ограждение оборудования, предупредительные надписи и окраску. Не разрешается проводить какие-либо ремонтные работы, подтяжку уплотнений и тому подобное во время работы оборудования без его остановки и полного отогрева. [12]

Работы с жидким азотом, связанные с открытым сливом, переливом, когда возможно разбрызгивание капель жидкости, следует проводить в заправленных под рукава защитных рукавицах и защитных очках с боковыми щитками. Верхняя одежда должна быть наглухо закрыта, а брюки должны прикрывать обувь (навыпуск). Лица, постоянно занятые на сливе или наливе жидких продуктов, должны быть одеты в брезентовый костюм с брюками навывпуск. [13]

При работе с жидким азотом важно использовать следующие средства индивидуальной защиты:

1. Термозащитная одежда. Основная задача термозащитной одежды заключается в защите кожи от обморожений. Одежда должна быть выполнена из материалов, устойчивых к воздействию низких температур и испарений азота.

2. Защитные перчатки. Перчатки для работы с криогенными веществами должны быть водонепроницаемыми и утепленными, но при этом не ограничивать маневренность. Они должны защищать руки от прямого контакта с жидким азотом и обеспечивать теплоизоляцию.

3. Защитные очки или щитки. Необходимость защиты глаз обусловлена возможностью выплеска или разбрызгивания жидкости, а также испарений. Прозрачные лицевые щитки или защитные очки предотвращают травмы глаз и обеспечивают безопасность оператора.

4. Защитная обувь. Обувь должна быть закрытой, с усиленными носками и водонепроницаемой поверхностью, чтобы предотвратить риск ожогов при разливе азота на рабочие поверхности.

5. Средства защиты дыхательных путей. В помещениях должны использоваться системы контроля содержания кислорода для контроля уровня газа, а также фильтрующие маски для защиты от возможного вдыхания азотных паров.

Работа с криогенными жидкостями в Российской Федерации регулируется несколькими нормативными актами.

Основные положения по охране труда при работе с опасными веществами описаны в федеральных нормах и правилах:

1. ТР ТС 013/2011 – «О безопасности машин и оборудования». Этот технический регламент устанавливает общие требования безопасности, в том числе информацию по правильному выбору средств индивидуальной защиты при работе с опасными веществами.

2. ГОСТ Р 12.4.011-89 – «Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная, средства индивидуальной защиты рук и ног» - описаны стандарты

для материалов и конструкции СИЗ, используемых при работе с особо низкими температурами и прочими опасными условиями.

3. СП 2.2.2.1327-03 – «Гигиенические требования к организации производственных процессов и работе с машинами». Данный документ содержит указания по соблюдению безопасных условий труда при работе с опасными химическими веществами.

4.1.2 Защита от воздействия термических деформаций

При охлаждении материалов до криогенных температур необходимо учитывать их термическое сжатие, которое может вызывать значительные механические напряжения и приводить к повреждению оборудования. Для снижения рисков, связанных с термическими деформациями, используют различные инженерные решения:

1. Компенсаторы, которые поглощают изменения длины трубы из-за температурных колебаний.

2. Плавающие крепления – позволяют трубопроводам изменять свои размеры без передачи избыточных напряжений на крепежные элементы, что предотвращает деформацию или разрыв.

3. Выбор материалов: Применение материалов с одинаковыми или близкими коэффициентами линейного расширения поможет минимизировать внутренние напряжения. Это особенно актуально для соединений различных материалов.

4.1.3 Защита превышения давления при испарении и нагреве жидкого азота

В результате вскипания или испарения ЖА при изменении режимов работы или за счет естественных теплопритоков в замкнутых объемах возможно повышение давления, величина которого в десятки и сотни раз превышает рабочее. Большие массы газа могут выделяться при вскипании так называемой «перегретой жидкости», когда температура жидкости оказывается выше температуры кипения при данном давлении (например, при встряхивании жидкости или разгерметизации сосуда).

Кроме того, на сосудах, а также трубопроводах с ЖА, которые с двух сторон ограничены запорной арматурой, должны быть установлены предохранительные устройства (предохранительные клапаны, разрывные мембраны). Общая пропускная способность предохранительных устройств должна обеспечивать сброс всего количества газа, поступающего в аппарат и образующегося в аппарате, без повышения давления более допустимых величин. Пропускная способность предохранительных клапанов, устанавливаемых на отсекаемых трубопроводах и аппаратах, в которых может остаться жидкость при их отключении арматурой, должны обеспечивать сброс пятикратного количества паров, которые могут образоваться от естественного притока теплоты.

4.1.4 Требования к подготовке системы перед заполнением жидким азотом

Обезжиривание криогенного оборудования является важным этапом подготовки к его эксплуатации, особенно когда речь идет о работе с жидким и газообразным азотом. Основной целью является предотвращение образования взрывоопасных смесей, которые могут возникнуть при наличии масла и других загрязнителей на поверхности оборудования.

Рекомендации по обезжириванию:

1. Используются различные органические растворители, такие как хладон 113, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, бензин, дихлорэтан и четыреххлористый углерод.

2. Обезжиривание необходимо проводить не только при изготовлении, но и после монтажа, и в процессе эксплуатации, если содержание масла на поверхности оборудования превышает установленные нормы. Методы проверки качества обезжиривания включают контрольные обмывки или протирку поверхности салфеткой из стеклоткани, смоченной растворителем.- Оценка содержания масла на салфетке позволяет делать выводы о необходимости повторного обезжиривания.

3. Использование люминесцентных приборов для визуального осмотра поверхности. Контрольные заливки чистого растворителя с последующим измерением содержания масла, которое не должно превышать 20 мг/дм³.

4.2 Расчет средств обеспечения вентиляции рабочей зоны заправочной станции жидким азотом

Утечка или пролитие КРТ в невентилируемом замкнутом пространстве может легко привести к образованию воспламеняемых газообразных смесей. Соответственно, такое пространство должно быть оборудовано детекторами для обнаружения наличия проливов и предотвращения накопления воспламеняемой смеси, а если в нем находится оборудование для использования или хранения КРТ, всегда необходимо устанавливать активную или пассивную систему вентиляции.

Вентиляционная система должна быть оборудована устройствами для тушения пожаров в ней, а также для продувки находящихся в ней паров топлива. Следует определить тепловое излучение пламени факельной системы и установить соответствующее безопасное расстояние для защиты персонала. Вентиляционные отверстия должны располагаться на крыше таким образом, чтобы пары топлива не попадали в воздухозаборники здания. [12]

Определяющий показатель при выборе систем вентиляции – коэффициент кратности воздухообмена:

$$k = \frac{L}{V_n}, \quad (4.1)$$

где $L = 18000 \text{ м}^3/\text{ч}$ – воздухообмен в помещении;

$V_n = h \cdot l \cdot B = 25 \cdot 15 \cdot 12 = 4500 \text{ м}^3$ – внутренний объем помещения.

Для рассматриваемого случая:

$$k = \frac{18000}{4500} = 4 \text{ ч}^{-1}.$$

При $k = 3..5 \text{ ч}^{-1}$ рекомендуется применять искусственную систему вентиляции.

План помещения и вентиляции представлен на рисунке 4.1.

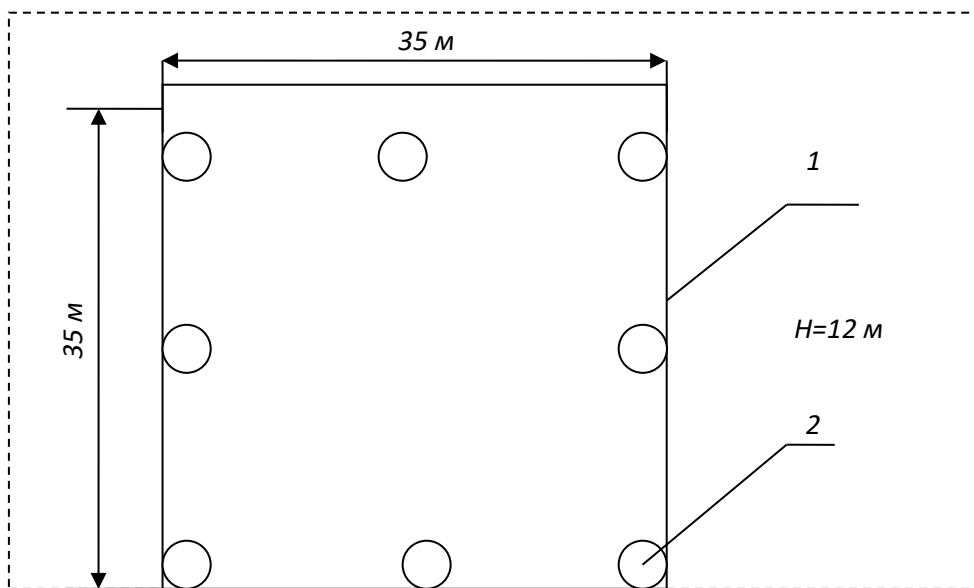


Рисунок 4.1 – План технологического зала и вентиляции

1 – технологическое помещение; 2 – вентиляторы

В производственных помещениях широко применяются системы вентиляции с искусственной подачей воздуха.

Проектирование и расчет системы искусственной (механической) вентиляции выполняется в следующем порядке:

- выбирается конфигурация вентиляционной сети (вентиляция по обе стороны помещения);
- зная требуемый расход воздуха на отдельных участках сети и задавая скорость движения воздуха (для участков, находящихся рядом с вентилятором – $V_1 = 8 \dots 12$ м/с, а для отдаленных участков сети – $V_2 = 1 \dots 4$ м/с), определяется диаметр воздуховодов в соответствии с формулой:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}, \quad (4.2)$$

где d_1 – диаметр воздуховода для участков, находящихся рядом с вентилятором;

d_2 – диаметр воздуховода для отдаленных участков сети.

Диаметр воздуховодов равен:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 110 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 12}} = 0,341 \text{ м},$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 110 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 4}} = 0,591 \text{ м}.$$

Для рассматриваемого технологического помещения выбираем воздуховод, изготовленный из листовой стали толщиной не более 1 мм. Выбранный воздуховод имеет круглое сечение, т.е. гидравлический диаметр, равный собственному.

Рассчитываем общие потери напора в сети:

$$H_c = H_m + H_n, \quad (4.3)$$

где H_m – местные потери;

H_n – потери из прямых участках воздуховодов.

Местные потери напора определяются по формуле:

$$H_m = 0,5 \sum \psi \cdot g^2 \cdot \rho, \quad (4.4)$$

где $\psi = 0,5$ – коэффициент местных потерь напора;

g^2 – скорость воздуха на соответствующем участке вентиляционной сети, м/с;

ρ – плотность движущегося в сети воздуха, кг/м³.

В соответствии с формулой (5.4) определяются местные потери напора:

$$H_m = 0,5(1,1 \cdot 12^2 \cdot 3,9 + 1,1 \cdot 4^2 \cdot 3,9) = 343,2 \text{ Па}.$$

Потери напора на прямых участках вентиляционной сети находятся в соответствии с формулой:

$$H_n = 0,5 \cdot \psi \cdot l_m \cdot \rho \cdot \frac{g_{cp}^2}{d_m}. \quad (4.5)$$

$$H_{n_1} = 0,5 \cdot 0,02 \cdot 25 \cdot 3,9 \cdot \frac{12^2}{0,341} = 411,730 \text{ Па},$$

$$H_{n_2} = 0,5 \cdot 0,02 \cdot 25 \cdot 3,9 \cdot \frac{4^2}{0,591} = 26,369 \text{ Па}.$$

Общие потери напора в сети равны:

$$H_{c_1} = 343,2 + 411,730 = 754,930 \text{ Па.},$$

$$H_{c_2} = 343,2 + 26,369 = 369,569 \text{ Па}.$$

Рассчитываем производительность вентиляторов с учетом потерь или подсосов воздуха в вентиляционной сети:

$$L_s = k_{\Pi} \cdot L, \quad (4.6)$$

где $k_{\Pi} = 1,1$ – поправочный коэффициент на расчетное количество воздуха;

$L = 3600 \cdot F_o \cdot V_o$ – расход воздуха, удаляемого вытяжной вентиляцией;

$$F_o = \frac{d^2 \pi}{4} \text{ – площадь сечения воздуховода.}$$

Площади сечений воздуховодов равны:

$$F_{o_1} = \frac{0,341^2 \cdot 3,14}{4} = 0,091 \text{ м}^2,$$

$$F_{o_2} = \frac{0,591^2 \cdot 3,14}{4} = 0,274 \text{ м}^2.$$

Рассчитаем расход воздуховода, удаляемого вытяжной вентиляцией:

$$L_1 = 3600 \cdot 0,091 \cdot 12 = 3931,200 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$L_2 = 3600 \cdot 0,274 \cdot 4 = 3945,600 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Производительность вентиляторов с учетом потерь (подсосов) воздуха в вентиляционной сети равно:

$$L_{c_1} = 1,1 \cdot 3931,200 = 4324,320 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$L_{c_2} = 1,1 \cdot 3945,600 = 4340,160 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

На основе известных величин L_s и H_c выбирается марка вентиляторов с наибольшим значением коэффициента полезного действия и в зависимости от

состава воздушной среды определяется конструктивное исполнение вентилятора.

Выбираем два центробежных вентилятора и электродвигателя:

–В-Ц4-70 N 4,5 с КПД $\eta = 0,60$ с диаметром рабочего колеса 0,45 м;

–В-Ц4-70 N 6 с КПД $\eta = 0,45$ с диаметром рабочего колеса 0,06 м.

Рассчитываем мощность электродвигателя для принятых вентиляторов:

$$P_{\epsilon} = \frac{k_3 \cdot L_{\epsilon} \cdot H_c}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \eta_{\pi}}, \quad (4.7)$$

где $k_3 = 1,05 \dots 1,5$ – коэффициент запаса;

$\eta_{\epsilon} = 0,4 \dots 0,8$ – КПД вентилятора;

$\eta_{\pi} = 1$ – КПД передачи.

Мощность электродвигателя в соответствии с формулой (4.7) равна:

$$P_{\epsilon_1} = \frac{1,5 \cdot 4324,320 \cdot 754,930}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 1} = 1,7 \text{ кВт},$$

$$P_{\epsilon_2} = \frac{1,5 \cdot 4340,160 \cdot 369,569}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 1} = 1,8 \text{ кВт}.$$

Для снижения аэродинамического шума вентиляторов необходимо добиться выполнения условия:

$$\pi D_n < 1800, \quad (4.8)$$

где D – диаметр рабочего колеса вентилятора, м;

$$n = \frac{A}{60N} \text{ – частота вращения вентилятора, мин}^{-1};$$

A – безразмерный параметр, определяемый по монограммам при выборе вентилятора;

N – номер вентилятора (диаметр его рабочего колеса в дециметрах), т.е.

$$3,14 \cdot 3000 / 45 = 209,3 < 1800,$$

$$3,14 \cdot 3500 / 60 = 183,16 < 1800.$$

Условие выполняется, следовательно, вентилятор выбран со сниженным аэродинамическим шумом. Устанавливаем 8 вентиляторов в технологическом помещении.

Рассчитаем необходимое количество воздуха для технологического помещения с газовыделениями – по количеству предельно допустимых концентраций паров азота при выделяющихся вредных веществах:

$$L = L_{o.з.} + \frac{G - L_{o.з.} (C_{o.з.} - C_{II})}{\rho (C_{yx} - C_{II})}, \quad (4.9)$$

где G – количество вредных веществ в воздухе, поступающих в воздух помещения, мг/ч;

$C_{o.з.}$ – концентрация вредных веществ в воздухе, удаляемая местными отсосами, мг/м³,

C_{yx} – концентрация вредных веществ в воздухе, удаляемом из помещения за пределы рабочей или обслуживающей зоны, мг/м³;

C_{II} – концентрация вредных веществ в воздухе, подаваемом в помещение, мг/м³.

$$L = 3960 + \frac{3000 - 3960(0,05 - 0,01)}{1,2 \cdot (0,3 - 0,01)} = 12125,517 \text{ мг/м}^3.$$

Так как $L = 12125,517 \text{ мг/м}^3$ – количество воздуха за 8 часовой рабочий день, то за час необходимо 1515 мг/м³.

Хранилища КРТ должны быть оборудованы специальными защитными сигнализирующими устройствами. Объемная доля КРТ в зонах его возможного выделения, при которой срабатывает система сигнализации с подачей звукового и светового сигналов, не должна превышать 0,4%. В случае потенциально опасной ситуации должен срабатывать сигнал, который давал бы достаточный запас времени для безопасного предотвращения работы заправочной системы.

Вывод по разделу

В данном разделе выпускной квалификационной работы были рассмотрены общие положения охраны труда и меры безопасности при работе с

жидким азотом. Изучены правила и действия которые необходимо предпринять обслуживающему персоналу при возникновении аварийных или внештатных ситуаций, а также экологическая безопасность работ при работе с криогенными компонентами топлива. Проведен расчет средств обеспечения вентиляции рабочей зоны заправочной станции жидким азотом.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В экономической части представлено экономическое обоснование проекта «Усовершенствование системы приёма, хранения, газификации и заправки ракет-носителей среднего класса («Союз-2») криогенными компонентами топлива (жидким азотом)».

Цель данной части – обосновать экономическую целесообразность разработки системы заправки.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемого комплекса необходимо рассчитать затраты на проектирование ПГС, затраты на приобретение материалов и комплектующих элементов, необходимых для проектирования. [11]

5.1 Календарный план работы над проектированием системы

Жизненным циклом системы считается весь цикл от принятия решения о проведении разработок до полного отказа конечного пользователя от применения данной установки:

План проведения работ по проектированию установки представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – План проведения работ

№	Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, дни
1	Разработка технического задания	Инженер	2
2	Изучение литературы	Инженер	2
3	Разработка структурной схемы	Инженер	3
4	Разработка принципиальной схемы	Инженер	6
5	Разработка функциональной схемы	Инженер	5
6	Разработка конструкции	Инженер	5
7	Изготовление рабочих чертежей	Инженер	16
8	Построение графиков	Инженер	3
9	Составление отчёта	Инженер	5
10	Консультация с руководителем	Руководитель	3
Итого			50

5.2 Себестоимость проектирования системы заправки

В себестоимость проекта включаются все затраты, связанные с ее выполнением вне зависимости от источника ее финансирования. Необходимые для проектирования данной установки расходные материалы включают в себя:

- программное обеспечение MS Office 2020;
- программное обеспечение Auto CAD 2024;
- 12 листов формата A1;
- пачку бумаги A4.

Сведём в таблицу 5.2 расчёт затрат на расходные материалы.

Таблица 5.2 – Затраты на расходные материалы

№ п/п	Наименование материала	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма затрат, у.е.
1	Канцелярские товары	-	-	900,00
2	Лицензионная версия MS Office2020	1 шт.	2 214,08	2 214,08
3	AutoCAD 2024	1 шт.	8555,60	8 555,60
4	Бумага для офисной техники	1 пачка	150,00	150,00
5	Тонер для принтера SamsungML-2160	1 шт.	150,00	150,00
Итого				11 969,68

На таблице 5.3 приведены затраты на основную заработную плату работников.

Таблица 5.3 – Затраты на основную заработную плату работников

Наименование этапа	Трудоемкость этапа, чел/день	Трудоемкость этапа, чел/мес.	Средняя месячная заработная плата, у.е.	Расходы по заработной плате, у.е.
Разработка технического задания	2	0,091	11 835,00	1 076,98
Изучение литературы	2	0,091	11 835,00	1 076,98
Разработка структурной схемы	3	0,136	11 835,00	1 609,56

Продолжение таблицы 5.3

Наименование этапа	Трудоемкость этапа, чел/день	Трудоемкость этапа, чел/мес.	Средняя месячная зарботная плата, у.е.	Расходы по зарботной плате, у.е.
Разработка принципиальной схемы	6	0,273	11 835,00	3 230,95
Разработка функциональной схемы	5	0,227	11 835,00	2 686,55
Разработка конструкции	5	0,227	11 835,00	2 686,55
Изготовление рабочих чертежей	16	0,727	11 835,00	8 604,05
Построение графиков (проверка расчетов)	3	0,136	11 835,00	1 609,56
Подготовка документации	5	0,227	11 835,00	2 686,55
Консультация с руководителем	3	0,136	35 280,00	4 798,08
Итого				30 065,81

Принимаем, что рабочий день равен 8 часам, а месяц – 22 рабочим дням.

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

$$\frac{30\,065,81 \cdot 20\%}{100\%} = 6\,013,16 \text{ у.е.}$$

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

$$\frac{(30\,065,81 + 6\,013,16) 30,2\%}{100\%} = 10\,895,85 \text{ у.е.}$$

Обычно накладные расходы составляют 180-250% от величины основной заработной платы. При проектировании и создании данной установки примем их равными 200%:

$$\frac{30\,065,81 \cdot 200\%}{100\%} = 60\,131,62 \text{ у.е.}$$

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

$$Z_{пр} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{згр}, \quad (5.1)$$

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 60 у.е.;

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

N рассчитаем исходя из таблицы 5.1, учитывая дни затраченные на выполнение этапов, принимая, что каждый день работы длились 8 часов:

$$N = (3 + 6 + 5 + 5 + 16 + 3 + 5)8 = 344 \text{ часов.}$$

$$Z_{пр} = 344 \cdot 60 \cdot 0,7 = 14\,448,00 \text{ у.е.}$$

Себестоимость разработки пневмогидравлической системы заправки жидким азотом на стартовом комплексе представлена таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Себестоимость разработки ПГС системы

Наименование статей расходов	Затраты, у.е.
Затраты на приобретение расходных материалов	11 969,68
Затраты на основную заработную плату разработчиков	30 065,81
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	6 013,16
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	10 895,85
Накладные расходы	60 131,62
Прочие расходы	14 448,00
Итого	133 524,12

Таблица 5.5 – Расходы на приобретение комплектующих изделий

№ п\п	Наименование изделия	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма, у.е.
1	Насос	2	1 000 000,00	2 000 000,00
2	Фильтр	2	55 000,00	110 000,00
Итого:				2 110 000,00

Затраты на основные материалы для двух заправок РН включают стоимость рабочего тела, расходуемого в процессе подготовки и заправки в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Затраты на основные расходные материалы для одного цикла заправки РН.

№ п/п	Наименование материала	Объем, л.	Цена, л./у.е.	Сумма затрат, в у.е.
1	Жидкий азот	2 800 000,00	17	47 600 000,00
3	Сжатый воздух	4 000	200	800 000,00
Итого:				48 400 000,00

5.3 Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения системы

Главный экономический эффект от разработки и внедрения данной системы заключается в возможности запуска РН с минимальными затратами на проведение предпусковых работ. Предлагаемая система приёма, заправки и газификации с экономической точки зрения позволит:

- уменьшить время процесса газификации жидкого азота за счёт использования современных насосов;
- увеличить срок службы оборудования и фильтров.

Вывод по разделу

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрено обоснование, необходимость и целесообразности затрат на совершенствование проектируемой системы заправки.

Были детализированы расходы по следующим направлениям:

1. Проектирование пневмогидравлической системы, что составило 133 524,12 условных единиц (у.е.).

2. Приобретение новых комплектующих изделий, затраты на которые составили 2 111 000,00 у.е.

3. Основные материалы, необходимые для проведения заправки, обошлись в 69 386 000,00 у.е.

Для оценки окупаемости и экономической оправданности внедрения совершенствования проектируемой системы приёма, хранения, газификации и заправки РН жидким азотом были использованы методы косвенной оценки экономического эффекта.

Поскольку прямой расчет экономической выгоды в денежных единицах затруднителен, в работе приводится анализ косвенных преимуществ, которые могут быть получены от использования пневмогидравлической системы.

Эти преимущества включают:

1. Повышение производительности и эффективности процесса заправки.

2. Увеличение надежности и сроков службы оборудования за счет использования более качественных материалов.

3. Снижение эксплуатационных затрат, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом.

Таким образом, можно прийти к выводу о долгосрочной экономической целесообразности внедрения новых модернизаций в системе заправки жидким азотом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе была спроектирована система заправки для ракеты-носителя среднего класса криогенным компонентом ракетного топлива – жидким азотом.

В основной части выпускной квалификационной работы произведен выбор основных проектных параметров. Также проведен гидравлический расчет системы заправки и расчет на прочность резервуара хранилища жидкого азота. Рассчитаны тепловые потери при захлаживании трубопровода и изделия, а также время и количество компонента топлива необходимого на захлаживание.

Расчет на прочность выбранного резервуара для хранения компонента топлива показал соответствие элементов конструкции условиям штатной эксплуатации. В результате была сформирована пневмогидравлическая схема, соответствующая заданным исходным данным на проектирование.

В технологической части рассмотрен вопрос, связанный с технологией проведения заправки, разработана циклограмма заправки.

Выполнена оптимизация технических характеристик по входным параметрам принимаемых криогенных компонентов.

В разделе «Охрана труда» рассмотрены основные положения мер безопасности при проведении заправочных работ, в частности с криогенными КРТ, первая помощь при поражениях КРТ, меры безопасности при работе СПГ, также был произведен средств обеспечения вентиляции рабочей зоны заправочной станции жидким азотом.

В экономической части была рассчитана себестоимость проектирования системы заправки РН среднего класса жидким азотом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1 Пономаренко В.К. Ракетные топлива – С-Пб.: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1995 – 607 с.
- 2 ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 168 с.
- 3 Лазарев В.И. Эксплуатация систем заправки и термостатирования. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 1993. – 47 с.
- 4 Богомолов А.А., Егоров А.Е, Шарапов В.С. Стационарные системы заправки ракет космического назначения окислителем и горючим / Под редакцией Г.П. Бирюкова. – М.: КБТМ, 2000 – 146 с.
- 5 Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем / А.Г. Галеев, А.А. Золотов, А.Н. Перминов, В.В. Родченко; Под ред. А.Н. Перминова. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 260 с.: ил.
- 6 Шарапов В.С., Торпачев А.В. Основы проектирования систем заправки и газоснабжения ракет космического назначения. Учебное пособие для вузов / Под. ред. д.т.н., профессора Г.П. Бирюкова. – М.: Типография КБТМ, 2008. – 145 с.: ил.
- 7 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 2007. – 559 с.
- 8 Зрелов В.Н., Серегин Е.П. Жидкие ракетные топлива. – М.: Химия, 2006. – 320 с.
- 9 Уманский С.П. Ракеты-носители. Космодромы. – М.: Рестарт, 2001 – 216 с.
- 10 ГОСТ 12.4.026-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний [Текст]. — Введ. 2016-03-01. — М.: Стандартинформ, 2016.

11 ГОСТ 12.4.103-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук.
Классификация [Текст]. — Введ. 1985-01-01. — М.: Издательство стандартов,
1984.

12 Зотов Б.И., Курдюмов В.И. Безопасность жизнедеятельности на
производстве. — М.: Колос, 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справочные гидравлические параметры

Таблица А.1 – Значения единиц скорости течения КРТ v при различных расходах Q в зависимости от диаметра трубопровода.

Q , л/мин	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Ø 100	1,06	1,28	1,48	1,69	1,91	2,13	3,18	4,25	5,3	6,38	7,43
Ø 125	0,68	0,816	0,95	1,20	1,22	1,36	2,04	2,76	3,4	4,08	4,75
Ø 150	0,47	0,565	0,659	0,751	0,85	0,94	1,41	1,88	2,36	2,82	3,3
Ø 200	0,098	0,124	0,159	0,424	0,478	0,53	0,79	1,06	1,33	1,59	1,85

Таблица А.2 – Значения единиц скорости течения КРТ v при различных расходах Q в зависимости от диаметра трубопровода.

Q , л/мин	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000
Ø 100	10,6	12,75	14,85	-	-	-	-	-
Ø 125	6,8	8,16	9,5	10,8	12,2	13,6	14,97	-
Ø 150	4,7	5,65	6,59	7,51	8,5	9,4	10,36	11,3
Ø 200	2,66	3,18	3,71	4,24	4,78	5,3	5,84	6,36

Таблица А.3 – Значения единиц динамического напора $V^2/2g$ при различных расходах Q в зависимости от диаметра трубопровода.

Q , л/мин	0	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Ø 50	0,23	0,93	3,72	8,31	$(V^2 \text{ Ø } 50)/2g$						
Ø 100	0,0143	0,0572	0,232	0,52	0,93	1,44	2,08	2,81	3,68	4,67	5,72
Ø 125	0,0059	0,024	0,095	0,212	0,39	0,592	0,852	1,52	1,52	1,9	2,36
Ø 150	0,0029	0,0116	0,045	0,102	0,181	0,285	0,407	0,555	0,725	0,92	1,13
Ø 200	0,0091	0,0036	0,014	0,032	0,0572	0,0906	0,1296	0,176	0,299	0,292	0,362