

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

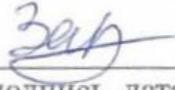
Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Специальность 24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет
и ракетно-космических комплексов
Специализация – Эксплуатация стартовых и технических комплексов и систем
жизнеобеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой

В.В. Соловьев
» _____ 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

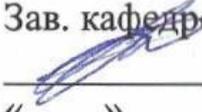
на тему: Разработка заправочного агрегата переохлажденным кислородом
перспективного разгонного блока ракеты носителя «Рокот».

Исполнитель студент группы 9111 – ос	 _____ (подпись, дата)	В.В. Шматко
Руководитель доцент, канд.техн.наук.	 _____ (подпись, дата)	В.В. Соловьев
Консультант по БЖД доцент, канд.техн.наук.	 _____ (подпись, дата)	А.В. Козырь
Нормоконтроль	 _____ (подпись, дата)	М.А. Арёвков
Рецензент	 _____ (подпись, дата)	Е.В. Заковоротный

Благовещенск 2025

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

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
 В.В. Соловьев
« ____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Шматко Вероники Владимировны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка заправочного агрегата переохлажденным кислородом перспективного разгонного блока ракета носителя «Рокот».

(утверждена приказом от 02.12.2024 № 3236-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта 06 февраля 2025 года.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: компонент топлива: жидкий кислород, удельный импульс топливной пары: $LH_2+LO_2 = 4300 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{кг}$, объем бака разгонного блока $V_m=5,055 \text{ м}^3$.

4. Содержание выпускной квалификационной работе: система заправки разгонного блока, определение параметров и технических характеристик составных частей заправки, схема пневмогидравлической системы и последовательность ее технологических операций при ее работе.

5. Перечень материалов приложения: схема способов переохлаждения, схема систематизации способов переохлаждения, сборочный чертеж теплообменника, чертеж пневмоклапана, схема видов теплоизоляции, общий вид ЗА, пневмогидравлическая схема, таблица операций, таблица с общими затратами на разработку заправочного агрегата.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: консультат по безопасности жизнедеятельности Козырь А.В., доцент, канд. техн. наук.

7. Дата выдачи задания 20.01.2025.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев В.В. доцент канд. техн. наук.

Задание принял к исполнению (дата): 20.01.2025


(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Отчет по практической работе содержит 97 страниц, 18 рисунков, 13 таблиц, 15 источников.

ЗАПРАВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, КРИОГЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТОПЛИВА, ГАЗОНАПОЛНЕННАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ЖИДКИЙ КИСЛОРОД, ЖИДКИЙ АЗОТ, РАЗГОННЫЙ БЛОК, КРИОГЕННАЯ АРМАТУРА, ЗМЕЕВИК, ОПОРНОЕ КОЛЬЦО, БОРТОВОЙ БАК

В работе проанализированы возможные способы переохлаждения криогенных компонентов топлива, на основании одного из способов разработан заправочный агрегат для переохлаждения жидкого кислорода и заправки РБ-аналога «Бриз-КМ».

Цель работы – выбор оптимальной системы заправки, подбор оборудования и основных узлов заправочного агрегата.

Задачи:

- выбор оптимальной системы заправки переохлаждённым кислородом;
- разработка технического задания и подбор основных узлов заправочного агрегата предназначенного для эксплуатации с РБ-аналога «Бриз-КМ»;
- описать комплекс мер безопасности при работе с жидким кислородом;
- провести экономический анализ и обосновать эффективность разработки и внедрения заправочного агрегата.

СОДЕРЖАНИЕ

Определение, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Система заправки разгонного блока	10
1.1 Анализ возможных способов переохлаждения криогенных КТ	10
1.1.1 Классификация способов охлаждения криогенных компонентов	10
1.1.1.1 По времени проведения охлаждения	10
1.1.1.2 По агрегатному состоянию охлаждаемого криогенного компонента	11
1.1.2 Выводы	23
1.2 Описание системы заправки	25
1.3 РБ «Бриз-КМ»	26
1.4 Техническое задание для разработки заправочного агрегата	27
2 Определение параметров и технических характеристик составных частей заправки	29
2.1 Определение объема ББ ЖК	29
2.2 Расчет теплообменника	31
2.2.1 Характеристики емкости и змеевика	31
2.2.2 Характеристики кислорода	33
2.2.3 Характеристики азота	34
2.2.4 Расчет коэффициента теплоотдачи от теплоносителя (ЖК) к внутренней стенке змеевика	35
2.2.5 Расчет коэффициента теплоотдачи от хладоносителя (ЖА) к внешней стенке змеевика	36
2.2.6 Время, затрачиваемое на переохлаждение ЖК	39
2.3 Подбор насоса для ЗА	40
2.4 Определение параметров ЖК на входе в магистраль	42
2.5 Определение количества ЖА, необходимого для захолаживания	

трубопровода	46
2.6 Определение количества ЖА, необходимого для захолаживания ББ	48
2.7 Расчет времени прогрева ЖК после заправки в ББ от температуры $T_{ББ}$ до температуры $T_{макс}$	52
2.8 Конструктивный и тепловой расчеты теплоизоляции ТО	54
2.8.1. Конструктивное обеспечение вакуумной теплоизоляции	54
2.8.2 Конструктивное обеспечение газонаполненной теплоизоляции	55
2.8.3 Тепловой расчет теплоизоляции	56
2.8.3.1 Тепловой расчет вакуумной изоляции	56
2.8.3.2 Тепловой расчет газонаполненной изоляции	57
2.8.4 Выводы	58
2.9 Конструкция теплообменника	58
2.10 Определение количества ЖА, необходимого на захолаживание емкости ТО и змеевика	59
2.11 Определение необходимого давления для заполнения емкости ТО жидким азотом	62
2.12 Определение необходимого давления в емкости с ЖК для бескавитационной работы насоса	62
2.13 Подбор цистерн для ЖК и ЖА	63
2.13.1 Подбор цистерны для ЖК	63
2.13.2 Подбор цистерны для ЖА	64
2.14 Подбор железнодорожной платформы для ЗА	65
2.15 Расчет элемента криогенной арматуры	66
2.15.1 Описание и конструкция криогенного пневмоклапана	66
2.15.2 Расчет основных параметров пневмоклапана	68
2.15.2.1 Определение хода штока	68
2.15.2.2 Подбор сильфонов	68
2.15.2.3 Проверка герметичности седла	69
3 Схема пневмогидравлической системы и последовательность ее технологических операций при ее работе	71

3.1 Состав системы	71
3.2 Назначение и операции, выполняемые разрабатываемым ЗА	72
3.2.1 Назначение разрабатываемого ЗА	72
3.2.2 Технологические операции, выполняемые ЗА	72
3.3 Пневмогидравлическая схема	73
3.4 Последовательность операций, выполняемых ЗА на СК	74
4 Безопасность и экологичность производства	77
4.1 Требования к криогенным системам для их безопасной эксплуатации	78
4.2 Требования, предъявляемые к персоналу обслуживающему криогенные системы	81
4.3 Действия персонала при нештатных ситуациях при работе с криогенной системой	84
5 Экономический анализ разработки заправочного агрегата	86
5.1 План работы над разработкой заправочного агрегата	86
5.2 Себестоимость разработки пневмогидравлической системы заправки	87
5.3 Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения ЗА	92
Заключение	94
Библиографический список	96

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АТ – тетраоксид азота;

ББ – бортовой бак;

ЖА – жидкий азот;

ЖВ – жидкий водород;

ЖК – жидкий кислород;

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;

ЗА – заправочный агрегат;

ЗС – заправочная станция;

КРТ – криогенное ракетное топливо;

КТ – компонент топлива;

НДМГ – несимметричный диметилгидразин;

ПГС – пневмогидравлическая схема;

РБ – разгонный блок;

РН – ракета-носитель;

СК – стартовый комплекс;

ТИ – теплоизоляция;

ТО – теплообменник;

ХА – хладагент.

ВВЕДЕНИЕ

В ракетно-космической индустрии наших дней доминируют двигательные установки, базирующиеся на сочетании диметилгидразина с тетраоксидом азота в роли окислителя. Тем не менее, внедрение криогенных топливных систем предлагает качественно иной уровень возможностей – они демонстрируют значительно более высокую эффективность тяги в двигательных установках по сравнению с классическими высококипящими веществами.

Одно из ключевых достоинств криогенных компонентов заключается в их экологической чистоте – эти вещества безвредны как для человека, так и для природы. Особый интерес представляет кислород в жидком состоянии. Этот распространенный окислитель, хранящийся при температуре около минус 183°С, способен создавать мощное высокотемпературное горение в паре с разнообразными типами горючего.

Использование криогенных компонентов в переохлажденном виде открывает путь к существенному повышению эффективности разгонных блоков. Когда температура этих веществ опускается ниже точки кипения при нормальном атмосферном давлении, их плотность возрастает. Это создает два важных преимущества: возможность заправить большее количество топлива в резервуар фиксированного объема и минимизацию испарительных потерь, как при хранении компонентов, так и в процессе их загрузки в баки.

В данном дипломном проекте будет разработан заправочный агрегат для заправки переохлажденным кислородом разгонного блока для ракеты-носителя «Рокот». В настоящее время не существует РБ на криогенных КТ, который мог бы использоваться на РН «Рокот». Для данного РН используется РБ «Бриз-КМ», использующий высококипящие компоненты топлива. Исходя из этого, заправочный агрегат будет проектироваться для РБ – аналога «Бриз-КМ», имеющего аналогичные энергетические характеристики, но функционирующего на топливной паре: ЖК + ЖВ.

1 СИСТЕМА ЗАПРАВКИ РАЗГОННОГО БЛОКА

1.1 Анализ возможных способов переохлаждения криогенных КТ

Работа с криогенными топливными компонентами ставит перед инженерами комплекс сложных технических задач. Главная проблема кроется в их экстремально низкой температуре кипения, из-за чего происходит интенсивный теплообмен с окружающей средой. Это вынуждает внедрять целый ряд специальных технических решений: системы мониторинга испарения, механизмы регулирования уровня компонентов в резервуарах и средства стабилизации процессов в наземных заправочных комплексах. Ситуацию усложняет то, что эти вещества обладают малой объемной теплоемкостью.

Однако применение предварительно охлажденных компонентов при заправке открывает ряд технических возможностей. В таком состоянии топливо движется однородным потоком без образования паровой фазы, что позволяет уменьшить размеры и вес систем топливоподачи – параметры, критически важные для космических аппаратов. Кроме того, пониженная температура компонента увеличивает его способность аккумулировать тепло, что предотвращает спонтанное вскипание при соприкосновении с нагретыми поверхностями баков – компонент может принять больше тепловой энергии, оставаясь в жидком состоянии.

Такой подход делает возможным хранение компонентов ракетного топлива в наземных резервуарах и их последующую заправку в баки ракеты практически без потерь, укладываясь во временные рамки подготовки системы управления к старту. Дополнительное увеличение массы полезной нагрузки достигается за счет комплекса факторов: применения охлажденных компонентов, уменьшения массы теплоизоляционного покрытия и оптимизации соотношения компонентов, что ведет к повышению удельного импульса.

1.1.1 Классификация способов охлаждения криогенных компонентов

1.1.1.1 По времени проведения охлаждения

Существуют два основных подхода к охлаждению криогенных компонентов. При первом варианте охлаждение происходит в емкостях хранения между технологическими циклами. Такой метод допускает применение маломощных охладительных установок, так как процесс не требует синхронизации с предстартовой подготовкой и может растягиваться на продолжительный период. Однако данный подход предусматривает содержание охлажденных криогенных жидкостей в условиях вакуума, что диктует особые требования к конструкции резервуаров и регламенту их обслуживания для исключения проникновения воздуха. Его попадание может не только ухудшить качественные характеристики хранящегося кислорода, но и создать взрывоопасную ситуацию при работе с водородом или сжиженным природным газом из-за формирования горючих смесей.

В качестве иного метода рассматривается процесс, при котором охлаждение компонентов происходит синхронно с заливкой топлива в ракету. Такая технология, хотя и требует тщательной синхронизации производительности охладительного оборудования со скоростью подачи компонентов, что влечет за собой более комплексные технические решения в сопоставлении с вакуумными хранилищами, обладает важным преимуществом. Её ключевое достоинство заключается в возможности поддержания криогенных веществ в состоянии повышенного давления, что значительно облегчает задачу их содержания в хранилищах.

1.1.1.2 По агрегатному состоянию охлаждаемого криогенного компонента

Особый интерес в процессе понижения температуры криогенных топливных элементов на границе раздела фаз представляет технологический подход, основанный на непосредственном создании вакуума в пространстве над жидкой поверхностью посредством специализированных насосов. Суть этого инженерного решения заключается в последовательном уменьшении давления в над поверхностной области с одновременным отводом возникающих испарений. Для эффективного извлечения газообразной составляющей из

накопительной системы или специализированного охлаждающего устройства инженерная практика предлагает два ключевых технических варианта:

- 1) использование вакуумных насосов;
- 2) применение эжекторных установок, где в качестве рабочего тела выступает воздух или азот.

Принципиальные схемы обеих конфигураций представлены на рисунках 1.1 и 1.2 соответственно.

Этот метод является практически реализуемым вариантом охлаждения компонентов топлива путем понижения давления вдоль линии насыщения жидкости.

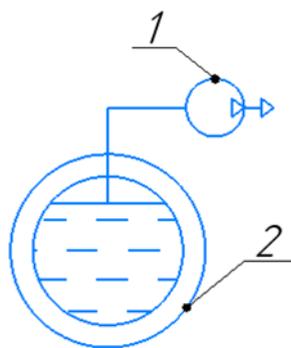


Рисунок 1.1 – Схема охлаждения вакуумирование парового пространства
вакуум – насос: 1 – вакуум-насос; 2 – емкость

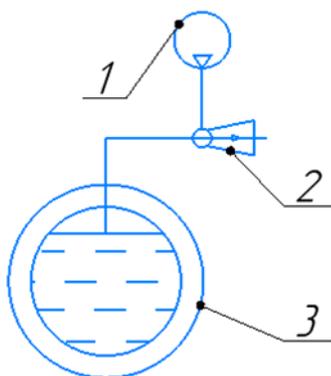


Рисунок 1.2 – Схема охлаждения вакуумирование парового пространства
эжектором: 1 – компрессор; 2 – эжектор; 3 – емкость

Процесс охлаждения криогенных компонентов в области «жидкость-пар» можно осуществлять двумя основными методами:

1. Прямое вакуумирование парового пространства:

При создании вакуума над поверхностью продукта происходит снижение его температуры за счет отвода скрытой теплоты парообразования испаряющейся части. Особенно показателен пример с жидким кислородом, широко применяемым в отечественной космической отрасли. Теоретически, для достижения температуры тройной точки кислорода (54,3 К) требуется понижение давления до 146,6 Па. Однако практически методом прямого вакуумирования удастся достичь лишь температуры около 60 К (при давлении 800 Па). Дальнейшее охлаждение затруднено из-за возникновения неравновесных процессов, зависящих от множества факторов. Существенным ограничением также является отсутствие промышленного вакуумного оборудования необходимой мощности – более глубокий вакуум достигим только в лабораторных условиях.

2. Барботажное охлаждение:

Метод основан на пропускании через жидкость неконденсирующегося газа (обычно гелия), что вызывает частичное испарение и охлаждение оставшейся массы продукта. Процесс может быть организован по двум схемам:

- замкнутый цикл в соответствии с рисунком 1.3;
- разомкнутый цикл в соответствии с рисунком 1.4.

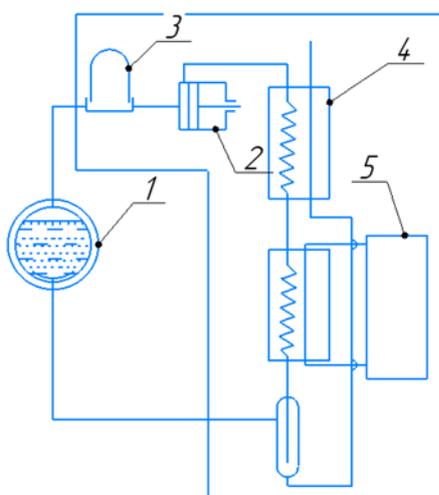


Рисунок 1.3 – Схема охлаждения методом барботажа по замкнутому циклу:
1 – емкость; 2 – компрессор; 3 – газгольдер; 4 – система отбора и охлаждения гелия; 5 – холодильно-газовая машина

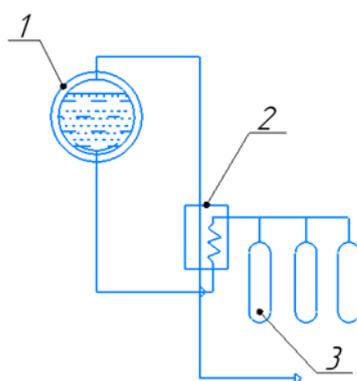


Рисунок 1.4 – Схема охлаждения методом барботаж по разомкнутому циклу:

1 – емкость; 2 – теплообменник; 3 – баллоны с гелием

Однако барботажный метод имеет существенные недостатки:

- необходимость использования больших объемов дорогостоящего гелия;
- потери гелия в разомкнутом цикле;
- необходимость сложного оборудования для очистки и рециркуляции гелия в замкнутом цикле;
- возможные проблемы с растворимостью гелия в охлаждаемых продуктах.

Учитывая эти ограничения и специфику современных криогенных компонентов, метод барботажного охлаждения гелием практически не находит применения в современной практике.

Охлаждение криогенных компонентов топлива в однофазной жидкой области может осуществляться с использованием теплообменников, где в качестве охлаждающей среды выступает хладоноситель с температурой ниже температуры охлаждаемого компонента. При этом необходимый температурный потенциал хладоносителя может быть обеспечен двумя способами:

1) естественным путем – за счет исходной низкой температуры хладоносителя;

2) искусственным путем – посредством вакуумирования или применения рефрижераторного цикла в холодильной установке.

Особого внимания заслуживает метод охлаждения с использованием холодильной газовой машины (ХГМ). Данный процесс может быть реализован двумя способами:

- 1) через теплообменник, как показано на схеме рисунка 1.5;
- 2) непосредственно в головке ХГМ с помощью хладагента пониженной температуры, получаемой в рефрижераторном цикле в соответствии со схемой на рисунке 1.6.

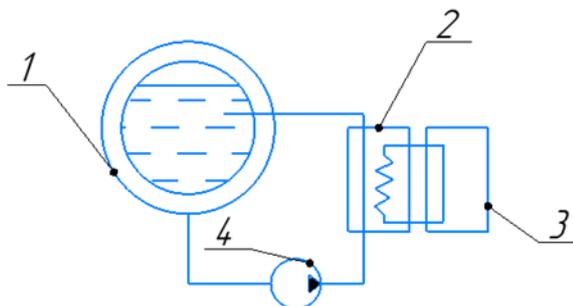


Рисунок 1.5 – Схема охлаждения в теплообменнике с помощью холодильной газовой машины: 1 – емкость; 2 – теплообменник; 3 – ХГМ; 4 – насос

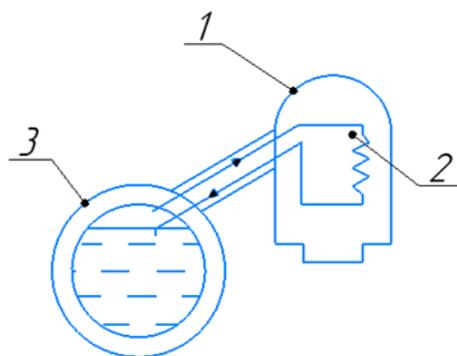


Рисунок 1.6 – Схема охлаждения в головке ХГМ типа «Филипс»: 1 – ХГМ; 2 – головка ХГМ; 3 – емкость

Ключевым преимуществом данного метода является отсутствие потерь, как охлаждаемого компонента, так и хладагента в процессе работы системы.

Охлаждение криогенных компонентов в теплообменниках с помощью холодильных машин может осуществляться несколькими способами:

1. Использование холодильных машин с замкнутым контуром:

– оптимальным для охлаждения жидкого кислорода (при $T \leq 77 \text{ K}$) является адиабатно-изотермический цикл с гелием в качестве рабочего тела;

– существуют также одноступенчатые машины, работающие по циклу Стирлинга (разработка фирмы «Филипс»), рассчитанные на температуру до 20 К, которые успешно применялись в заправочных системах жидкого кислорода ракетного комплекса 8К75.

В установках, базирующихся на цикле Стирлинга, технологический процесс протекает по следующей схеме: газообразный компонент направляется в криогенную головку, охлаждаемую гелиевым контуром, где происходит его конденсация с последующим возвратом в емкость хранения. Данная технология продемонстрировала высокую эффективность при долговременном содержании криогенных компонентов, таких как жидкие кислород и азот, обеспечивая минимальные потери продукта. Тем не менее, ограниченная холодильная мощность этих агрегатов делает их неподходящими для интенсивного охлаждения компонентов в процессе заправки ракетного носителя.

2. Применение гелиевых рефрижераторных машин:

Хотя машины типа ХГМ и ХГМУТ с выносным теплообменником технически могут использоваться для охлаждения криогенных компонентов, их применение на стартовых позициях нерационально из-за:

- недостаточной производительности;
- сложности конструкции.

3. Охлаждение в теплообменнике, погруженном в ванну с хладагентом:

Этот метод, показанный на рисунке 1.7, использует хладагент с температурой кипения ниже требуемой температуры охлаждения компонента топлива.

Главное преимущество использования холодильных машин – отсутствие потерь, как охлаждаемого продукта, так и хладагента в процессе работы.

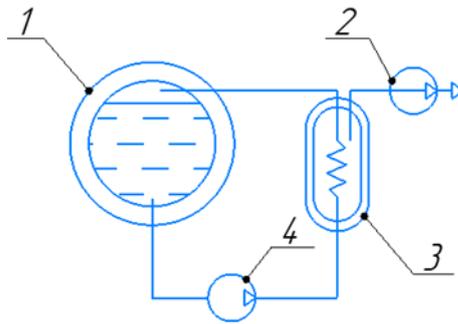


Рисунок 1.7 – Схема охлаждения в ванне-охладителе, вакуумируемой собственным компонентом: 1 – емкость; 2 – средств вакуумирования; 3 – ванна – охладитель; 4 – насос

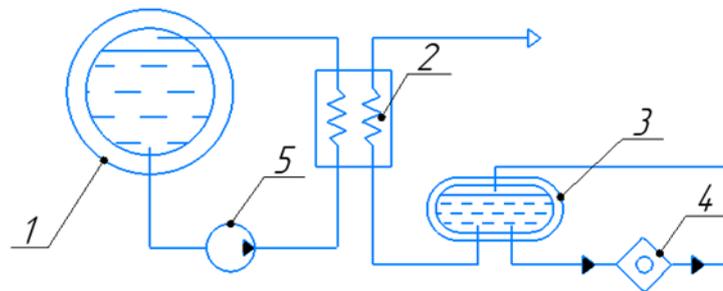


Рисунок 1.8 – Схема охлаждения в теплообменнике с использованием стороннего хладагента: 1 – емкость; 2 – теплообменник; 3 – ванна с хладагентом; 4 – испаритель; 5 – насос

Для охлаждения криогенных топливных компонентов применяются теплообменные системы с двумя категориями внешних хладагентов. К первой относятся вещества с природной низкой температурой кипения, которая должна быть ниже заданной температуры охлаждаемого компонента. Теплообмен в таких системах реализуется через погружные или противоточные теплообменники. Вторая категория включает компоненты, температура которых искусственно понижается путем создания вакуума в паровом пространстве с помощью эжекторов или вакуумных насосов. Показательный пример – охлаждение кислорода азотом, охлажденным методом вакуумирования.

Отдельного внимания заслуживает технология глубокого охлаждения жидкого кислорода до температуры тройной точки, что существенно повышает эффективность его применения в космических системах. Для достижения таких температур могут использоваться различные хладагенты: жидкий или охлажденный газообразный водород, неон или гелий.

Однако применение водорода в качестве охлаждающего агента сопровождается серьезными ограничениями. Его экстремально низкая температура кипения (20,4 К при нормальном давлении) и высокая взрывоопасность в широком спектре концентраций накладывают жесткие требования к безопасности. Использование водорода целесообразно только на объектах, где он уже применяется для заправки ракет. При этом необходимы строгие меры предосторожности и специальные технологические протоколы. Несмотря на конструктивную простоту контактных теплообменников, их применение исключается из соображений безопасности.

Использование водородных систем для охлаждения жидкого кислорода требует решения следующих сложных инженерных задач:

1. Технологическая интеграция:

– необходима тщательная синхронизация работы водородной заправочной системы и системы охлаждения;

– требуется создание надежной системы управления обоими процессами;

– важна точная координация в рамках общего технологического графика.

2. Технические решения:

– разработка безопасных теплообменных устройств с промежуточным хладоносителем;

– внедрение комплексных мер безопасности.

В арсенале современных технологий охлаждения криогенных веществ можно выделить различные методики. В частности, одно из решений базируется на использовании теплообменного аппарата, где кислород переходит в газообразное состояние в вакуумной среде. Впрочем, данный подход сталкивается с существенным ограничением – при температурах ниже

60 К процесс утрачивает стабильность и становится практически неуправляемым.

На этом фоне особенно выделяется применение жидкого азота, зарекомендовавшее себя как оптимальное техническое решение для термической обработки как кислорода в жидком состоянии, так и сжиженного газа природного происхождения. Данный метод эффективно работает до температуры около 66 К. При температурах от 79 до 80 К система может функционировать без создания вакуума. При помощи актуальных вакуумных технологий, представленных эжекторными системами и водокольцевыми вакуум – насосами, становится возможным создание необходимого уровня разрежения для достижения температуры, соответствующей тройной точке азота, которая составляет 63,2 К.

Особого внимания заслуживает метод с использованием бинарной смеси жидкого кислорода и азота. Эта технология позволяет достичь температуры тройной точки и особенно рекомендуется для стартовых и испытательных комплексов, где требуется глубокое охлаждение (ниже 66 К).

Для выбора оптимального метода охлаждения в конкретных условиях следует обратиться к систематизированной схеме всех возможных способов охлаждения жидкого кислорода, представленной на рисунке 1.9, и провести технико – экономический анализ.

Система «жидкий кислород – азот» демонстрирует сложные взаимодействия на молекулярном уровне. Оба компонента обладают высокой взаимной растворимостью: жидкий кислород способен принять до 15,7 % азота по объему, в то время как азот может растворить до 69 % кислорода.

Фазовая диаграмма этой системы имеет примечательную особенность: при содержании азота от 15,7 % до 31 % наблюдается зона непрерывного ряда смешанных кристаллов. Эвтектическая точка системы характеризуется специфическими параметрами: концентрация азота составляет 22,5 % по объему, температура достигает 50,1 К, а давление паров – 160 Па.

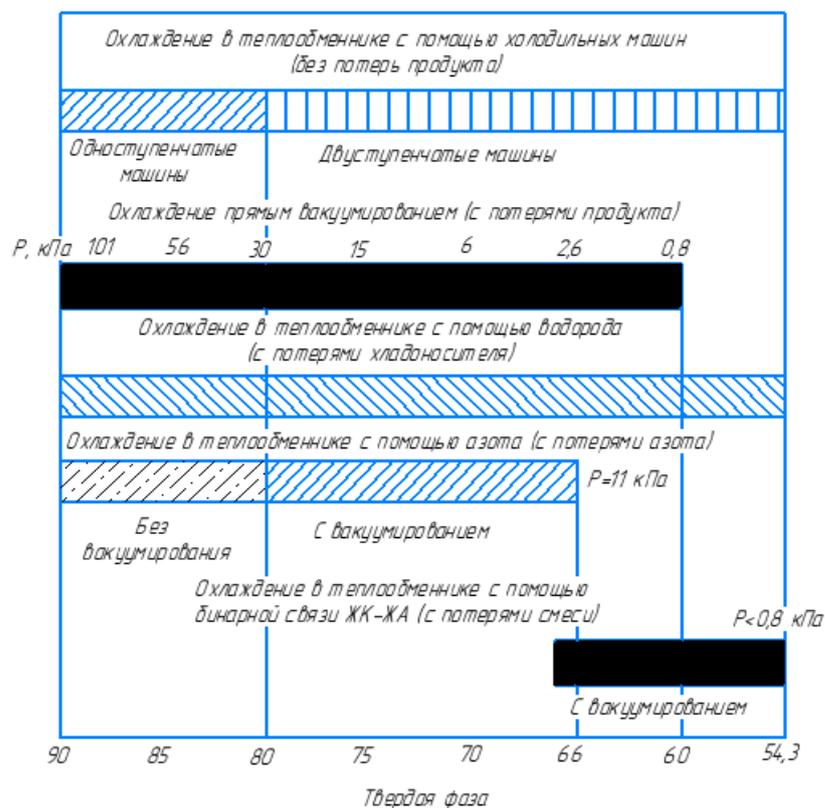


Рисунок 1.9 – Систематизация способов охлаждения жидкого кислорода

С практической точки зрения, данная смесь сохраняет жидкое состояние вплоть до 50,1 К. Процесс охлаждения достигается путем создания вакуума над поверхностью жидкости. Учитывая более высокую летучесть азота, начальная его концентрация должна превышать эвтектическую. Современные вакуумные системы способны обеспечить требуемое давление в 160 Па.

Однако в изучении данной системы существуют пробелы. В частности, отсутствует полная информация о давлении паров на участке от точки чистого кислорода до эвтектической точки, а фазовые равновесия в этом диапазоне остаются недостаточно исследованными.



Рисунок 1.10 – Диаграмма плавления

По результатам исследований бинарной системы «кислород – азот» выявлен ряд важных термодинамических характеристик. Между двумя линиями жидкости располагается зона двухфазного равновесия «пар – жидкость», при этом нижний температурный предел системы ограничивается эвтектической точкой (50,1 К). Примечательно, что при равных температурных условиях азот демонстрирует более высокое давление насыщенных паров по сравнению с кислородом. При этом потери на испарение при вакуумировании смеси лишь незначительно (на 10 %) превышают аналогичный показатель для чистого кислорода.

Система обладает рядом существенных практических преимуществ: она безопасна в эксплуатации, использует промышленно освоенные компоненты и отработанное оборудование. Многолетний опыт применения на космодромах подтверждает её надежность. Экономическая привлекательность обусловлена возможностью получения компонентов из воздуха. Важным техническим преимуществом являются более высокие рабочие давления при тех же температурах по сравнению с чистым кислородом.

Восьмидесятые годы двадцатого века ознаменовались существенным скачком в понимании данной системы. В ходе экспериментальных

исследований были выявлены ключевые характеристики: парциальное давление над жидкой фазой, корреляция между составами паровой и жидкой фаз, а также термодинамические показатели смеси, включая теплоемкость и теплоту парообразования. Проведенные испытания подтвердили возможность эксплуатации типового вакуумного оборудования.

С точки зрения практического использования неопределимую роль играют графические представления фазовых равновесий, отраженные на рисунок 1.11. Они позволяют рассчитать оптимальные параметры: композицию смеси, требуемый уровень вакуума и характеристики для достижения целевой температуры с учетом потерь при теплообмене.

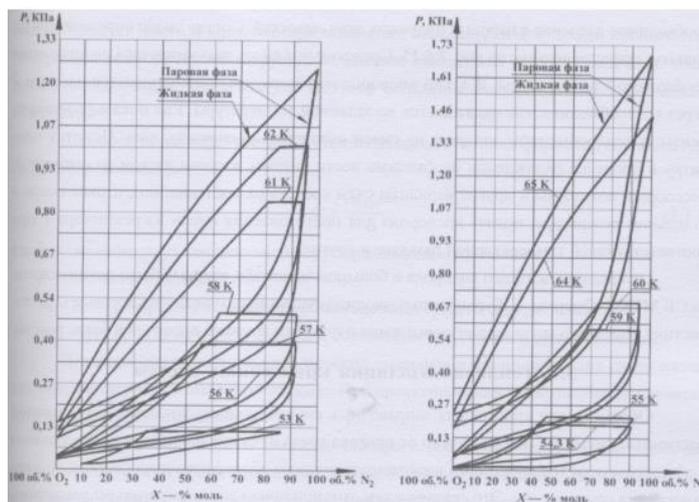


Рисунок 1.11 – Диаграмма фазовых равновесий

Ниже на рисунке 1.12 приведено краткое описание возможной схемы охлаждения ЖК с помощью бинарной смеси ЖК – ЖА.

В основе процесса криогенного охлаждения лежит применение двухкомпонентной смеси азота и кислорода, реализуемое через несколько последовательных этапов. Формирование данной смеси происходит в специальном теплообменном агрегате 3, который получает компоненты из отдельных хранилищ – резервуара 6 для кислорода и емкости 5, содержащей азот. Транспортировка компонентов обеспечивается за счет газового давления, генерируемого испарительными устройствами резервуаров. Требуемые

пропорции компонентов смеси определяются с помощью анализа диаграмм, отображенных на рисунке 1.11.

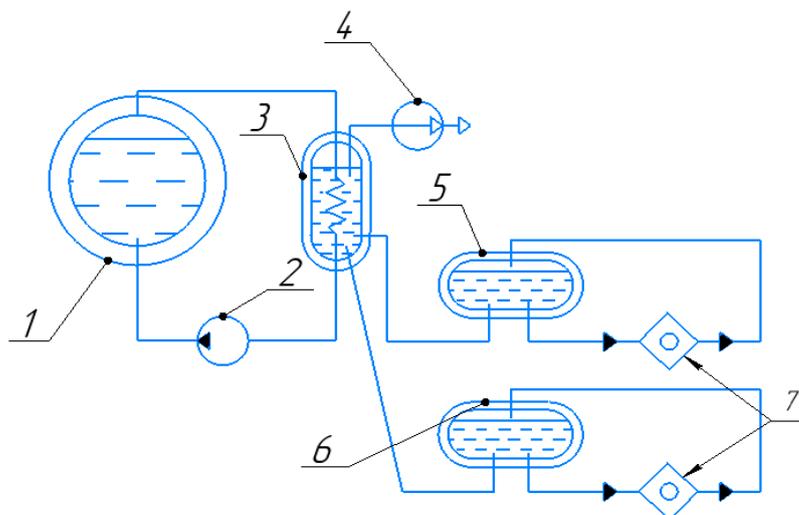


Рисунок 1.12 – Схема охлаждения жидкого кислорода бинарной смесью:
1 – Емкость; 2 – насос; 3 – охладитель с бинарной смесью; 4 – вакуумные средства; 5 – резервуар с кислородом; 6 – резервуар с азотом; 7 – испаритель

Собственно охлаждение происходит следующим образом: жидкий кислород циркулирует через теплообменник при помощи насоса 2, забирающего компонент из резервуара 1. Необходимый температурный режим поддерживается вакуумным оборудованием 4. Поскольку в процессе испарения преимущественно теряется азотный компонент, его убыль компенсируется постоянной подпиткой из емкости 5.

Технологическая схема допускает вариативность: смесь может готовиться в отдельном резервуаре, также возможно использование кислорода непосредственно из резервуара 1, для приготовления смеси.

Метод имеет определенные ограничения, связанные с неизбежными потерями хладагента через испарение. При этом установка сложных систем рекуперации паров на стартовой позиции признана нецелесообразной. Данная технология представляет собой оптимальный баланс между эффективностью охлаждения и практической применимостью в условиях космодрома.

1.1.2 Выводы

Преимущества и недостатки способов переохлаждения криогенных компонентов, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сводная таблица

По времени проведения охлаждения		
Способ переохлаждения	Преимущества	Недостатки
Охлаждение в резервуарах-хранилищах КТ.	Средства охлаждения относительно малой производительности.	Возможно ухудшение кондиции КТ вследствие хранения компонента под вакуумом.
Охлаждение КТ в процессе заправки.	Исключено натекание атмосферы извне вследствие хранения КТ под избыточным давлением.	Оборудование сложнее, чем при охлаждении в резервуарах-хранилищах.
По агрегатному состоянию охлаждаемого криогенного компонента		
Охлаждение КТ в области «жидкость-пар»		
Способ переохлаждения	Преимущества	Недостатки
Процесс непосредственного вакуумирования жидкости с помощью вакуум насосов и эжекторов.	1. Достижение любого уровня Т вплоть до тройной точки (Надежное охлаждение кислорода только до 60К, далее - неравновесный процесс); 2. Не требует сложного оборудования, больших капитальных и эксплуатационных затрат; 3. Надежность.	1. Ограничение по прочностным характеристикам вакуумируемого резервуара; 2. Возможно ухудшение кондиции КТ, вследствие натекания атмосферы извне.
Охлаждение за счет испарения жидкости при барботировании через неё неконденсирующегося газа.	1. Достижение любого уровня Т вплоть до тройной точки; 2. Процесс при постоянном избыточном давлении; 3. Надежность.	1. Дороговизна газа, сложность оборудования для сбора, очистки и охлаждения газа в замкнутом цикле; 2. Ухудшение кондиции КТ вследствие растворения в нем газа и его примесей.
Охлаждение КТ в области «жидкость»		
Способ переохлаждения	Преимущества	Недостатки
Охлаждение с помощью холодильной газовой машины (ХГМ).	1. Достижение любого уровня Т вплоть до тройной точки; 2. Эффективен в термодинамическом отношении.	Сложность оборудования и его высокая стоимость.
Охлаждение в ТО, погруженном в ванну, которая заполнена ХА, имеющим Т кипения ниже, чем Т, необходимая для охлаждения КТ.	Простота.	1. Менее эффективен в термодинамическом отношении, чем охлаждение с помощью ХГМ; 2. Сравнительно Дорог.
Охлаждение КТ вакуумируемыми ХА.	1. Простота; 2. Охлаждение до более низких температур, чем при охлаждении ХА без вакуумирования.	1. Менее эффективен в термодинамическом отношении, чем охлаждение с помощью ХГМ; 2. Сравнительно дорог; 3. Большие потери ХА, чем при охлаждении без вакуумирования.

На основе проведенного анализа различных методов переохлаждения был сделан обоснованный выбор технологического решения.

Выбранный метод:

- переохлаждение жидкого кислорода в резервуаре-хранилище;
- использование теплообменника, погруженного в ванну с жидким азотом;
- температура кипения хладагента ниже целевой температуры охлаждения компонента топлива.

Обоснование выбора жидкого азота в качестве хладагента:

Преимущества:

- 1) простота технологической схемы;
- 2) минимальные потери охлаждаемого компонента (жидкого кислорода);
- 3) отработанная технология;
- 4) доступность оборудования.

К недостаткам относятся неизбежные потери хладагента за счёт:

- испарения в процессе работы;
- необходимости дренажа паров в атмосферу.

Данное решение представляет собой оптимальный баланс между технологической эффективностью и практической реализуемостью в условиях реальной эксплуатации.

1.2 Описание системы заправки

На основе анализа текста можно систематизировать ключевые аспекты заправочных систем ракетно – космических комплексов. Их главное предназначение заключается в обеспечении полного цикла операций с компонентами топлива: от транспортировки и хранения до подачи на борт космического аппарата с соблюдением заданных параметров и точным контролем количества заправляемого вещества.

Эти системы характеризуются уникальностью и не имеют прямых аналогов в других промышленных областях, что обусловлено специфическими требованиями ракетной техники. Их инфраструктура включает комплекс взаимосвязанных элементов: хранилища с резервуарами, системы подачи компонентов, сеть заправочно – сливных и дренажных трубопроводов, а также

специализированное оборудование в виде кабель – заправочных башен, башен и ферм обслуживания.

Особое место занимают криогенные резервуары для жидкого кислорода, конструкция которых определяется специфическими требованиями к материалам и форме. При их проектировании учитываются многие факторы: требуемая вместимость, технологичность изготовления, транспортабельность, монтажные условия и эксплуатационные требования.

Процесс дозирования компонентов требует высокой точности и определяется конкретным полетным заданием. Расчет необходимого объема баков производится на основе весовых характеристик заправки с учетом требуемого соотношения окислителя и горючего.

1.3 РБ «Бриз-КМ»

Разгонный блок «Бриз-КМ» представляет собой третью ступень ракеты-носителя легкого класса «Рокот». Его основное предназначение – доставка космических аппаратов на расчетные орбиты, включая возможность групповых запусков с размещением полезной нагрузки на орбитах различных параметров.

Двигательная система блока базируется на использовании высококипящих компонентов топлива – азотного тетраоксида в качестве окислителя и несимметричного диметилгидразина как горючего. В состав двигательной установки входят три типа жидкостных ракетных двигателей: многоразовый маршевый двигатель, двигатели коррекции и ориентации.

Конструктивно «Бриз-КМ» состоит из пяти основных отсеков: двигательного, топливного, приборного, переходного, а также адаптера для крепления полезной нагрузки. Такая компоновка обеспечивает выполнение всех необходимых функций разгонного блока.

Разгонный блок обладает обширным диапазоном эксплуатационных характеристик. Он способен с высокой точностью доставлять космические аппараты на целевые орбиты, контролировать их пространственное положение и гарантировать бесперебойное энергоснабжение на протяжении орбитального полета длительностью до семи часов. «Бриз-КМ» заслужил признание

благодаря своим основным преимуществам: исключительной надежности, многозадачности и возможности использования в различных миссиях.

Таблица 1.2 – Тактико-технические характеристики РБ «Бриз-КМ»

Характеристика	РБ «Бриз-КМ»
Состав	Моноблок с коническим баковым отсеком и маршевым двигателем, расположенным в нише бака «Г».
Применение	в составе РН «Рокот» в качестве III ступени
Основные особенности	Возможность маневрирования в полете.
Начальная масса, т	6.475
Заправляемый запас топлива (АТ+НДМГ), т	до 5.055
Тип, количество и тяга в пустоте двигателей	ЖРД С5.98 (1 шт.), 2.0 тс (маршевый),
	ЖРД 11Д458 (4 шт.) по 40 кгс (двигатели коррекции),
	17Д58Э (12 шт.) по 1.3 кгс (двигатели ориентации и стабилизации)
Число включений маршевого двигателя	До 8
Максимальное время автономного полета, час.	7

1.4. Техническое задание для разработки заправочного агрегата

1. Требования к конструктивному устройству:

– цистерна объемом не менее 5 м^3 , температура перекачиваемой среды от минус $180 \text{ }^\circ\text{C}$ до минус $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Должна быть размещена на железнодорожной платформе, иметь теплоизоляцию, с минимальными потерями от испарения;

– насос должен обеспечивать необходимый расход от 7 до $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ для переохлаждения ЖК, выдерживать температуру перекачиваемой среды равную минус $183 \text{ }^\circ\text{C}$;

– давление в емкости с ЖК для бескавитационной работы насоса – $0,124 \text{ МПа}$, давление наддува емкости с ЖА, необходимое для наполнения емкости ТО – $0,197 \text{ МПа}$;

– криогенная арматура должны быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить надежную работу при экстремально низких температурах газов: для азота минус $196 \text{ }^\circ\text{C}$, для кислорода минус $183 \text{ }^\circ\text{C}$. Изделия имеют особую конструкцию и изготавливаются из специальных материалов,

гарантирующих полную герметичность, функциональность и высокую надежность. Материал проточной части – сталь 12Х18Н10Т.

2. Агрегат предназначен:

- прием топливного компонента (ЖК) и хладагента (ЖА) из емкости-хранилища;
- транспортирование топливного компонента на СП;
- переохлаждение в ТО, заполненном ХА;
- выдача топливного компонента в ББ РБ.

3. Требования по топливным компонентам:

В качестве топливного компонента для разгонного блока-аналога предусмотрено использование технического жидкого кислорода, соответствующего требованиям ГОСТ 6331-78 (сорт 2). Данный компонент должен содержать не менее 99.5 % чистого кислорода, а содержание двуокиси углерода (CO_2) не должно превышать 1,0 мг/л. Учитывая эти строгие спецификации, необходимо обеспечить сохранность качественных характеристик жидкого кислорода и свести к минимуму его потери на всех этапах работы заправочной аппаратуры.

4. Требования к ЗА по обеспечению температурного режима:

С целью обеспечения бескавитационной работы МДУ после длительного (более 5 часов) нахождения РБ на переходной орбите, ЖК при заправке переохлаждается до температуры 80 К, что на 10 К ниже температуры кипения кислорода при атмосферном давлении. А температура ЖК в баке к моменту пуска РБ не должна превышать $T_{\text{макс}} = 81 \text{ К}$.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ЗАПРАВКИ

2.1 Определение объема ББ ЖК

Для разработки ЗА необходимо знать объем бака кислорода РБ-аналога «Бриз-КМ».

Для упрощения расчета объема бака будем считать, что РБ-аналог должен развивать такую же тягу, как и РБ «Бриз-КМ». Отличие же будет состоять в величине удельного импульса, который отличается для различных топливных пар компонентов.

Удельный импульс – это приращение количества движения летательного аппарата в результате сгорания 1 кг массы топлива.

Удельный импульс:

$$I_{y\partial} = \frac{P}{\dot{m}} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{кг}, \quad (2.1)$$

где P – тяга двигательной установки, Н;

\dot{m} – массовый расход КТ, кг/с.

Удельный импульс топливной пары АТ + НДМГ: $I_{y\partial} = 3300 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{кг}$.

Удельный импульс топливной пары $\text{LH}_2 + \text{LO}_2$: $I_{y\partial 2} = 4300 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{кг}$.

По условию тяги РБ равны: $P_1 = P_2$.

Следовательно: $I_{y\partial 1} \cdot \dot{m}_1 = I_{y\partial 2} \cdot \dot{m}_2$.

Отсюда массовый расход топливных компонентов РБ-аналога:

$$\dot{m}_2 = \frac{I_{y\partial 1} \cdot \dot{m}_1}{I_{y\partial 2}}. \quad (2.2)$$

Так как нас интересует суммарный массовый расход за время функционирования РБ, то от массовых расходов можно перейти к массам компонентов:

$$m_2 = \frac{I_{y01} \cdot m_1}{I_{y02}} = \frac{3300 \cdot 5055}{4300} = 3880 \text{ кг}, \quad (2.3)$$

где m_2 – сумма масс топливных компонентов РБ-аналога.

Сумма масс топливных компонентов рассчитывается по формуле:

$$m_2 = m = m_{O_2} + m_{H_2}. \quad (2.4)$$

В данном случае описано стехиометрическое соотношение компонентов водородно – кислородного топлива, представляющее особый интерес для ракетной техники. При смешении водорода и кислорода в пропорции 1 : 8 по массе достигается максимальный энергетический выход на единицу массы топливной смеси. Такое соотношение обеспечивает полное сгорание компонентов, то есть в процессе реакции весь водород и кислород участвуют в образовании продуктов сгорания, не оставляя избытка какого-либо компонента. Именно в этом случае реализуется наибольшая термохимическая эффективность, когда на каждый килограмм топливной смеси выделяется максимальное количество энергии.

Примем соотношение компонентов $H_2 : O_2 = 1 : 8$, так как при этом соотношении масса заправляемого жидкого кислорода в РБ-аналог максимальна, и расчет будет производиться по максимальной нагрузке на ЗА. Соотношение компонентов:

$$K_m = \frac{m_o}{m_2} = 8, \quad (2.5)$$

где $m_o = m_{O_2}$ – масса жидкого кислорода;

$m_2 = m_{H_2}$ – масса жидкого водорода.

Масса ЖК:

$$m_o = \frac{K_m}{K_m + 1} \cdot m = \frac{8}{8 + 1} \cdot 3880 = 3448.9 \text{ кг.} \quad (2.6)$$

Масса ЖВ:

$$m_2 = \frac{K_m}{K_m + 1} \cdot m = \frac{1}{8 + 1} \cdot 3880 = 431.1 \text{ кг.} \quad (2.7)$$

Плотность ЖК при $T = 90 \text{ К}$: $\rho_{O_2} = 1148 \text{ кг / м}^3$.

Объем ЖК, который необходимо заправить в бак РБ-аналога «Бриз-КМ»:

$$V_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{\rho_{O_2}} = \frac{3448.9}{1148} = 3 \text{ м}^3. \quad (2.8)$$

2.2 Расчет теплообменника

ТО представляет из себя емкость в которую встроены спиральный змеевик. Емкость заполняется ЖА, давление в ней поддерживается на уровне атмосферного. Через змеевик с помощью насоса перекачивается ЖК по кольцу через ТО и возвращается в емкость ЖК. Процесс происходит до тех пор, пока ЖК не переохладится до нужной температуры.

2.2.1 Характеристики емкости и змеевика

Предположим, что конструкция емкости позволяет разместить змеевик длиной не более 100 м.

Примем внутренний диаметр трубки змеевика $d_{вн.} = 0.023 \text{ м}$.

Наружный диаметр змеевика $d_{нар.} = 0.026 \text{ м}$.

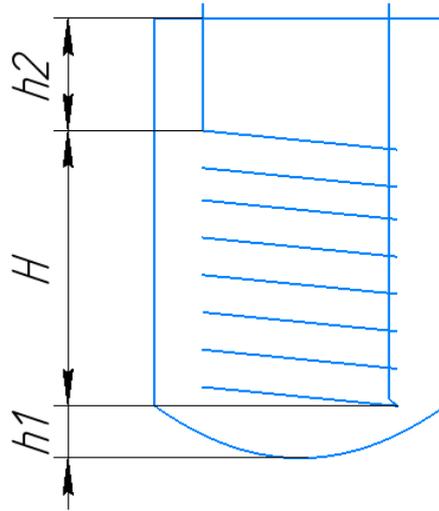


Рисунок 2.1 – Схема конструкции емкости

Радиус змеевика $R_{зм} = 0.6$ м.

Внутренний радиус емкости $R_{емк} = 0.7$ м.

Определим габариты емкости ТО:

– примем высоту спирали змеевика $H = 1.8$ м;

– расстояние от спирали до днища $h_1 = 0.2$ м;

– расстояние от спирали до крышки $h_2 = 0.4$ м.

Зададим высоту слоя ЖА над верхним витком змеевика равным:

$$h_{зм} = \frac{h_2}{3} = \frac{0.4}{3} = 0.133 \text{ м.} \quad (2.9)$$

Уровень азота в ТО, необходимый для погруженного состояния змеевика:

$$h_{погр.} = H + h_1 + h_{зм} = 1.8 + 0.2 + \frac{0.4}{3} = 2.133 \text{ м.} \quad (2.10)$$

Объем азота в емкости, необходимый для погруженного состояния змеевика:

$$V_{\text{погр.}N_2} = \pi \cdot R_{\text{емк.}}^2 \cdot h_{\text{погр.}} = 3.14 \cdot 0.7^2 \cdot 2.133 = 3.28 \text{ м}^3. \quad (2.11)$$

Масса азота в емкости, необходимая для погруженного состояния змеевика:

$$M_1 = V_{\text{погр.}N_2} \cdot \rho_{N_2} = 3.28 \cdot 808 = 2651.7 \text{ кг}. \quad (2.12)$$

Объем емкости:

$$V = \pi \cdot R_{\text{емк.}}^2 \cdot (H + h_1 + h_2) = 3.14 \cdot 0.7^2 \cdot (1.8 + 0.2 + 0.4) = 3.7 \text{ м}^3. \quad (2.13)$$

Шаг витка:

$$s = \frac{H}{n} = \frac{1.8}{26} = 0.069 \text{ м}, \quad (2.14)$$

где $n = 26$ – число витков змеевика.

Длина одного витка:

$$l_{\text{вит.}} = \sqrt{s^2 + (2 \cdot \pi \cdot R)^2} = \sqrt{0.069^2 + (2 \cdot 3.14 \cdot 0.6)^2} = 3.77 \text{ м}. \quad (2.15)$$

Длина змеевика:

$$L = l_{\text{вит.}} \cdot n = 3.77 \cdot 26 = 98 \text{ м}. \quad (2.16)$$

В качестве материала змеевика принимаем сталь 12Х18Н10Т, теплопроводность которой при 90 К: $\lambda_{\text{ст.}} = 9.2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

2.2.2 Характеристики жидкого кислорода

Объем ЖК, необходимый для заправки в ББ, $V_{ББ\text{O}_2} = 3 \text{ м}^3$, также необходим ЖК объемом $V_{\text{O}_2} = 3.5 \text{ м}^3$ для заполнения магистралей и замену азотной среды на переохлаждаемый ЖК, скорость течения W равная 5 м/с , плотность ρ_{O_2} равная 1148 кг/м^3 .

Масса:

$$m_{\text{O}_2} = \rho \cdot V = 1148 \cdot 3.5 = 4018 \text{ кг.} \quad (2.17)$$

Объемный расход ЖК:

$$V_{\text{O}_2} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.}} \cdot W}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.023^2 \cdot 5 \cdot 3600}{4} = 7.47 \text{ м}^3 / \text{ч.} \quad (2.18)$$

При $T = 85 \text{ К}$:

Теплопроводность $\lambda_{\text{O}_2} = 154 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

Удельная теплоемкость $C_{P_{\text{O}_2}} = 1607 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

Коэффициент динамической вязкости $\mu_{\text{O}_2} = 2162 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$;

Начальная температура в емкости ЖК $T_{\text{нач.}\text{O}_2} = 90 \text{ К}$;

Конечная температура в емкости ЖК $T_{\text{кон.}\text{O}_2} = 80 \text{ К}$.

2.2.3 Характеристики жидкого азота

При $T = 77 \text{ К}$:

Плотность $\rho_{\text{N}_2} = 808 \text{ кг/м}^3$;

Теплопроводность $\lambda_{\text{N}_2} = 7.82 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

Коэффициент динамической вязкости $\mu_{\text{N}_2} = 1677 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$;

Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{\text{N}_2} = 8.85 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$;

Молярная масса пара $M_{\text{nN}_2} = 28 \text{ кг/моль}$;

Начальная и конечная температура в емкости $T_{нач.N_2} = T_{кон.N_2} = T_{N_2} = 77 \text{ K}$.

2.2.4 Расчет коэффициента теплоотдачи от теплоносителя (ЖК) к внутренней стенке змеевика α_{O_2}

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{O_2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{O_2}}{d_{вн.}}. \quad (2.19)$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности.

Критерий Нуссельта для течения жидкости в змеевике:

$$Nu_{O_2} = 1.4 \cdot \left(Re \cdot \frac{d_{вн.}}{L_{зм.}} \right)^{0.4} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_{O_2}}{Pr_{cm_{O_2}}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_k. \quad (2.20)$$

где Re – критерий подобия течения вязкой жидкости;

Pr – критерий подобия тепловых процессов в жидкостях и газа;

Pr_{O_2} – число Прандтля при температуре охлаждающегося теплоносителя;

$Pr_{cm_{O_2}}$ – число Прандтля при температуре стенки змеевика.

Для охлаждающегося теплоносителя примем с погрешностью в сторону уменьшения коэффициента теплоотдачи, то есть в сторону запаса:

$$\left(\frac{Pr_{O_2}}{Pr_{cm_{O_2}}} \right)^{0.25} = 0,93. \quad (2.21)$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot d_{\text{вн.}} \cdot \rho}{\mu} = \frac{5 \cdot 0.023 \cdot 1160}{2162 \cdot 10^{-7}} = 6.17 \cdot 10^5. \quad (2.22)$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{2162 \cdot 10^{-7} \cdot 1607}{154 \cdot 10^{-3}} = 2.25. \quad (2.23)$$

Коэффициент кривизны змеевика:

$$\varepsilon_k = 1 + 1.77 \cdot \frac{d_{\text{нар.}}}{R_{\text{зм.}}} = 1 + 1.77 \cdot \frac{0.026}{0.6} = 1.07. \quad (2.24)$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu_{O_2} = .4 \cdot \left(Re \cdot \frac{d_{\text{вн.}}}{L_{\text{зм.}}} \right)^{0.4} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_{O_2}}{Pr_{cm_{O_2}}} \right)^{0.25} \cdot \varepsilon_k = 1.4 \cdot (6.17 \cdot 10^5 \cdot \frac{0.023}{98})^{0.4} \times \\ \times 2.25^{0.33} \cdot 0.93 \cdot 1.07 = 13.32. \quad (2.25)$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{O_2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{O_2}}{d_{\text{вн.}}} = \frac{13.32 \cdot 154 \cdot 10^{-3}}{0.023} = 89.19 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}. \quad (2.26)$$

2.2.5 Расчет коэффициента теплоотдачи от хладоносителя (ЖА) к внешней стенке змеевика α_{N_2}

ЖК непрерывно охлаждается в змеевике, то есть его температура непрерывно понижается в течении процесса переохлаждения. Этот процесс

периодический. ЖА непрерывно получает тепло от ЖК и кипит на поверхности змеевика, погруженного в емкость.

Средняя начальная разность температур между ЖА и ЖК:

$$\Delta t = \frac{T_{нач.O_2} - T_{N_2}}{2} = \frac{90 - 77}{2} = 6.5 \text{ K}. \quad (2.27)$$

Средняя разность температур для периодического процесса нагрева ЖА в большом объеме за все время процесса переохлаждения ЖК:

$$\Delta t_{cp} = \Delta t \cdot \left(\frac{A - 1}{A \cdot \ln A} \right) = 6.5 \cdot \left(\frac{4.33 - 1}{4.33 \cdot \ln 4.33} \right) = 3.41 \text{ K}, \quad (2.28)$$

где A – величина постоянная для всего процесса нагрева ЖА.

Для любого момента времени, когда температура ЖА будет T_{N_2} :

$$A = \frac{T_{нач.O_2} - T_{N_2}}{T_{кон.O_2} - T_{N_2}} = \frac{90 - 77}{80 - 77} = 4.33. \quad (2.29)$$

Будем считать, что средняя разность температур между ЖА и стенкой будет равна $\Delta t_{cp} = 3.41 \text{ K}$. По графику зависимости удельного температурного потока от разности температур азота и стенки при кипении ЖА в большом объеме находим величину плотности теплового потока q при $\Delta t_{cp} = 3.41 \text{ K}$.

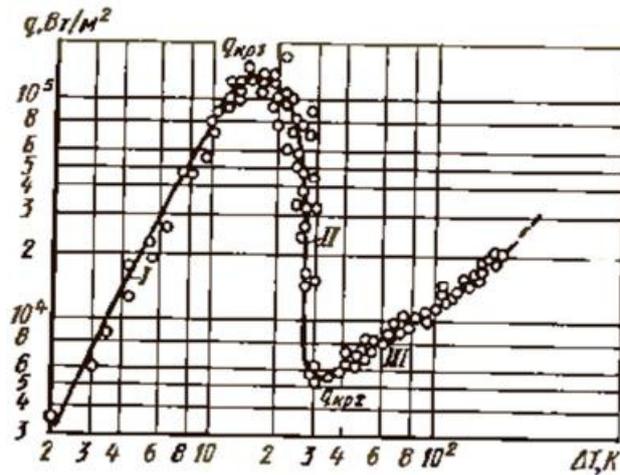


Рисунок 2.2 – График зависимости удельного температурного потока от разности температур

Из графика видно, что при $\Delta t_{cp} = 3.41 K$ плотность теплового потока $q = 10^4 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и область I соответствует пузырьковому режиму кипения ЖА на поверхности, погруженной в большом объеме.

Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости на поверхности, погруженной в большой объем:

$$\alpha_{N_2} = 0.075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_n} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot \rho}{\mu \cdot \sigma \cdot T_{кин.}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}}, \quad (2.30)$$

где ρ_n – плотность пара.

Плотность пара рассчитывается по формуле:

$$\rho_n = \frac{M_n}{22.4} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T}{T_0} = \frac{28}{22.4} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{273}{80} = 4.38 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (2.31)$$

где P – рабочее давление;

T – рабочая температура;

P_0 – давление при нормальных условиях;

T_0 – температура при нормальных условиях.

Найдем по формуле (2.30) коэффициент теплоотдачи от хладоносителя (ЖА) к внешней стенке змеевика:

$$\alpha_{N_2} = 0.075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{808}{4.38} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{(7.82 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 808}{1677 \cdot 10^{-7} \cdot 8.85 \cdot 10^{-3} \cdot 77} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 10^{4 \frac{2}{3}} =$$
$$= 343.88 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

2.2.6 Время, затрачиваемое на переохлаждение ЖК

Время, затрачиваемое на переохлаждение ЖК находим из соотношения:

$$\tau = \frac{Q}{k \cdot F_{нов} \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (2.32)$$

где Q – количество теплоты, отдаваемое ЖК жидкому азоту в процессе переохлаждения.

Количество теплоты рассчитывается по формуле:

$$Q = G_{O_2} \cdot C_{O_2} \cdot (T_{нач.O_2} - T_{кон.O_2}) = 4018 \cdot 1607 \cdot 10 = 6.45 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.33)$$

Масса ЖА, испарившегося за счет теплопритоков от ЖК в процессе его переохлаждения:

$$M_3 = \frac{Q}{r_{N_2}} = \frac{6.45 \cdot 10^4}{199.3} = 323.6 \text{ кг}, \quad (2.34)$$

где $r_{N_2} = 199.3 \text{ кДж/кг}$ – теплота испарения ЖА;

$F_{нов}$ – площадь внешней поверхности змеевика, погруженной в ЖА.

Площадь внешней поверхности змеевика найдем по формуле:

$$F_{нов} = \pi \cdot d_{нар} \cdot L = 3.14 \cdot 0.026 \cdot 98 = 8 \text{ м}^2. \quad (2.35)$$

k – коэффициент теплопередачи, рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{O_2}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{1}{89.19} + \frac{0.003}{9.2} + \frac{1}{343.88}} = 69.22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \quad (2.36)$$

где $\lambda_{ст.} = 9.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – толщина стенки змеевика.

В итоге:

$$\tau = \frac{Q}{k \cdot F_{нов} \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{6.45}{69.22 \cdot 8 \cdot 3.41} = 34157 \text{ с} = 9.5 \text{ ч}. \quad (2.37)$$

2.3 Подбор насоса для ЗА

Насос должен обеспечивать необходимый расход для переохлаждения ЖК. В таблицы 2.1 представлены возможные варианты насоса для ЗА.

$$\text{Объемный расход: } \dot{V}_{охл.O_2} = 7.47 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Таблица 2.1 – Насосы из ряда, выпускаемых компанией «Контех-Крио»

Насос(исполнение)	Подача, м ³ /ч	Напор, м.в.ст.	Мощность, кВт	Обороты, об/мин	Масса, кг	Габариты, мм
НкпВ-6,3/280	6,3	280	22	8000	280	917x400x566
НкпГ2-5/80	5	80	5,5	2950	115	465x465x910
НкпМ(1,2,3) 12,5/25	12,5	25	3	2950	85	775x465x465
НкпМ(1,2,3) 12,5/40	12	40	4	2950	106	775x465x465

Характеристики насоса НкпМ можно структурировать следующим образом:

1. Конструктивные особенности:

– тип: центробежный моноблочный;

- исполнение: вертикальное или горизонтальное;
- количество ступеней: одно- или двухступенчатые;
- оснащен вакуумной теплоизоляцией корпуса;
- патрубки под сварку с трубопроводами.

2. Назначение:

– перекачивание криогенных жидкостей например кислород, азот, аргон и др.;

– применяется для:

- а) разгрузки резервуаров;
- б) заправки резервуаров;
- в) работы в воздухоразделительных установках;
- г) систем хранения и транспортировки.

3. Технические характеристики:

– температурный диапазон: от минус 200 °С до минус 180 °С

– материалы проточной части:

- а) сталь 12Х18Н10Т;
- б) бронза БрАЖМЦ.

– уплотнение вала: торцевое;

– кавитационный запас: от 2 до 3 м столба жидкости.

4. Режимы эксплуатации:

- периодический;
- продолжительный.

5. Особенности монтажа:

- вертикальное исполнение;
- сварное соединение с системой трубопроводов.

Таблица 2.2 – Характеристики выбранного насоса

Насос (исполнение)	Подача, м ³ /ч	Напор, м.в.ст.	Мощность, кВт	Обороты об/мин	Масса, кг	Габариты, мм
НкпМ(1,2,3) 12,5/40	12	40	4	2950	106	775x465x465

Внешний вид выбранного электронасоса приведен на рисунке 2.3

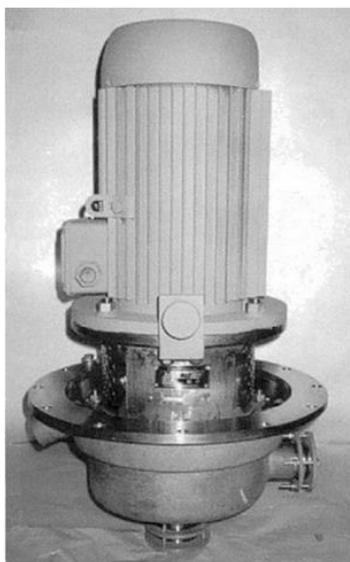


Рисунок 2.3 – Внешний вид электронасоса НкпМ2-12,5/40

2.4 Определение параметров ЖК на входе в магистраль

Исходные данные:

- температура на входе в магистраль: $T_0 = 80 \text{ K}$;
- давление на входе в бортовой бак: $p_{ББ} = 0.11 \text{ МПа}$;
- объемный расход выбранного насоса: $\dot{V}_{нас.} = 12 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Для определения параметров ЖК на входе в магистраль нужно знать длину трубопровода. Определим длину трубопровода как сумму длин участков трубопровода от насоса до заправочной горловины РБ:

- длина первой ступени РН «Рокот» $L1 = 17.2 \text{ м}$;
- длина второй ступени РН «Рокот» $L2 = 3,9 \text{ м}$.

Примем расстояние от второй ступени до заправочной горловины бака ЖК РБ-аналога «Бриз-КМ» $L3 = 2,9 \text{ м}$.

Зададим расстояние от насоса ЗА до стационарной опорной колонны РН «Рокот», по которой проходит заправочная магистраль $L4 = 11 \text{ м}$.

Отсюда суммарная длина магистрали:

$$L = L1 + L2 + L3 + L4 = 17,2 + 3,9 + 2,9 + 11 = 35 \text{ м.} \quad (2.38)$$

Материал внутренней трубы магистрали – сталь 12Х18Н10Т.

Для практических расчетов в области больших чисел Рейнольдса можно использовать экспериментальные значения коэффициентов трения $\lambda_{тр.} = 0.015 - 0.021$, полученные на трубах из нержавеющей стали при транспортировке ЖА и ЖК.

Коэффициент трения стенок трубопровода: $\lambda_{тр.} = 0.02$.

Суммарный коэффициент местных сопротивлений на участке трубопровода складывается из коэффициентов местных сопротивлений элементов трубопровода на участке трубопровода от насоса до ББ.

На этом участке присутствуют элементы:

– 4 пневмоклапана с $d_y = 50$ мм $\xi_{к\text{лап.}} = 6 \cdot 4 = 24$;

– 8 колен плавных 90° $\xi_{к\text{ол}} = 8 \cdot 0.25 = 2$;

– 1 расходомер $\xi_{расх.} = 4$;

– 1 клапан обратный $\xi_{об.к\text{лап.}} = 6$;

– 1 фильтр $\xi_{ф.} = 2$.

Суммарный коэффициент местных сопротивлений:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{к\text{лап.}} + \xi_{к\text{ол.}} + \xi_{расх.} + \xi_{об.к\text{лап.}} + \xi_{ф.} = 24 + 2 + 4 + 6 + 2 = 38. \quad (2.39)$$

Средняя плотность теплопотока из окружающей среды $q = 20$ Вт / м².

Принятая плотность теплового потока соответствует трубопроводу с газонаполненной теплоизоляцией и трубопроводу с экранно – вакуумной теплоизоляцией при частичной потере вакуума.

Удельная теплоемкость ЖК (Т = 80 К) $C_{р_{O_2}} = 1587$ Дж / (кг · К).

Плотность ЖК (Т = 80 К) $\rho = 1182$ кг / м³.

Для современных конструкций отечественных центробежных насосов значения коэффициента объемных и гидравлических потерь составляют обычно

от 60 % до 80 %. Примем коэффициент объемных и гидравлических потерь насоса: $\eta = 70 \%$;

Предположим, что влияние местных сопротивлений мало и расчет оптимальной скорости течения ЖК произведем без учета местных сопротивлений:

$$W_{0,\lambda} = 1.17 \cdot \left(\frac{q \cdot \eta}{\lambda_{mp} \cdot \rho} \right)^{1/3} = 1.17 \cdot \left(\frac{20 \cdot 0.7}{0.02 \cdot 1182} \right)^{1/3} = 0.98 \text{ м/с.} \quad (2.40)$$

Диаметр магистрали, соответствующий данной скорости потока:

$$d_{mp} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot W_{0,\lambda} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{3.14 \cdot 0.98 \cdot 3600}} = 6.5 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \quad (2.41)$$

Коэффициент отношения сопротивлений в системе рассчитывается по формуле:

$$\theta = \frac{\xi_{\Sigma} \cdot d}{\lambda_{mp} \cdot l} = \frac{38 \cdot 0.065}{0.02 \cdot 35} = 3.57; \quad (2.42)$$

При значении коэффициента отношения сопротивлений в системе не превышающем 0,4 расчёт скорости можно производить без учёта местных сопротивлений.

Условие не выполняется, следовательно, производим пересчет оптимальной скорости с учетом местных сопротивлений по формуле:

$$W_{\xi,0} = 1.17 \cdot \sqrt[3]{\frac{q \cdot \eta}{\lambda_{mp} \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{0.8 \cdot \xi_{\Sigma} \cdot d_{mp}}{\lambda_{mp} \cdot l}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{20 \cdot 0.7}{0.02 \cdot 1182 \cdot \left(1 + \frac{0.8 \cdot 38 \cdot 0.065}{0.02 \cdot 35}\right)}} =$$

$$= 0.63 \text{ м/с.} \quad (2.43)$$

Пересчитываем диаметр, соответствующий данной скорости потока:

$$d_{mp} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot W_{0,\xi} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{3.14 \cdot 0.63 \cdot 3600}} = 8.2 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \quad (2.44)$$

Таблица 2.3 – Ближайшие диаметры трубопроводов из нормализованных

Условный диаметр d_y , мм	Труба внутренняя $d \times \delta$, мм	Кожух $d \times \delta$, мм
50	56x2	100x2
100	100x2	150x2.5

При увеличении скорости кислород прогревается незначительно. Поэтому диаметр трубопровода выберем в меньшую сторону, что позволит уменьшить массу конструкции трубопровода и арматуры. Выберем диаметр трубопровода из нормализованных 56 мм с толщиной стенки 2 мм.

Скорость транспортирования ЖК по трубопроводу с $d_y = 50$ мм:

Давление на выходе из насоса, обеспечивающее требуемый расход и давление на входе к потребителю:

$$p_{нас.} = p_{ББ} + \left(\xi_{\Sigma} + \frac{\lambda_{mp} \cdot l}{d} \right) \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} = 0.11 \cdot 10^6 + \left(38 + \frac{0.02 \cdot 35}{0.05} \right) \cdot \frac{1182 \cdot 1.7^2}{2} =$$

$$= 0.198 \cdot 10^6 \text{ Па.} \quad (2.45)$$

Необходимый напор для заправки ЖК в ББ: 1 метр водного столба равный 9806.65 Па.

Насос подходит.

Температура ЖК на входе в ББ:

$$T_{ББ} = T_0 + \frac{\pi \cdot d_y \cdot l \cdot q \cdot 3600}{\dot{V} \cdot \rho \cdot C_{pO_2}} + \frac{p_{нас} - p_{ББ}}{\eta \cdot C_{pO_2} \cdot \rho} + \frac{\Delta h}{C_{pO_2}} \cdot g = \frac{(0.198 - 0.11) \cdot 10^6}{0.7 \cdot 1587 \cdot 1182} + 80 + \frac{3.14 \cdot 0.05 \cdot 35 \cdot 20 \cdot 3600}{12 \cdot 1182 \cdot 1587} + \frac{25 \cdot 9.8}{1587} = 80.24 \text{ K.} \quad (2.46)$$

2.5 Определение количества ЖА, необходимого для захлаживания трубопровода

Масса ЖА для захлаживания трубопровода:

$$M_2 = \frac{(M^T + M^a) \cdot \int_{T_s}^{T_0} c_M \cdot \Delta T}{r + \varphi \cdot \int_{T_s}^{T_0} c_p^T \cdot \Delta T}, \quad (2.47)$$

где $T_0 = 77\text{K}$ – температура ЖА;

T_s – температура стенки, которая меняется в процессе захлаживания от 293 до 77 К;

Масса металла трубопровода M^T :

$$M^T = \pi \cdot (d_{вн} + \delta) \cdot \delta \cdot l \cdot \rho_{ст} = 3.14 \cdot (0.05 + 0.003) \cdot 0.003 \cdot 35 \cdot 8150 = 142.5 \text{ кг.} \quad (2.48)$$

где M^T – это суммарная масса всех элементов арматуры трубопровода на пути движения ЖА, в данном случае ЖА.

Как видно из гидросхемы на пути движения от емкости азота расположены:

- 7 пневмоклапанов (К4, К3, К5, К10, К11, К16, ЗСК) массой 31 кг;
- 1 обратный клапан (КЛЮ1) массой 15 кг;

- 1 расходомер (Рм1) массой 6 кг;
- 1 мембрана прорыва массой 2 кг;
- 1 фильтр массой 2 кг.

В итоге получаем суммарную массу арматуры:

$$M^T = 7 \cdot 31 + 15 + 6 + 2 + 2 = 242 \text{ кг.}$$

Теплоемкость металла при средней температуре: $c_M = 0.34 \text{ кДж} / \text{кг}$.

Посчитаем интеграл $\int_{T_s}^{T_0} c_p^{\Gamma} \cdot \Delta T$ численно, для этого возьмем 3 интервала:

Таблица 2.4 – Интервалы

Номер интервала	1	2	3
Температура стенки T_{s_i}, K	293	185	80
Разность температур $\Delta T_i = T_{s_i} - T_0, K$	216	108	3
Удельная теплоемкость азота $c_{p_i}^{\Gamma}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	1.041	1.063	1.151

И заменим интеграл суммой:

$$\int_{T_s}^{T_0} c_p^{\Gamma} \cdot \Delta T = \frac{c_{p_1}^{\Gamma} \cdot \Delta T_1 + c_{p_2}^{\Gamma} \cdot \Delta T_2 + c_{p_3}^{\Gamma} \cdot \Delta T_3}{3} = \frac{1.041 \cdot 216 + 1.063 \cdot 108 + 1.151 \cdot 3}{3} = 114.37 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (2.49)$$

где $r_{N_2} = 199.3 \text{ кДж} / \text{кг}$ – теплота испарения азота.

Коэффициент использования теплоты паров $\varphi = 0.85$.

Получаем:

$$M_2 = \frac{(M^T + M^a) \cdot \int_{T_s}^{T_0} c_M \cdot \Delta T}{r + \varphi \cdot \int_{T_s}^{T_0} c_p^{\Gamma} \cdot \Delta T} = \frac{(142.5 + 242) \cdot 0.34 \cdot 185}{199.3 + 0.85 \cdot 114.37} = 81.5 \text{ кг.} \quad (2.50)$$

2.6 Определение количества ЖА, необходимого для захлаживания ББ

Исходные данные:

Примем объем газовой подушки $V_{ГП}$ равным 5 % от объема заправляемого ЖК $V_{зан}$, тогда суммарный объем бака ЖК:

$$V_{ББ} = V_{зан} + V_{ГП} = V_{зан} + 0.05 \cdot V_{зан} = 1.05 \cdot 3 = 3.15 \text{ м}^3. \quad (2.51)$$

Будем считать, что ББ имеет сферическую форму.

Диаметр ББ:

$$d_{ББ} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{ББ}}{4 \cdot \pi}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3.15}{4 \cdot 3.14}} = 1.82 \text{ м}. \quad (2.52)$$

Толщина стенки ББ $\delta = 3$ мм.

Материал: алюминиевый сплав АМг6.

Начальная температура стенки $T_0 = 293$ К.

Температура ЖА $T_x = 77$ К.

Тип теплоизоляции – ЭВТИ.

Материал теплоизоляции – пленка полиэтилентерефтолантная типа ДА.

Число слоев теплоизоляции $n = 20$.

Толщина теплоизоляции $\delta_{из} = 7$ мм.

Масса $1 \text{ м}^2 m_{1\text{м}^2\text{ТИ}} = 0.5$ кг.

Значения теплофизических параметров находим при средней температуре по справочным данным $T_{cp} = 185$ К:

Коэффициент теплопроводности алюминиевого сплава
 $\lambda_{АМг6} = 76 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$

Теплоемкость алюминиевого сплава $c_{АМг6} = 760 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$

Плотность алюминиевого сплава $\rho_{AMz6} = 2640 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Температуропроводность алюминиевого сплава найдем по формуле:

$$a = \frac{\lambda_{AMz6}}{c_{AMz6} \cdot \rho_{AMz6}} = \frac{76}{760 \cdot 2640} = 37.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \quad (2.53)$$

Плотность теплового потока при давлении $P=10^{-1}$ Па: $q = 1.6 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Коэффициент теплопроводности ТИ $\lambda_{ТИ} = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Теплоемкость ТИ $c_{ТИ} = 0.9 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплоотдачи от стенок сосуда к жидкости при пленочном кипении принимаем $\alpha = 400 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Критерий подобия, известный как число Био (Bi), характеризует особенности стационарного теплообмена между средой и объектом, температура которого отличается от окружающей.

При исследовании процессов охлаждения особый интерес представляют ситуации с определенными физическими параметрами: незначительной толщиной объекта (δ), высокой теплопроводностью материала (λ) и низкой интенсивностью поверхностной теплоотдачи (малые значения коэффициента (α)). В таких условиях наблюдается уникальное явление – температура остается однородной по всему сечению объекта, претерпевая изменения исключительно во временном измерении. Подобный режим охлаждения характеризуется крайне малым числом Био, которое на практике не превышает значения 0.1.

В данном случае число Био равно:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta_{AMz-6}}{\lambda_{AMz-6}} = \frac{400 \cdot 0.003}{76} = 0.015. \quad (2.54)$$

Условие $Bi \ll 1$ приближенно выполнено. Можно считать, что температура стенки ББ постоянна по всему ее сечению и изменение

температуры происходит только во времени и, что стенка ББ примет температуру очень близкую к T_x , а именно:

$$\frac{T - T_x}{T_0 - T_x} \approx \frac{1}{1000}. \quad (2.55)$$

Из уравнения (2.55):

$$T = T_x + \frac{T_0 - T_x}{1000} = 77 + \frac{293 - 77}{1000} = 77.21 \text{ K}; \quad (2.56)$$

$$\ln \frac{(T - T_x)}{(T_0 - T_x)} = -Bi \cdot Fo. \quad (2.57)$$

Критерий подобия нестационарных тепловых процессов, именуемый числом Фурье (Fo), отражает динамическое взаимодействие двух ключевых параметров. Этот безразмерный показатель служит индикатором тепловой инерционности системы, при этом его величина определяется двумя фундаментальными характеристиками объекта: его геометрическими параметрами и способностью проводить тепло, выраженной коэффициентом температуропроводности.

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{\delta^2}. \quad (2.58)$$

Время на охлаждение стенки:

$$\tau = \ln \frac{(T_0 - T_x)}{(T - T_x)} \cdot \frac{\delta^2}{\alpha \cdot Bi} = \ln 1000 \cdot \frac{0.003^2}{37.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.015} = 15.8 \text{ с}. \quad (2.59)$$

Найдем количество теплоты, отнятой при полном охлаждении массы стенки ББ и изоляции до стационарного состояния. Площадь поверхности внутренней стенки ББ:

$$F_{вн} = \pi \cdot d_{ББ}^2 = 10.4 \text{ м}^2. \quad (2.60)$$

Объем стенок ББ:

$$V_{ст} = F_{вн} \cdot \delta_{ст} = 10.4 \cdot 0.003 = 0.031 \text{ м}^3. \quad (2.61)$$

Площадь поверхности наружной стенки ББ:

$$F_{нар.ББ} = \pi \cdot (d_{ББ} + 2 \cdot \delta_{ст})^2 = 3.14 \cdot (1.82 + 2 \cdot 0.003)^2 = 10.47 \text{ м}^2. \quad (2.62)$$

Масса ГИ:

$$m_{ми} = m_{1\text{м}^2\text{ГИ}} \cdot F_{нар} = 0.5 \cdot 10.47 = 5.23 \text{ кг}. \quad (2.63)$$

Количество теплоты, отнятой при охлаждении ББ:

$$Q_{ст} = V_{ст} \cdot \rho_{АМг-6} \cdot c_{АМг-6} \cdot (T_0 - T_x) = 0.031 \cdot 2640 \cdot 760 \cdot (293 - 77) = \\ = 13434 \text{ кДж}. \quad (2.64)$$

Количество теплоты, отнятой при охлаждении массы теплоизоляции до ее средней стационарной температуры $T_{cp} = 185 \text{ К}$:

$$Q_{из} = m_{из} \cdot c_{из} \cdot (T_0 - T_{cp}) = 5.23 \cdot 0.9 \cdot (293 - 185) = 508.35 \text{ кДж}. \quad (2.65)$$

Суммарное количество теплоты:

$$Q = Q_{из} + Q_{см} = 13434 + 508 = 13942 \text{ кДж}. \quad (2.66)$$

Количество испарившегося ЖА, необходимого для охлаждения всей массы:

$$M_{ББ} = \frac{Q}{r_{N_2}} = \frac{13942}{199.3} = 70 \text{ кг}, \quad (2.67)$$

где $r_{N_2} = 199.3 \text{ кДж / кг}$ – теплота испарения ЖА.

2.7 Расчет времени прогрева ЖК после заправки в ББ от температуры $T_{ББ} = 80.24 \text{ К}$ до температуры $T_{\text{макс}} = 81 \text{ К}$

Как видно из пункта 1.1 ЖК поступает в ББ с температурой $T_{ББ} = 80.24 \text{ К}$.

Из пункта 1.4 следует, что с целью обеспечения бескавитационной работы МДУ после длительного (более 5 часов) нахождения РБ на переходной орбите, температура ЖК в баке РБ к моменту пуска не должна превышать $T_{\text{макс}} = 81 \text{ К}$.

В разрабатываемом ЗА не предусмотрена операция термостатирования ЖК после его заправки в ББ. После заправки в ББ ЖК будет непрерывно нагреваться вследствие теплопритоков через теплоизоляцию от атмосферы.

Рассчитаем время, за которое ЖК в ББ РБ нагреется до $T_{\text{макс}} = 81 \text{ К}$, т.е. максимальное время, которое может находиться РБ на СП до пуска без нарушения требований по эксплуатации РБ.

Теплофизические параметры кислорода при $T = 80 \text{ К}$:

- плотность $\rho_{O_2} = 1183 \text{ кг / м}^3$;
- масса $m_{O_2} = \rho_{O_2} \cdot V_{O_2} = 1183 \cdot 3 = 3549 \text{ кг}$;
- теплоемкость $C_{O_2} = 1589 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Количество теплоты, которое нужно подвести к ЖК для его прогрева до $T_{\text{макс}} = 81 \text{ К}$:

$$Q_{O_2} = m_{O_2} \cdot C_{O_2} \cdot (T_{\text{макс.}} - T_{\text{ББ}}) = 3549 \cdot 1589 \cdot (81 - 80.24) = 4286 \text{ кДж.} \quad (2.68)$$

Теплоприток через теплоизоляцию ББ к ЖК:

$$Q_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}}}{\delta_{\text{из}}} \cdot F_{\text{ср}} \cdot (T_0 - T_x), \quad (2.69)$$

где $T_0 = 293 \text{ К}$ – температура внешней поверхности изоляции;

$T_x = 80.24 \text{ К}$ – температура стенки ББ.

Средняя эффективная площадь теплоизоляции:

$$F_{\text{ср}} = \sqrt{F_{\text{нар.ББ}} \cdot F_{\text{нар.ТИ}}} \quad (2.70)$$

Площадь поверхности внутренней стенки ББ:

$$F_{\text{нар.ББ}} = \pi \cdot (d_{\text{ББ}} + 2 \cdot \delta_{\text{ст}})^2 = 3.14 \cdot (1.82 + 2 \cdot 0.003)^2 = 10.47 \text{ м}^2. \quad (2.71)$$

Коэффициент теплопроводности ТИ $\lambda_{\text{ТИ}} = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / (\text{К} \cdot \text{м})$.

Толщина изоляции $\delta_{\text{из}} = 7 \text{ мм}$.

Площадь поверхности внутренней стенки ТИ:

$$F_{\text{нар.ТИ}} = \pi \cdot (d_{\text{ББ}} + 2 \cdot \delta_{\text{ст}} + 2 \cdot \delta_{\text{ТИ}})^2 = 3.14 \cdot (1.82 + 2 \cdot 0.003 + 2 \cdot 0.007)^2 = 10.63 \text{ м}^2. \quad (2.72)$$

$$F_{\text{ср}} = \sqrt{10.47 \cdot 10.63} = 10.55 \text{ м}^2.$$

$$Q_{из} = \frac{0.2 \cdot 10^{-3}}{0.007} \cdot 10.55 \cdot (293 - 80.24) = 64.1 \text{ Вт.}$$

Тепло, подводимое к ЖК через ТИ за время τ , расходуется на прогрев ЖК до $T_{\text{макс}}$:

$$Q_{из} \cdot \tau = Q_{O_2}. \quad (2.73)$$

Время прогрева ЖК от $T_{\text{ББ}}$ до $T_{\text{макс}}$:

$$\tau = \frac{Q_{O_2}}{Q_{из}} = \frac{4286 \cdot 10^3}{64.1} = 66833 \text{ с} = 18.5 \text{ ч.} \quad (2.74)$$

2.8 Конструктивный и тепловой расчеты теплоизоляции ТО

Для уменьшения потерь ЖА в ТО за счет испарения необходимо применить теплоизоляцию. Принципиально ТИ бывает двух видов: изоляция, находящаяся под атмосферным давлением, и вакуумная изоляция. Проведем анализ этих двух видов теплоизоляции.

Для сравнения в качестве вакуумного типа изоляции выберем вакуумнопорошковую теплоизоляцию, а именно, перлит под вакуумом $p = 1 \text{ Па}$. В качестве газонаполненного типа изоляции – вспененный синтетический каучук «Armaflex». Толщину слоя изоляции в обоих случаях примем одинаковой и равной $\delta_{из} = 0.15 \text{ м}$.

2.8.1 Конструктивное обеспечение вакуумной теплоизоляции

Для обеспечения вакуума необходимо отвакуумировать полость между внутренним и наружными корпусами ТО. Для этого на наружном кожухе введен клапан вакуумирования. А в месте соединения корпусов необходимо установить уплотнение, обеспечивающее необходимый вакуум. В данной работе использовано вакуумное уплотнение с помощью двух тонких металлических колец, сваренных по краям. Для осевой центровки фланцев и для восприятия осевых нагрузок на одном из фланцев делаю выступы,

входящие в проточку другого фланца. Выступы должны также обеспечивать расстояние между фланцами, необходимое для расположения колец. Вскрыть такое уплотнение можно напильником, причем для прорезки шва требуется всего лишь от 3 до 4 движений напильника. Движение напильника должно быть направлено вдоль шва, а не поперек его

2.8.2 Конструктивное обеспечение газонаполненной теплоизоляции

Главные свойства, которые определили широкое применение вспененного синтетического каучука «Armaflex», – это низкая теплопроводность при очень высоком сопротивлении проникновению влаги, что делает ненужным установку парового барьера. Учитывая этот факт, нет необходимости устанавливать уплотнение между внутренним и наружным корпусом ТУ, что упрощает конструкцию.

Таблица 2.5 – Основные характеристики теплоизоляции «Armaflex»

Наименование показателя	Типы изоляции		
	AF	AC	NT
Объёмная плотность, кг/м ³ :			
– пластины	От 40 до 60	От 40 до 60	От 40 до 60
– трубки	От 50 до 70	От 50 до 70	От 50 до 70
Температуры применения, °С:			
– минимальная	Минус 50 (минус 200)	Минус 50	Минус 50 (минус 200)
– максимальная	105	105	105
рпмснгеагнквегк	Теплопроводность, Вт/м·К, не более		
Минус 180 °С	0,013		
Минус 150 °С	0,017		
Минус 100 °С	0,022		
Минус 60 °С	0,03		
Минус 40 °С	0,032	0,034	
Минус 20 °С	0,034	0,036	
0 °С	0,036	0,038	0,04
10 °С	0,037	0,039	0,041
20 °С	0,038	0,04	0,043
40 °С	0,04		0,045
Паропроницаемость, мг/м·ч·Па, не более	0,000101	0,000235	0,000353
Водопоглощение в течение 24 ч,			
не более	0,2	0,7	0,7

Условная прочность при растяжении не менее, МПа	0,07	0,07	0,07
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	150	150	150
Сопротивление сжатию при 50 % деформации не менее, кПа	1	1	1
Сжимаемость (упругость) под удельной нагрузкой (2000±30) Па не менее, %	15(80)	15(80)	15(80)

2.8.3 Тепловой расчет теплоизоляции

Температура окружающей среды (температура внешней поверхности ТИ)

$$T_0 = 293 \text{ K.}$$

Температура стенки ТО $T_x = 77 \text{ K.}$

Толщина $\delta_{из} = 0.15 \text{ м.}$

Площадь поверхности наружной стенки ТО:

$$F_{ТОнар} = 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст}) \cdot (H + h_1 + h_2) + 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст})^2 = 2 \cdot 3.14 \times \\ \times (0.7 + 0.003) \cdot (1.8 + 0.2 + 0.4) + 2 \cdot 3.14 \cdot (0.7 + 0.003)^2 = 13.7 \text{ м}^2. \quad (2.75)$$

Площадь поверхности изоляции:

$$F_{ТОиз} = 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст} + \delta_{из}) \cdot (H + h_1 + h_2) + 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст} + \delta_{из})^2 = \\ = 2 \cdot 3.14 \cdot (0.7 + 0.003 + 0.15) \cdot (1.8 + 0.2 + 0.4) + 2 \cdot 3.14 \cdot (0.7 + 0.003 + 0.15)^2 = \\ = 15.14 \text{ м}^2. \quad (2.76)$$

Средняя эффективная площадь поверхности:

$$F_{ср} = \sqrt{F_{ТОиз} + F_{ТОнар}} = \sqrt{13.7 \cdot 15.14} = 14.4 \text{ м}^2. \quad (2.77)$$

2.8.3.1 Тепловой расчет вакуумной изоляции

Материал теплоизоляции: перлит под вакуумом $p = 1 \text{ Па}$.

Плотность перлита $\rho_{\text{вак.ТИ}} = 120 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Коэффициент теплопроводности перлита при средней температуре

$$\lambda_{\text{вак.ТИ}} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}.$$

Теплоприток через изоляцию:

$$Q_{\text{вак.ТИ}} = \frac{\lambda_{\text{вак.ТИ}}}{\delta_{\text{из}}} \cdot F_{\text{ср}} \cdot (T_0 - T_x) = \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{0.15} \cdot 14.4 \cdot (293 - 77) = 31.1 \text{ Вт}. \quad (2.78)$$

Количество теплоты, подведенное к ЖА за время переохлаждения $\tau = 10$ часов:

$$Q_{\text{вак.ТИ}}(\tau) = Q_{\text{вак.ТИ}} \cdot \tau = 31.1 \cdot 3600 \cdot 10 = 1119.7 \text{ кДж}. \quad (2.79)$$

Количество азота, испарившегося за счет теплопритоков извне:

$$M_{\text{вак.ТИ}} = \frac{Q_{\text{вак.ТИ}}}{r_{N_2}} = \frac{1119.7}{199.3} = 5.61 \text{ кг}. \quad (2.80)$$

2.8.3.2 Тепловой расчет газонаполненной изоляции

Материал теплоизоляции: вспененный синтетический каучук «Armaflex».

Плотность теплоизоляции: $\rho_{\text{г.н.ТИ}} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Коэффициент теплопроводности при средней температуре:

$$\lambda_{\text{г.н.ТИ}} = 22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Теплоприток через изоляцию:

$$Q_{г.н.ТИ} = \frac{\lambda_{г.н.ТИ}}{\delta_{из}} \cdot F_{ср} \cdot (T_0 - T_x) = \frac{22 \cdot 10^{-3}}{0.15} \cdot 14.4 \cdot (293 - 77) = 456.2 \text{ Вт.} \quad (2.81)$$

Количество теплоты, подведенное к ЖА за время переохлаждения $\tau = 10$ часов:

$$Q_{г.н.ТИ}(\tau) = Q_{г.н.ТИ} \cdot \tau = 456.2 \cdot 3600 \cdot 10 = 16423 \text{ кДж.} \quad (2.82)$$

Количество азота, испарившегося за счет теплопритоков извне:

$$M_{г.н.ТИ} = \frac{Q_{г.н.ТИ}}{r_{N_2}} = \frac{16423}{199.3} = 82.4 \text{ кг.} \quad (2.83)$$

2.8.4 Выводы

Как видно из анализа потери по ЖА при применении газонаполненной ТИ составляют 82.4 кг, что сопоставимо с потерями на захолаживание магистрали (81.56 кг) и ББ (70 кг). И, хотя, преимущества от применения в качестве ТИ перлита под вакуумом по потере ЖА очевидны (5.61 кг), в данном случае ее применять нецелесообразно, т.к. это усложнит конструкцию: необходимость герметизировать полость между наружным и внутренним корпусами ТО с помощью спаянных колец, применять вакуумный насос для вакуумирования полости.

2.9 Конструкция теплообменника

ТО состоит из емкости, змеевика, опорного кольца змеевика, корпуса, теплоизоляции, крышки, наполнительного патрубка, дренажного патрубка, индикатора уровня. Змеевик, сваренный в крышку, опускается в емкость и опирается на опорное кольцо, которое препятствует его радиального и осевому перемещению в процессе транспортировки. В крышку также сварены индикатор уровня, наполнительный и дренажный патрубки. Корпус, крышка и емкость скрепляются с помощью болтов. Между крышкой и емкостью

установлены фторопластовое и резиновые уплотнения, которые обеспечивают герметичность емкости и сводят к минимуму теплопритоки сквозь зазор между крышкой и емкостью. Между корпусом и емкостью установлена газонаполненная ТИ «Armaflex», которая уменьшает теплоприток из атмосферы к емкости ТО. Перед процессом переохлаждения ЖК емкость заполняется ЖА, давление в ней поддерживается на уровне атмосферного. Через змеевик с помощью насоса перекачивается ЖК по кольцу через ТО и возвращается в емкость ЖК. Процесс происходит до тех пор, пока ЖК не переохладится до нужной температуры. Конструкция и габариты ТО изображены на рисунке 2.4.

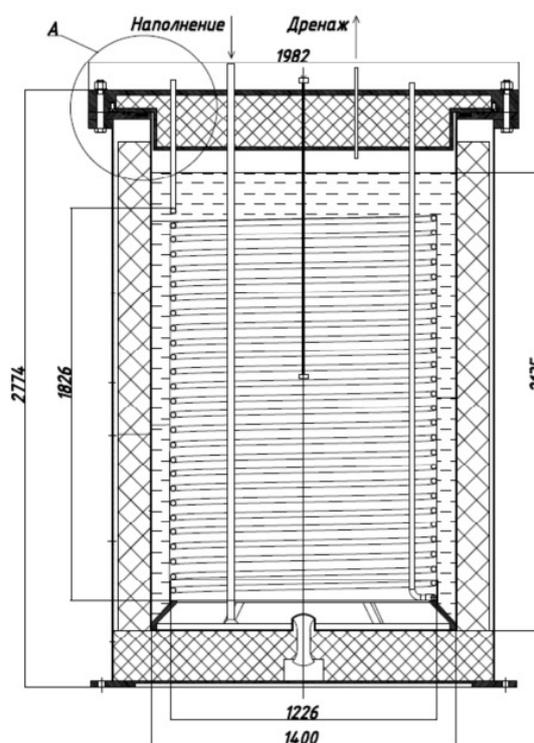


Рисунок 2.4 – Конструкция ТО

2.10 Определение количества ЖА, необходимого на захолаживание емкости ТО и змеевика

ТО состоит из емкости, змеевика и крышки.

Материал – сталь 12Х18Н10Т.

Начальная температура стенки $T_0 = 293 \text{ K}$.

Температура ЖА $T_x = 77 \text{ K}$.

Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{ст} = 12.1 \frac{Вт}{м \cdot К}$.

Теплоемкость стали $c_{ст} = 315 \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

Плотность стали $\rho_{ст} = 8150 \frac{кг}{м^3}$.

Температуропроводность стали:

$$a = \frac{\lambda_{ст}}{c_{ст} \cdot \rho} = \frac{12.1}{315 \cdot 8150} = 4.7 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}. \quad (2.84)$$

Площадь внутренней поверхности емкости:

$$\begin{aligned} F_{ТОнар} &= 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст}) \cdot (H + h_1 + h_2) + 2 \cdot \pi \cdot (R_{емк} + \delta_{ст})^2 = \\ &= 2 \cdot 3.14 \cdot (0.7 + 0.003) \cdot (1.8 + 0.2 + 0.4) + 2 \cdot 3.14 \cdot (0.7 + 0.003)^2 = 13.7 \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (2.85)$$

Количество теплоты, отнятой при охлаждении емкости ТО:

$$\begin{aligned} Q_{ст} &= V_{ст} \cdot \rho_{ст} \cdot c_{ст} \cdot (T_0 - T_x) = 0.04 \cdot 8150 \cdot 315 \cdot (293 - 77) = \\ &= 22181 \text{ кДж}. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Площадь внешней поверхности змеевика:

$$F_{нар.зм} = \pi \cdot d_{нар.зм} \cdot L = 3.14 \cdot 0.025 \cdot 98 = 7.69 \text{ м}^2. \quad (2.87)$$

Объем стенок змеевика:

$$V_{зм} = F_{нар.зм} \cdot \delta_{ст.зм} = 7.69 \cdot 0.004 = 0.03 \text{ м}^3. \quad (2.88)$$

Количество теплоты, отнятой при охлаждении змеевика:

$$Q_{зм} = V_{зм} \cdot \rho_{ст} \cdot c_{ст} \cdot (T_0 - T_x) = 0.03 \cdot 8150 \cdot 315 \cdot (293 - 77) =$$

$$= 16635 \text{ кДж}. \quad (2.89)$$

Материал теплоизоляции: вспененный синтетический каучук «Armaflex».

Толщина $\delta_{из} = 0.15 \text{ м}$.

Объем слоя изоляции:

$$V_{из} = F_{ТОнар} \cdot \delta_{из} = 13.7 \cdot 0.15 = 2.055 \text{ м}^3. \quad (2.90)$$

Плотность теплоизоляции $\rho_{г.н.ТИ} = 50 \text{ кг / м}^3$.

Теплофизические параметры при средней температуре:

– коэффициент теплопроводности $\lambda_{г.н.ТИ} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$;

– теплоемкость $c_{г.н.ТИ} = 0.84 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$.

Количество теплоты, отнятой при охлаждении массы теплоизоляции до ее средней стационарной температуры:

$$Q_{из} = V_{из} \cdot \rho_{г.н.ТИ} \cdot c_{г.н.ТИ} \cdot (T_0 - T_{ср}) = 2.055 \cdot 50 \cdot 0.84 \cdot (293 - 185) =$$

$$= 11097 \text{ кДж}. \quad (2.91)$$

Суммарное количество теплоты:

$$Q_{ТО} = Q_{ст} + Q_{зм} + Q_{из} = 22181 + 16635 + 11097 = 49913 \text{ кДж}; \quad (2.92)$$

$$M_{ТО} = \frac{Q_{ТО}}{r_{N_2}} = \frac{49913}{199.3} = 250.4 \text{ кг}. \quad (2.93)$$

2.11 Определение необходимого давления для заполнения емкости ТО жидким азотом

Зададимся временем на наполнение емкости $t_{\text{зап.}} = 20$ мин.

Тогда массовый расход азота на наполнение емкости ТО:

$$\dot{G}_{\text{нап.ТО}} = \frac{M_1}{t_{\text{зап.}}} = \frac{2651 \cdot 60}{20} = 7953 \text{ кг/ч.} \quad (2.94)$$

Диаметр трубопровода наполнения примем $d_{\text{нап.ТО}} = 0.032$ м.

Скорость движения ЖА по трубопроводу:

$$W_{\text{нап.ТО}} = \frac{4 \cdot \dot{G}_{\text{нап.ТО}}}{\pi \cdot d_{\text{нап.ТО}}^2 \cdot \rho} = \frac{4 \cdot 7953}{3.14 \cdot 0.032^2 \cdot 808 \cdot 3600} = 3.4 \text{ м/с.} \quad (2.95)$$

Давление наддува емкости с ЖА, необходимое для наполнения емкости ТО:

$$p_{\text{нап.ТО}} = p_{\text{емк.}N_2} + \left(\xi_{\Sigma} + \frac{\lambda_{\text{тр.}} \cdot l}{d_{\text{нап.ТО}}} \right) \cdot \rho \cdot \frac{W_{\text{нап.ТО}}^2}{2} = 0.1 + \left(19 + \frac{0.02 \cdot 3}{0.032} \right) \cdot \frac{808 \cdot 3.4^2}{2} \\ = 0.197 \text{ МПа.} \quad (2.96)$$

2.12 Определение необходимого давления в емкости с ЖК для бескавитационной работы насоса

Допускаемый кавитационный запас (ДКЗ) насоса – разница между давлением на впуске и минимальным уровнем давления внутри насоса. Требуемое значение ДКЗ показывает минимальное давление на входе в насос, необходимое для предотвращения кавитации в конкретном насосе при конкретном уровне расхода.

Допускаемый кавитационный запас насосов НкпМ от 2 до 3 метров столба жидкости.

1 метра водного столба = 9806.65 Па.

Примем ДКЗ выбранного насоса:

$$ДКЗ = 2.5 \text{ м. вод. ст.} = 24516.6 \text{ Па} = 0.0245 \text{ МПа.}$$

Таким образом необходимое давление в емкости с ЖК для безкавитационной работы насоса:

$$p_{емкO_2} = p_{атм.} + ДКЗ = 0.1 + 0.0245 = 0.124 \text{ МПа.} \quad (2.97)$$

2.13 Подбор цистерн для ЖК и ЖА

2.13.1 Подбор цистерны для ЖК

Объем ЖК, необходимый для заправки в ББ:

$$V_{ББО_2} = \frac{m_{O_2}}{\rho_{O_2}} = \frac{3448.9}{1148} = 3 \text{ м}^3. \quad (2.98)$$

Выберем цистерну типа ЦТК-5/0,25.



Рисунок 2.5 – Цистерна типа ЦТК-5/0,25

Таблица 2.6 – Технические характеристики цистерны ЦТК-5/0,25

Технические характеристики цистерн типа ЦТК-5/0,25	
Объем, м ³	5
Количество заливаемого продукта, кг	
– азота	4200

Продолжение таблицы 2.6

– аргона	6000
– кислорода	6000
Потери от испарения (при 20 с), кг/ч	1.5
– азота	2.05
– аргона	1.35
– кислорода	1.5
Рекомендуемый тип автомобиля для транспортировки цистерн	Камаз
Габаритные размеры, мм	
Длина	3910
Ширина	2000
Высота	1995
Масса, кг	2500

Конструктивное исполнение данной цистерны представляет собой двухслойную систему, где основной резервуар помещен внутрь защитного кожуха. Все функциональные элементы – от трубопроводной системы до контрольно – измерительных приборов и защитных механизмов – сконцентрированы в едином арматурном шкафу с пультом управления.

В нижнем сегменте конструкции размещен испарительный элемент, обеспечивающий поддержание необходимого эксплуатационного давления внутри емкости. Теплоизоляционные свойства достигаются применением вакуумно-порошковой технологии.

Универсальность транспортировки является одним из ключевых преимуществ данной цистерны – она адаптирована как для железнодорожных перевозок, так и для автомобильного транспорта, включая возможность стационарного монтажа на грузовые автомобильные шасси.

2.13.2 Подбор цистерны для ЖА

Общее количество ЖА, необходимое для проведения всех операций:

$$M_{\text{общ.}N_2} = M_1 + M_2 + M_3 + M_{\text{ББ}} + M_{\text{э.н.ТИ}} + M_{\text{ТО}}. \quad (2.99)$$

Масса ЖА в емкости, необходимая для погруженного состояния змеевика (расчет из п. 2.2.1): $M_1 = 2651.7$ кг.

Масса ЖА, необходимая для захолаживания трубопровода (расчет из п. 2.5): $M_2 = 81.5$ кг.

Масса ЖА, испарившегося за счет теплопритоков от ЖК в процессе его переохлаждения (расчет из п. 2.2.6):

$$M_3 = \frac{Q}{r_{N_2}} = \frac{6.45 \cdot 10^4}{199.3} = 323.6 \text{ кг}. \quad (2.100)$$

Масса ЖА, необходимая для захолаживания ББ (расчет из п. 2.6): $M_{\text{ББ}} = 70$ кг.

Масса ЖА, испарившегося за счет теплопритоков через ТИ за время переохлаждения ЖК (расчет из п. 2.8.3.2): $M_{\text{э.н.ТИ}} = 82.4$ кг.

Масса ЖА, необходимая на захолаживание емкости ТО и змеевика (расчет из п. 2.9): $M_{\text{ТО}} = 250.4$ кг.

В итоге получаем:

$$M_{\text{общ.}N_2} = 2651.7 + 81.5 + 323.6 + 70 + 82.4 + 250.4 = 3460 \text{ кг}.$$

Из расчета следует, что для ЖА можно выбрать цистерну, как и для ЖК, типа ЦТК-5/0,25.

3.14 Подбор железнодорожной платформы для ЗА

В соответствии с ГОСТ 9238-83 классификация габаритных норм подвижного состава включает несколько типов: Т, 1-Т, 0-Т, 01-Т и 03-Т. При этом их применение регламентируется географией эксплуатации.

Подходящими являются габаритные стандарты Т и 1-Т, использовавшиеся для железнодорожных составов СССР и использующиеся в России и странах СНГ с шириной колеи 1520 (1524) мм.

Разместим оборудование ЗА на стандартной железнодорожной платформе с длиной 14194 мм, шириной 2870 мм и шириной колеи 1520 мм.

2.15 Расчет элемента криогенной арматуры

Практически все операции, выполняемые разрабатываемым ЗА, проходят в автоматическом режиме, для автоматизации операций применяются пневмоклапаны. Типовая конструкция криогенного пневмоклапана будет рассмотрена ниже.

2.15.1 Описание и конструкция криогенного пневмоклапана

На рисунке 2.6 приведена конструкция криогенного клапана с пневмоприводом – основного типа арматуры криогенных систем.

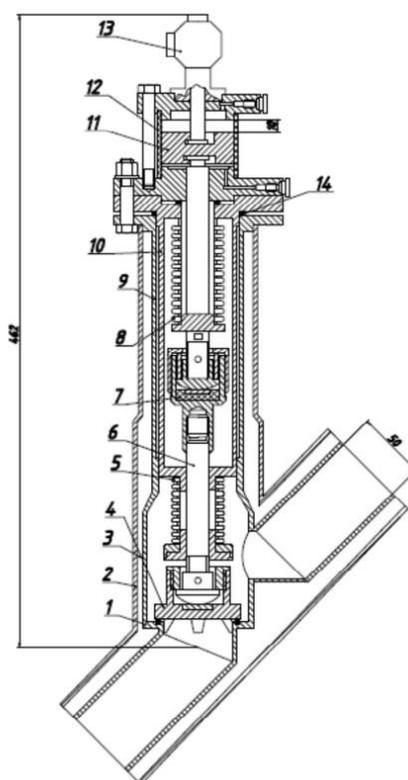


Рисунок 2.6 – Типовая конструкция криогенного пневмоклапана: 1 – корпус; 2 – кожух; 3 – изоляционное пространство; 4 – тарель клапана; 5 – сиффон; 6 – шток; 7 – стеклопластиковая проставка; 8 – сиффон; 9 – тепловой мост корпуса корпуса; 10 – тепловой мост шпindelной группы; 11 – поршень пневмоцилиндра; 12 – пневмоцилиндр; 13 – сигнальное устройство положения клапана.

Основные элементы клапана: корпус 1, кожух 2, шток 6 выполнены из стали 12X18H10T, а уплотнитель – из поликарбоната. Корпус 1 клапана с помощью жесткого фланцевого соединения в тепловой зоне и стеклотекстолитовых опор закреплен внутри кожуха. На внешней стороне корпуса нанесено 20 слоев полихлорвиниловой пленки с прокладками из стекловуали. Концами труб корпуса и кожуха клапан стыкуется с внутренней трубой и кожухом смежных секций трубопроводов. Конструкция опор корпуса и фланцевого соединения обеспечивает жесткое закрепление корпуса внутри кожуха и передает усилия от внутренней трубы криогенного трубопровода на кожух. Для отвода шпindelной группы в зону с более высокой температурой используется специальная конструкция разъемного теплового моста. Он представляет собой систему из двух коаксиальных элементов: теплового моста корпуса и теплового моста шпindelной группы, установленных с минимальным зазором относительно друг друга. Важным эксплуатационным требованием является правильное позиционирование клапана – угол наклона штока должен составлять не менее 45 градусов относительно горизонтальной плоскости. Такое расположение необходимо для предотвращения попадания жидкости в полость теплового моста, что может нарушить его функционирование. Благодаря увеличенной длине штока и теплового моста снижается теплоприток из теплой зоны к криогенному продукту. Кроме того в целях уменьшения теплового потока шток выполнен разъемным с проставкой 7 из стеклопластика. Движение штока клапана относительно седла и посадка клапана на седло с необходимым для обеспечения герметичности затвора усилием осуществляются за счет жесткой связи с поршнем 11 пневмоцилиндра 12. Движение поршня 11 в нужном направлении, то есть открытие или закрытие клапана, происходит посредством передачи управляющего газа (азота или воздуха) с рабочим давлением $p = 4.7$ МПа в соответствующую полость цилиндра пневмопривода и стравливания газа из полости по другую сторону поршня. Подача и дренаж управляющего газа производится через электроуправляемый клапан типа ПЭК-ДД. Для регулирования скорости

срабатывания пневмоклапанов применяется пневматическое демпфирование с помощью обратных клапанов и дроссельных шайб, установленных на штуцерах подвода и отвода управляющего газа. Уплотнение по штоку осуществляется двумя последовательно расположенными многослойными сильфонами 5, 8. Пневмоклапан снабжен электрическим сигнализатором 13, показывающим положение запорного органа «открыт» или «закрыт». Диаметр проходного сечения фланца: $D_y = 0.05 \text{ м} = 5 \text{ см}$.

Давление со стороны КТ: $P_{\text{раб.}} = 2 \text{ кг/см}^2 = 2 \text{ атм}$.

Компонент топлива: Жидкий кислород / жидкий азот.

2.15.2 Расчет основных параметров пневмоклапана

2.15.2.1 Определение хода штока

Из условия, что:

$$\frac{\pi \cdot D_y^2}{4} = \pi \cdot D_c \cdot h. \quad (2.101)$$

Выберем $D_c = 0.06 \text{ м}$, следовательно:

$$h = \frac{\pi \cdot D_y^2}{4 \cdot \pi \cdot D_c} = \frac{0.05}{4 \cdot 0.06} = 0.001 \text{ м} = 1 \text{ см}. \quad (2.102)$$

2.15.2.2 Подбор сильфонов

Представлены технические характеристики сильфона (1), предназначенного для уплотнения штока в зоне контакта с криогенным компонентом. Сильфон изготовлен из нержавеющей стали марки X18H10T и имеет однослойную конструкцию с внутренними посадочными поверхностями.

Внешний диаметр: $D_{\text{в}} = 38 \text{ мм}$;

Внутренний диаметр: $D_{\text{вн}} = 25.5 \text{ мм}$;

Шаг гофры: $t = 4.5 \text{ мм}$;

Число гофр: $n = 10$;

Толщина стенки: $b = 0.35$ мм;

Общая длина: $l = 52$ мм;

Эффективная площадь: $S = 7.94$ см²;

Жесткость: C_o от 6 до 9 кг/мм;

Допустимое давление: $P = 20$ кг/см²;

Допустимый ход $L_d = 10.7$ мм.

Данные характеристики соответствуют стандартам отечественного производства сильфонов и обеспечивают необходимые условия для надежного уплотнения в криогенной среде.

Сильфон 2, уплотняющий шток в полостях с управляющим газом – азотом. Сильфон 1, уплотняющий шток в полости с криогенным компонентом. Согласно данным сильфонов отечественного производства из стали марки Х18Н10Т, многослойных резьбовыми втулками из книги Д.Ф. Гуревича:

– внешний диаметр: $D_e = 38$ мм;

– внутренний диаметр: $D_{вн} = 24$ мм;

– шаг гофры: $t = 5.5$ мм;

– число гофров: $n = 13$;

– толщина каждого слоя: $E = 0.2$ мм;

– число слоев: $z = 6$;

– длина гофрированной части: $l = 72$ мм;

– жесткость: $C_o = (10 \pm 5)$ кг/мм;

– допустимое наружное давление: $P = 225$ кг/см²;

– допустимый ход $L_d = 10$ мм.

2.15.2.3 Проверка герметичности седла

1. Расчет необходимого усилия для обеспечения герметичности.

Удельное давление необходимое для обеспечения герметичности:

$$q_y = \frac{4 + 0.6 \cdot P_{раб.}}{\sqrt{b}} = \frac{4 + 0.6 \cdot 2}{\sqrt{0.3}} = 9.5 \text{ кг} / \text{м}^3, \quad (2.103)$$

где $P_{раб.}$ – рабочее давление;

b – толщина пятна контакта уплотнения.

$$Q_y = q_y \cdot \pi \cdot D_k \cdot b = 9.5 \cdot 3.14 \cdot 5.6 \cdot 0.3 = 50.14 \text{ кг}, \quad (2.104)$$

где $D_k = 5.6$ см – диаметр пятна контакта.

2. Усилие от давления среды:

$$F_{ср.} = 0.785 \cdot D_k^2 \cdot P_{раб.} = 0.785 \cdot 5.6^2 \cdot 2 = 49.23 \text{ кг}. \quad (2.105)$$

3. Минимальное усилие, необходимое для уплотнения седла:

$$F_{мин.} = F_{ср.} + Q_y = 49.23 + 50.14 = 99.37 \text{ кг}. \quad (2.106)$$

4. Усилие, создаваемое управляющим давлением $P_{упр} = 47 \text{ кг} / \text{см}^2$:

$$F_{упр} = P_{упр} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{корп}^2 - D_{штока}^2) = 47 \cdot \frac{3.14}{4} \cdot (6^2 - 1.6^2) = 1234.4 \text{ кг}; \quad (2.107)$$

Если выполняется условие $F_{упр.} > F_{мин.}$, следовательно обеспечивается герметичность седла.

3 СХЕМА ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ЕЕ РАБОТЕ

3.1 Состав системы

Комплексная система заправки жидким кислородом включает несколько ключевых компонентов. В основе системы – криогенные цистерны для хранения жидкого азота и кислорода, соединенные сетью специализированных магистральных трубопроводов. Конструктивно охлаждающий модуль объединяет в единое целое теплообменное устройство и насосный агрегат, дополненные необходимой запорно-регулирующей арматурой и системой трубопроводов.

В состав функционального комплекса также входят вспомогательные компоненты, среди которых присутствуют системы фильтрации и элементы стыковки с РБ. Отдельного внимания заслуживает специализированное оснащение, размещенное в зоне дренажной инфраструктуры. В состав системы входит интегрированный комплекс для подачи различных газов – технологических, регламентных и управляющих, укомплектованный необходимой арматурой и системами фильтрации.

Мониторинг рабочих параметров реализуется через разветвленную сеть измерительных устройств, которые непрерывно отслеживают три ключевых показателя:

- давление;
- уровень;
- температуру.

Особый акцент делается на газоаналитическом контроле, который обеспечивает мониторинг чистоты как бака разгонного блока, так и всего системного оборудования с помощью специализированных газоанализаторов. Вся система функционирует под управлением дистанционной системы контроля, обеспечивающей безопасность операций.

Инженерное решение включает разнообразную запорно-регулирующую арматуру. Для обеспечения герметичного разграничения трубопроводных сегментов применяются клапанные механизмы различного назначения – от запорных до обратных. Жесткая изоляция резервуаров и отдельных участков системы осуществляется посредством вентильных и дроссельных устройств, в то время как управление потоками в магистралях большого сечения реализуется через задвижки.

Пневмогидравлическая конфигурация оборудована современным измерительно-контрольным комплексом с функцией удаленного управления, включающим измерители давления, температурные датчики и устройства учета расхода. Система дополнительно оснащена аппаратурой контроля качественных показателей, в частности, дистанционно управляемыми хроматографическими анализаторами.

3.2 Назначение и операции, выполняемые разрабатываемым ЗА

3.2.1 Назначение разрабатываемого ЗА

Разрабатываемый ЗА предназначен для приема топливного компонента (ЖК) и хладагента (ЖА) из емкости – хранилища, транспортирование топливного компонента на СП, переохлаждение его в ТО, заполненном ХА, выдачи топливного компонента в ББ РБ.

Разрабатываемый ЗА будет выполнен на железнодорожной платформе и транспортироваться на СП по железнодорожным путям. На СП будет осуществляться переохлаждение ЖК в ТО, заполненным ЖА кипящим при атмосферном давлении, с помощью насоса и заправка ЖК в ББ РБ-аналога «Бриз-КМ».

3.2.2 Технологические операции, выполняемые ЗА

Агрегат выполняет следующие технологические операции:

1. Основные технологические операции:

- заполнение и слив из цистерны ЗА топливного компонента;
- заполнение и слив из цистерны ЗА хладагента;
- заполнение цистерн агрегата КТ и хладагентом;

- переохлаждение ЖК в ТО;
- выдача ЖК из цистерны агрегата с большим и малым расходами;
- слив жидкого ЖК из ББ, при аварийной ситуации.

2. Дополнительные (вспомогательные) операции:

- отбор пробы;
- наддув цистерн;
- захолаживание ТО, магистралей и ББ РБ;
- поддержание давления в емкости топливного компонента, хладагента и

ТО на нужном уровне;

- заполнение цистерны топливного компонента посторонним насосом;
- заполнение цистерны ХА посторонним насосом;
- удаление остатков продукта из рукава выпариванием.

3.3 Пневмогидравлическая схема

Техническая документация системы подачи жидкого кислорода включает детальную пневмогидравлическую схему, которая выступает в роли всеобъемлющего графического описания конструкции. Данный чертеж можно рассматривать как подробный путеводитель по системе, наглядно иллюстрирующий принципы взаимодействия между всеми составляющими заправочного оборудования.

Документация содержит исчерпывающее описание всех ключевых элементов системы:

1. Инфраструктура хранения и транспортировки:

- хранилища компонентов с сопутствующими системами обвязки;
- транспортные маршруты для подачи криогенных жидкостей;
- технологии доставки компонентов к бакам потребителя.

2. Технологические системы:

- оборудование для охлаждения компонентов топлива;
- разнофункциональные комплексы арматуры;
- дренажные системы и защитное оборудование.

3. Системы контроля и управления:

- контрольно-измерительная аппаратура;
- пневматические системы управления;
- электрические системы управления.

Вся техническая документация разрабатывается в полном соответствии с техническим заданием и спецификациями, предоставленными разработчиком разгонного блока. Это обеспечивает точное соответствие заправочной системы всем функциональным требованиям и эксплуатационным параметрам.

3.4 Последовательность операций, выполняемых ЗА на СК

1. ЗА подъезжает по железнодорожным путям на СК заранее до пуска РН;
2. Открывается клапан К1 и ЖА попадает в испарители И1 и И2, где он испаряется. Пары азота направляются в азотную емкость и повышают в ней давление до необходимого для наполнения ТО с заданным расходом. По сигналу с реле давления Р1, сигнализирующем о достижении заданного давления, закрывается клапан К1. В азотной емкости давление должно поддерживаться на уровне, необходимом для заполнения ТО с заданным расходом. При повышении давления выше заданного на определенную величину реле давления Р1 подает сигнал на кратковременное открытие клапана К2 и на закрытие К2 при достижении необходимого давления. При понижении давления ниже заданного на определенную величину Р1 подает сигнал на открытие К1 и закрывает его при достижении необходимого давления;
3. Производится захолаживание змеевика и емкости ТО открытием клапана малого расхода К3 и клапана К5, ЖА поступает в емкость ТО малым расходом через К3;
4. Открывается клапан большого расхода К4 и происходит наполнение емкости ТО с большим расходом до заданного уровня, контролируемого индикатором уровня ИУ1, после чего клапаны К1 и К3 и К4 закрываются;
5. В процессе переохлаждения кислорода из ТО выкипает азот вследствие теплопритоков от кислорода, движущегося в змеевике, и теплопритоков через стенки емкости ТО от внешней атмосферы. Открывается клапан К2, пары азота

сбрасываются до давления, необходимого для подпитки емкости ТО. При понижении уровня ЖА в ТО относительно заданного на определенную величину по сигналу ИУ1 открывается клапан малого расхода К3 и клапан К5. По достижении в емкости ТО необходимого уровня ЖА клапаны К3 и К5 закрываются;

6. Открываются клапаны К6 и К12, ЖК попадает в испарители И3 и И4, где он испаряется. Пары кислорода направляются в кислородную емкость и повышают в ней давление до необходимого для бескавитационной работы насоса, при достижении необходимого давления Р3 подает сигнал на закрытие клапанов К6 и К12. То же действие производится и при понижении давления, необходимого для бескавитационной работы насоса. При повышении давления выше заданного на определенную величину реле давления Р2 подает сигнал на кратковременное открытие клапана К7, после выравнивания давления клапан К7 закрывается;

7. Открывается клапан К8 для заполнения насоса Н1 и захолаживания магистрали до клапана К9;

8. Открывается клапан К9 и включается насос Н1;

9. Кислород переохлаждается в ТО, циркулируя по кольцу: емкость с кислородом – ТО до температуры $T = 80 \text{ K}$;

10. По мере испарения азота его уровень в ТО уменьшается и доходит до минимально-необходимого для погруженного состояния змеевика. По достижении этого уровня ИУ1 подает сигнал на открытие клапана малого расхода К3 и клапана К5, уровень азота восполняется в емкости ТО до необходимого малым расходом, после чего клапаны К3 и К5 закрываются;

11. При достижении в процессе переохлаждения кислородом заданной температуры, датчик УТ1 подает сигнал на отключения насоса Н1 и закрытие клапанов К8 и К9;

12. Производится подключение заправочных коммуникаций к РБ;

13. Открывается клапан К1 и ЖА попадает в испарители И1 и И2, где он испаряется. Пары азота направляются в азотную емкость и повышают в ней

давление до необходимого для захлаживания заправочных магистралей и бортового бака РБ, после чего реле давления Р1 подает сигнал на закрытие клапана К1;

14. Открываются клапаны К3, К10, К11 и азот подается в заправочную магистраль малым расходом, где он вскипает. Его пары отводятся из магистрали через дренажно-предохранительный клапан ДПК1;

15. При достижении необходимой температуры в магистрали, датчик УТ3 подает сигнал на открытие заправочно-сливного клапана ЗСК, происходит подача азота в бак РБ для его захлаживания;

16. При достижении заданной температуры в ББ РБ, датчик УТ4 подает сигнал на закрытие клапанов К10 и К3;

17. Замена азотной среды в магистрали и ББ на кислородную. Открывается клапан К6 и ЖК попадает в испарители И3 и И4, где он испаряется. Открывается клапан К13 и клапан малого расхода К14. Пары кислорода проходят по трубопроводу и попадают в бак РБ, заменяя азотную среду кислородной. По сигналу газоанализатора ГА1, закрывают клапан К6 и клапаны К13, ЗСК;

18. Открываются клапан К8, клапан малого расхода К14, включается насос Н1, происходит заполнение заправочных магистралей, по завершении заполнения магистралей с сигнализатора наличия жидкости СНЖ1 поступает сигнал, открываются клапаны ЗСК, К15 и производится заправка ББ с большим расходом;

19. По достижении заданного уровня по датчику СУ в баке РБ, клапан К15 закрывается и заправка продолжается на малом расходе. Окончание заправки на малом расходе производится по сигналу СУ, отключается насос Н1, закрывается клапан малого расхода К14, ЗСК, К2;

20. Слив из коммуникаций. Открыты клапаны ЗСК, К16, К8. Клапаны К14, К15 должны быть закрыты. Слив осуществляется самотеком;

Аналогично производится аварийный слив компонента из ББ.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Современная промышленность активно использует установки, работающие с криогенными веществами – чистыми элементами или их композициями, функционирующими при сверхнизких температурах в диапазоне от 0 до 120 К (что соответствует интервалу от минус 273 °С до минус 153 °С). Ключевую группу криогенных продуктов составляют азот, кислород, водород, гелий, аргон, неон и метан.

Эксплуатация криогенного оборудования на всех этапах – от изготовления до практического применения, включая хранение и транспортировку продуктов – сопряжена с возникновением различных рисков для здоровья и безопасности. Обслуживающий персонал и находящиеся поблизости сотрудники могут подвергаться воздействию следующих опасных и вредных производственных факторов:

а) возможность аварии в криогенной системе и, как следствие, нанесения вреда здоровью обслуживающего персонала при воздействии низких температур, вызывающих охрупчивание ряда конструкционных материалов, в том числе углеродистых сталей;

б) возможность разрушения криогенного оборудования и, как следствие, нанесения вреда здоровью обслуживающего персонала при увеличении давления в замкнутых объемах вследствие нагрева и испарения криогенных компонентов;

в) возможность разрушения криогенного оборудования и, как следствие, нанесения вреда здоровью обслуживающего персонала из-за повышенных теплопритоков при охлаждении конструкций и потерь вакуума в изоляционных полостях, которые приводят к подъему давления в емкостях, если проходное сечение дренажных коммуникаций недостаточно;

г) обморожение кожных покровов и тканей даже при кратковременном воздействии криогенных компонентов на человеческий организм;

д) пары криогенных продуктов (кроме кислорода) непригодны для дыхания;

е) вероятность взрыва и, как следствие, нанесения вреда здоровью обслуживающего персонала, так как ряд криогенных продуктов в жидком и газообразном состоянии взрыво- и пожароопасны в смеси с воздухом (водород, метан) или при контакте с другими веществами, особенно органическими (кислород).

Наличие значительных объемов жидких криогенных продуктов в крупных системах в сочетании с перечисленными факторами опасности определяют возможность травматизма обслуживающего персонала и существенного материального ущерба при авариях.

В связи с этим, для разработанного заправочного агрегата будут рассмотрены общие требования, предъявляемые к нему, как криогенной системе, и к персоналу, обслуживающему данный агрегат.

4.1 Требования к криогенным системам для их безопасной эксплуатации

В соответствии с ГОСТ Р 54317-2011 регламентированы следующие ключевые требования к криогенному оборудованию:

1. Монтаж допускается исключительно на бетонных или металлических основаниях, категорически исключая деревянные и асфальтовые покрытия. Обязательна установка молниеотводов для хранилищ и заземления для каждого агрегата;

2. Электропитание должно поступать от двух автономных источников с учетом допустимых кратковременных перебоев (I категория). Необходимо оснащение системами видеонаблюдения за критически важными узлами и надежными средствами коммуникации;

3. Очистка оборудования предполагает тщательное обезжиривание специальными составами с последующей сушкой сжатым воздухом. Демонтажные и ремонтные работы разрешены только после полного отогрева и продувки системы азотом или воздухом;

4. Система должна обеспечивать возможность отбора проб для анализа и быть оснащена фильтрами установленной спецификации. Для оборудования с вакуумной изоляцией необходим постоянный мониторинг и поддержание требуемого уровня вакуума;

5. Эксплуатация должна осуществляться дистанционно в автоматизированном режиме из защищенных пунктов управления с полной информационной поддержкой оператора. Допускается создание локальных пультов управления для специфических операций. Все измерительные приборы должны соответствовать требованиям взрывобезопасности;

Согласно нормативам Госгортехнадзора России, организации, эксплуатирующие ОПО, должны соблюдать следующий комплекс требований безопасности:

1. Работа с криогенным оборудованием должна осуществляться в строгом соответствии с документацией производителя, лицензионными требованиями и технологическими регламентами. Регулярные проверки всех технологических узлов проводятся согласно ПБ-10-115-96. Особое внимание уделяется системе распределения топлива, требующей визуального контроля перед каждым использованием и кварталных испытаний под давлением;

2. Выполнение работ разрешается исключительно персоналу с соответствующей квалификацией и оборудованному приборами для измерения концентрации метана. Ряд технических процедур, отнесенных к категории газоопасных, требует повышенного уровня надзора. Начальное наполнение стационарных емкостей осуществляется строго при наличии специального наряда-допуска и под надзором компетентного специалиста в данной области. При выполнении газоопасных операций в обязательном порядке должны быть размещены предупреждающие знаки, соответствующие ГОСТ 12.4.026-76, а также информационные указатели;

Регламент проведения заправочных операций предусматривает следующие ключевые требования:

1. Процедура слива криогенных компонентов требует участия двух квалифицированных специалистов. Обязательно заземление транспортного заправщика перед началом работ. Ответственные лица должны провести проверку оборудования, согласовать процедуру заправки и убедиться в наличии всех необходимых коммуникаций и мер безопасности;

2. Выполнение технологических процессов допускается лишь по завершении проверки на герметичность всего комплекса трубопроводных коммуникаций. В процессе заправки применяется только «закрытый метод», при котором криогенный компонент полностью изолирован от контакта с атмосферным воздухом, за исключением линии для сброса газов. На период проведения всех операций необходимо обеспечить полную интеграцию контрольно-измерительных приборов и автоматики обеих взаимодействующих сторон;

3. Персонал должен иметь беспрепятственный обзор зоны заправки. Заправочные шланги проектируются с учетом оптимальных параметров длины и диаметра для обеспечения однофазного потока. Трубопроводная система должна быть оснащена отключающими клапанами и сливными патрубками для безопасного завершения операций и последующей продувки азотом.

Дополнительные требования безопасности при заправочных операциях включают:

1. Категорически запрещается отбор проб во время заправки и слива. Транспортировка осуществляется с закрытым газосбросом, допуская его открытие только через БДУ при превышении рабочего давления. Заправка транспортных средств топливом на обычных АЗС не допускается;

2. Процесс заправки регламентируется строгими ограничениями по давлению (минимум 0,05 МПа), перепаду давлений (от 2 до 3 кгс/см²) и уровням наполнения. Обязателен двойной контроль количества перекачиваемого компонента. Для резервуаров с вакуумной изоляцией требуется мониторинг уровня вакуума при появлении признаков обмерзания. Все разъемные соединения должны быть защищены от внешних воздействий;

3. Запрещено проведение огневых работ в радиусе 50 метров от заправщика. Особое внимание уделяется предотвращению обмерзания предохранительных клапанов и контролю образования льда и инея. Обязательно обеспечение беспрепятственного доступа к системе аварийного отключения.

Регламент безопасной эксплуатации предусматривает следующие ключевые положения:

1. Система должна исключать возможность самопроизвольного разъединения трубопроводов. После достижения регламентного уровня заправки все коммуникации подлежат перекрытию, а их расстыковка производится при отсутствии источников возгорания;

2. При обнаружении нарушений герметичности необходимо немедленно прекратить заправку, провести ремонт или замену оборудования с последующей опрессовкой азотом. На объектах I-ой группы при разгерметизации криобака транспортного средства требуется немедленная эвакуация техники в безопасную зону;

3. Регулярно проводится очистка оборудования от отложений в соответствии с регламентом. Запрещается несанкционированное отключение систем автоматизации и защиты. Все переключения режимов управления документируются в журнале. Крионасосы должны быть оснащены как автоматической защитой, так и ручными выключателями в двух локациях у насоса и в операторной.

4.2 Требования, предъявляемые к персоналу обслуживающему криогенные системы

Гарантия безопасности на производстве достигается путем внедрения комплекса организационных и технологических мер, обеспечивающих неукоснительное следование инструкциям по эксплуатации оборудования и его компонентов. Ключевым элементом этой системы выступает профессиональная подготовка персонала и регулярная оценка их знаний в области обслуживания оборудования и соблюдения правил безопасности.

Работы повышенной опасности, включающие операции по сливу продукции, отбору проб, обслуживанию внутренних частей резервуаров, огневым ремонтным работам и применению органических растворителей, разрешается проводить только при соблюдении ряда условий: подтверждении квалификации исполнителей, проведении дополнительного инструктажа, надлежащей подготовке рабочей зоны, обеспечении технического контроля и реализации противопожарных мероприятий.

В соответствии с регламентом Госгортехнадзора России по безопасности систем обращения со сжиженным газом, к персоналу предъявляется комплекс обязательных требований. Руководители и технические специалисты, вовлеченные в полный цикл работ с оборудованием и обучение персонала, должны пройти аттестацию по РД-01-24-93. Для работников опасных производственных объектов, включая аварийно – спасательные службы, обязателен профессиональный отбор с медицинским и психологическим освидетельствованием по утвержденным методикам Госгортехнадзора РФ.

К техническому обслуживанию и ремонтным работам допускаются только совершеннолетние специалисты, прошедшие специальную подготовку и аттестацию в присутствии представителей надзорного органа. Учебные программы по безопасности требуют одобрения местных контролирующих инстанций.

Каждый сотрудник должен обладать полными знаниями о потенциальных опасностях при работе с сжиженным газом, включая риски криогенных травм, переохлаждения, удушья и термического воздействия при воспламенении газозооушной смеси. Для персонала взрывоопасных участков предусмотрена специальная подготовка на современных тренажерах. Обучение охватывает все аспекты эксплуатации, от штатных процедур до действий в нештатных и аварийных ситуациях.

Персонал, впервые приступающий к работе на объекте или имеющий стаж менее двух лет, в обязательном порядке проходит комплексную подготовку до начала самостоятельной деятельности. При отсутствии на

рабочем месте свыше месяца сотрудник направляется на повторный курс отработки профессиональных навыков. Система регулярного обучения предусматривает обязательные тренинги для всех работников каждые три месяца.

Допуск к работе оформляется только при наличии документов, подтверждающих успешное освоение учебной программы и прохождение практических тренировок. Учебные программы по эксплуатации оборудования формируются в строгом соответствии с действующими технологическими регламентами. Порядок действий в нештатных ситуациях разрабатывается проектной организацией по поручению владельца объекта на основе специализированных сценариев.

К выполнению газоопасных работ допускаются исключительно работники, прошедшие специализированное обучение, успешно сдавшие экзамены по технике безопасности, владеющие методами проведения газоопасных работ, умеющие использовать средства индивидуальной защиты и способные оказать первую помощь. Базовая подготовка таких специалистов осуществляется только в образовательных учреждениях, имеющих соответствующую лицензию.

Практическое обучение для проведения газоопасных работ проводится как на специальных учебных площадках, так и непосредственно на производственных объектах, согласно программам, получившим одобрение региональных органов Госгортехнадзора России. По итогам успешной сдачи экзамена выдается особое удостоверение, подтверждающее право на выполнение газоопасных работ. Документ оформляется на основе протокола первичной аттестации и визируется главой экзаменационной комиссии совместно с представителем территориального газового надзора.

Доступ к самостоятельному выполнению газоопасных работ предоставляется только после завершения десятидневной стажировки под наблюдением опытного специалиста. При возникновении нештатных ситуаций

работники обязаны незамедлительно уведомить вышестоящее руководство согласно установленному порядку.

Персонал, обеспечивающий транспортировку сжиженного газа специальными заправщиками, должен соответствовать нормам, установленным правилами перевозки опасных грузов по железной дороге. Автотранспортные компании обязаны организовать специальную подготовку сотрудников, работающих с сжиженным газом, и обеспечить их защитной экипировкой. Согласно действующим транспортным нормативам, операторы заправщиков должны быть снабжены информационными картами на транспортируемый сжиженный газ.

Для допуска к транспортировке сжиженного газа машинисты должны пройти профильное обучение, получить инструктаж и квалификационную группу II по электробезопасности. Их профессиональная пригодность подтверждается медицинским освидетельствованием каждые три года, а перед каждым рейсом проводится обязательный медицинский контроль.

К перевозке сжиженного газа допускаются только машинисты с непрерывным стажем вождения соответствующего транспорта более трех лет. Обязательным документом является Свидетельство о прохождении специальной подготовки по программе для машинистов-перевозчиков опасных грузов, утвержденной Постановлением РФ от 23.04.1994 г №372.

Сопровождающий персонал транспортных заправщиков должен пройти специальный курс подготовки, включающий обучение методам устранения аварийных ситуаций. При совмещении обязанностей машиниста и оператора требуется дополнительная квалификация, подтвержденная специальным удостоверением для проведения газоопасных работ.

4.3 Действия персонала при нештатных ситуациях при работе с криогенной системой

При эксплуатации криогенных веществ возможно возникновение следующих нештатных ситуаций: проливы во время заправки транспортных средств и при выполнении сливных операций.

При обнаружении пролива криогенных веществ, требуется незамедлительно предпринять следующие действия. В случае утечки при заправке РБ – немедленно остановить подачу вещества из заправочного агрегата. Если пролив произошел во время слива криогенных веществ – обеспечить экстренное перекрытие клапана в отсеке заправочного агрегата. Критически важно исключить появление любых источников воспламенения в зоне возможного распространения криогенных паров.

Дальнейшие действия должны строго соответствовать утвержденному плану локализации и ликвидации аварийных ситуаций и возгораний на космодроме, включая:

- полное прекращение операций по выдаче криогенных веществ;
- немедленную эвакуацию персонала из зоны заправочного агрегата и ограничение доступа к нему;
- отключение электропитания заправочного агрегата;
- удаление всех легковоспламеняющихся материалов из прилегающей к проливу территории и предотвращение появления потенциальных источников возгорания;
- обеспечение постоянной готовности первичных средств пожаротушения;
- оповещение службы МЧС при возникновении угрозы воспламенения разлитых веществ.

Возобновление работы заправочного агрегата допускается только после полной ликвидации последствий пролива. В случаях, когда пролив был вызван неисправностью технологического оборудования, необходимо предварительно устранить причины, приведшие к аварийной ситуации.

5 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТКИ ЗАПРАВОЧНОГО АГРЕГАТА

Экономический раздел исследования содержит детальный анализ и обоснование финансовой целесообразности двух взаимосвязанных разделов. Первый направлен на создание специализированного заправочного агрегата, предназначенного для заполнения разгонного блока ракеты-носителя «Рокот» переохлажденным кислородом. Второй раздел фокусируется на разработке технологического процесса для пневмогидравлической системы, обеспечивающей заправку данного агрегата.

Целью экономического анализа является оценка экономической эффективности проводимой разработки.

Экономическая часть дипломного проекта состоит из оценки стоимости разработки ЗА, который заключается в оценке объема материальных затрат на разработку и в проведении оценки на разработку ПГС.

5.1 План работы над разработкой заправочного агрегата

В таблице 5.1 приведен план работы над разработкой ЗА.

Таблица 5.1 – План работ над разработкой заправочного агрегата

Основные виды работ	Должность сотрудников	Сотрудник, чел.	Затраты времени, дни
1 Разработка технического задания	Специалист I категории	3	1
2 Изучение литературы	Специалист I категории	3	1
3 Разработка структурной схемы	Специалист I категории	3	2
4 Разработка принципиальной схемы	Специалист I категории	3	2
5 Разработка функциональной схемы	Специалист I категории	3	2
6 Разработка конструкции	Специалист I категории	3	3
7 Изготовление рабочих чертежей	Специалист I категории	3	3
8 Построение графиков (проверка расчетов)	Специалист I категории	3	2
9 Подготовка документации	Специалист I категории	3	1
ИТОГО			17

5.2 Себестоимость разработки пневмогидравлической системы заправки

Основной характеристикой выполняемых исследований является их научно – теоретический характер.

При расчете общей себестоимости проекта необходимо учесть все фактические расходы на его реализацию, независимо от источников финансирования. Калькуляция итоговой стоимости производится путем суммирования следующих статей затрат:

- заработная плата ключевых исполнителей, включая основные выплаты и дополнительные начисления;
- обязательные отчисления на социальное страхование и в пенсионный фонд;
- стоимость необходимых расходных материалов;
- дополнительные производственные расходы;
- накладные организационные издержки.

Подробная информация о затратах на материалы, необходимые для реализации проекта, представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Затраты на расходные материалы

Наименование материала	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма затрат, в у.е.
1 Лицензионная версия MS Office2019	1 шт.	5490,00	5490,00
2 КОМПАС v23	1 шт.	1700,00	1700,00
3 Бумага для офисной техники	3 пачки	530,00	1590,00
4 Тонер для принтера HPDesignJetT125	1 шт.	2400,00	2400,00
Итого:			11380,00

В 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.	Заработная плата, у.е.	Затраты по заработной плате, у.е.
1 Разработка технического задания	3	0,143	88000	12571,43
2 Изучение литературы	3	0,143	88000	12571,43
3 Разработка структурной схемы	1,5	0,071	88000	6285,71
4 Разработка принципиальной схемы	1,5	0,071	88000	6285,71
5 Разработка функциональной схемы	1,5	0,071	88000	6285,71
6 Разработка конструкции	1	0,048	88000	4190,48
7 Изготовление рабочих чертежей	1	0,048	88000	4190,48
8 Построение графиков (проверка расчетов)	1,5	0,071	88000	6285,71
9 Подготовка документации	3	0,143	88000	12571,43
Итого:				71238,10

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

$$71238,10 \cdot 20\% / 100\% = 14247,62 \text{ у.е.}$$

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

$$(71238,10 + 14247,62) \cdot 30,2\% / 100\% = 25816,69 \text{ у.е.}$$

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

$$71238,10 \cdot 180\% / 100\% = 128228,57 \text{ у.е.}$$

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

$$Z_{np} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}. \quad (5.1)$$

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

$C_{мч}$ – стоимость машинного часа.

Для расчета стоимости машинного времени определим показатели и формулы для их расчета.

Для расчета амортизационных отчислений будет использован линейный метод.

Срок службы ноутбука принимается за 6 лет. Рассчитаем месячную норму амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{12 \cdot 6} = 1.39 \%. \quad (5.2)$$

где n – срок полной амортизации, мес.

Используя значение стоимости ноутбука, подсчитаем амортизационные отчисления за все время разработки проекта по формуле:

$$A_k = C_k \cdot N \cdot K \cdot M = 74000 \cdot 3 \cdot 0.139 \cdot 1 = 257.15 \text{ у.е.} \quad (5.3)$$

где C_k – стоимость ноутбука, у.е.;

N – количество оборудования;

K – коэффициент амортизации ноутбука;

M – количество месяцев, потраченных на разработку проекта.

Годовой фонд времени полезной работы машины определяется по формуле:

$$t_{\text{эвм}} = (D_{\text{общ.}} + D_{\text{праздн.}}) \cdot t_{\text{сут.}} - t_{\text{проф.}} = (365 - 117) \cdot 8 - 48 = 1936 \text{ час / год.} \quad (5.4)$$

где $D_{\text{общ.}}$ – число дней в году;

$D_{\text{праздн.}}$ – число выходных и праздничных дней в году;

$t_{\text{сут.}}$ – время работы ЭВМ в сутки, ч;

$t_{\text{проф.}}$ – время профилактических работ, час/год.

Максимальная мощность ноутбука $W = 80$ Вт. Стоимость 1 кВт/ч составляет $C_W = 4,02$ у.е. Стоимость потребляемой энергии в год составляет:

$$C_{\text{э}} = t_{\text{эвм}} \cdot C_W \cdot \left(\frac{W}{1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}} \right) \cdot \frac{M}{12} = 1936 \cdot 4,02 \cdot 0,08 \cdot \frac{1}{12} = 51,88 \text{ у.е.} \quad (5.5)$$

где $t_{\text{эвм}}$ – годовой фонд времени полезной работы ноутбука, час/год;

C_W – стоимость 1 кВт·ч, у.е.;

W – мощность ноутбука, Вт;

M – количество месяцев, потраченных на разработку проекта.

Итого стоимость машинного времени за период разработки дипломной работы составила:

$$C_{\text{мч}} = C_{\text{э}} + A_{\text{к}} = 51,88 + 257,15 = 309,03 \text{ у.е.} \quad (5.6)$$

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

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

$$N = (1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2 + 1) \cdot 8 = 136 \text{ ч.}$$

$$Z_{np} = 136 \cdot 309.03 \cdot 0,7 = 29419.66 \text{ у.е.}$$

В таблице 5.4 представлена комплексная экономическая оценка проекта по созданию пневмогидравлической системы заправки жидким кислородом для перспективных разгонных блоков на стартовом комплексе. Сводная калькуляция объединяет все финансовые аспекты реализации проекта: материальные затраты, фонд оплаты труда персонала включая все надбавки, обязательные социальные отчисления и пенсионные взносы, а также накладные и сопутствующие производственные расходы. Таким образом, таблица дает исчерпывающее представление о совокупной себестоимости разработки.

Таблица 5.4 – Себестоимость разработки ПГС

Наименование статей расходов	Затраты, у.е.
Затраты на приобретение расходных материалов	11380,00
Затраты на основную заработную плату разработчиков	71238,10
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	14247,62
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	25816,69
Накладные расходы	128228,57
Прочие расходы	29419,66
Итого	280330,64

Затраты на комплектующие для изготовления опытного образца детально представлены в таблице 5.5. В качестве поставщика выбрана компания «КриогенТехГаз», чье собственное производство является существенным преимуществом. Наличие полного производственного цикла у данного поставщика гарантирует не только своевременность поставок, но и позволяет обеспечить надлежащий контроль качества на всех этапах изготовления компонентов. Это решение обеспечивает оптимальное сочетание надежности поставок и качества комплектующих.

Таблица 5.5 – Стоимость комплектующих изделий

Наименование изделия	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма, у.е.
1 Емкость для жидкого кислорода и азота	2	2666000	5332000
2 Емкость теплообменника	1	250000	250000
3 Испаритель	4	112000	448000
4 Насос	1	102543	102543
5 Фильтр	1	16000	16000
6 Пневмоклапан	17	23000	391000
7 Электропневмоклапан	6	25000	150000
8 Дренажно-предохранительный клапан	2	21000	42000
9 Манометр	1	4250	4250
10 Реле давления	3	4790	14370
11 Датчик температуры	4	1760	7040
12 Расходомер	1	47850	47850
13 Трубопровод	250	930	232500
14 Сигнализатор наличия жидкости	1	3700	3700
15 Газоанализатор	1	9500	9500
16 Железнодорожная платформа	1	1400000	1400000
Итого			8 450 753

5.3 Оценка косвенного экономического эффекта от внедрения ЗА

В предыдущих разделах был проведен анализ экономической целесообразности инвестиций в создание заправочной системы. Финансовые затраты проекта включают два основных компонента:

- проектирование ПГС системы, требующее вложений в размере 280 330,64 условных единиц;

– закупка комплектующих для создания опытного образца системы стоимостью 8 450 753 у.е.

Внедрение разработанной пневмогидравлической системы заправки принесет значительный экономический эффект. Основной выигрыш достигается за счет оптимизации временных и финансовых ресурсов в процессе заправки. Это стало возможным благодаря интеграции быстродействующих электроклапанов и применению криогенной арматуры с улучшенными теплоизоляционными характеристиками. Существенно возросла и точность мониторинга расхода топлива посредством установки современного измерительного комплекса, включающего инновационные сигнализаторы жидкости, высокоточные расходомеры и дополнительную контрольно-измерительную аппаратуру последнего поколения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была изучена проблематика переохлаждения криогенных компонентов топлива, в частности, для разгонного блока "Бриз-КМ". После тщательного анализа различных методов охлаждения жидкого кислорода предпочтение было отдано системе с погружным теплообменником. Принцип действия выбранного метода основан на размещении теплообменного устройства в емкости с хладагентом, температура кипения которого ниже целевого показателя охлаждения топливного компонента. Технические характеристики жидкого азота оптимально соответствуют требованиям процесса, что обусловило его выбор в качестве охлаждающей среды.

На основании выбранного способа переохлаждения было составлено техническое задание на разработку заправочного агрегата и определено необходимое для него оборудование.

В качестве основного оборудования:

а) рассчитан теплообменник со следующими основными характеристиками:

- объем емкости 3 м³;
- длина змеевика 98 м;
- количество витков змеевика 26;
- материал теплообменника сталь 12Х18Н10Т;
- газонаполненная теплоизоляция типа «Armaflex»;

б) выбран насос НкпМ 12,5/40 исполнения 3;

в) выбрана цистерна типа ЦТК-5/0,25;

г) выбрана железнодорожная платформа : длина 14194 мм, ширина 2870, ширина колеи 1520 мм.

Исходя из габаритных размеров оборудования, определена компоновка заправочного агрегата.

Была спроектирована пневмогидравлическая схема, определяющая необходимую для работы заправочного агрегата гидро – пневмоаппаратуру.

Разработан перечень операций, выполняемых агрегатом и их последовательность. Объем жидкого азота необходимо для осуществления заправки бортового бака составил $V_{O_2} = 3,28 \text{ м}^3$.

Проанализированы основные факторы опасности при эксплуатации криогенных систем на стартовом комплексе и меры по их предотвращению и разработка мероприятия, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала при эксплуатации криогенных систем, при работе с жидким кислородом и азотом;

Оценены сроки и стоимости разработки ЗА для заправки переохлажденным кислородом разгонного блока, общие затраты которого на разработку составили 8 731 083,63 у.е.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Филин, Н.В. Жидкостные криогенные системы / Н.В. Филин, А.Б. Буланов. – Л. : Машиностроение, Санкт-Петербург, 1985. – 247 с.
- 2 Архаров, А.М. Криогенные системы Том 1 / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1996., – 576 с.
- 3 Архаров, А.М. Криогенные системы Том 1 / А.М. Архаров, В.П. Беляков, Е.И. Микулин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1996. – 720 с.
- 4 Архаров, А.М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / А.М. Архаров, И.Д. Кунис. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 252 с.
- 5 Беляков, В.П. Криогенная техника и технология / В.П. Беляков. – М. : Энергоиздат, 1982. – 272 с.
- 6 Малков, М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
- 7 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим основам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1972. – 720 с.
- 8 Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков. 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
- 9 Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Москва : Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.
- 10 Рот, А. Вакуумные уплотнения / А. Рот. – перевод с англ. М. : Издательство Энергия, 1971. – 464 с.
- 11 Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д.Ф. Гуревич. – 5-е изд. – М : Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.

12 ОСТ 92-0039-94. Обозначения условные в пневматических и гидравлических схемах. – М : Издательство ЦКБС ЦНИИ Машиностроения, 1994. – 33 с.

13 КриогенТехГАЗ [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – 2011. – URL: <https://kriogenteh.ru>. – 21.10.2024.

14 Nasos.info, промышленные насосы [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – 2011. – URL: <https://nasos.info>. – 15.10.2024.

15 Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – URL: <http://www.khrunichev.ru/main.php>. – 10.09.2024.