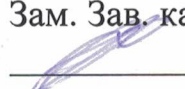


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ
Зам. Зав. кафедрой
 В.В. Соловьев
«22» 05 2024 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Мысина Егора Евгеньевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование конструкции электрического ракетного двигателя с весовым импульсом 20000 кг/с.

(утверждена приказом от 01.04.2024 №852-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 12.06.2024 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: тяга двигателя 0,3 Ньютона, рабочий газ аргон, удельный импульс 20 километров в секунду.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: расчет основных проектных параметров двигателя, проектирование системы хранения и подачи рабочего тела, системы электропитания, описание технологии проведения испытаний, описание мер увеличения срока активного существования, описание требований безопасности труда, экономический расчет проектирования СПД.

5. Перечень материалов приложения: титульник, общий вид СПД, конструктивно-компоновочная схема СПД, электро-пневмо схема анода и катода, пневмосхема СХП, блок схема системы электропитания, блок схема системы управления двигательной установки, алгоритм управления

двигательной установки, порядок проведения испытания СПД, технологический процесс заправки аргоном, схема заправки бака СХП аргоном.

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания 22.05.2024 г.

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

Задание принял к исполнению (дата): 22.05.2024г



РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит: 66 страниц, 15 рисунков, 16 источников, 11 таблиц.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СПД, АНОД – ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ, КАТОД – КОМПЕНСАТОР, РАБОЧЕЕ ТЕЛО, МАССОВЫЙ РАСХОД, НАПРЯЖЕНИЕ, МОЩНОСТЬ, ВРЕМЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, ПРОЧНОСТЬ, РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА, МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ, МАГНИТНЫЙ ЭКРАН, ТЯГА

В работе представлены результаты проектирования конструкции стационарного плазменного двигателя, выбрана малая тяга двигателя, с целью достижения оптимальных характеристик и длительного срока эксплуатации, рассчитаны основные проектные характеристики двигателя.

Цель работы – проектирование конструкции электрического ракетного двигателя с весовым импульсом 20000 кг/с.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Изучить конструкцию и принцип работы СПД;
- 2) Провести расчет энергетических параметров двигателя;
- 3) Провести расчет геометрических характеристик двигателя;
- 4) Подобрать способы увеличения срока активного существования;
- 5) Подобрать систему хранения и подачи РТ и систему электропитания ДУ;
- 6) Описать меры безопасности при работе с рабочим телом;
- 7) Провести экономический расчет проектирования изделия.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	7
Введение	8
1 Теоретическая часть	10
1.1 Конструкция СПД	10
1.2 Описание элементов СПД	12
1.3 Рабочее тело СПД	13
2 Проектные характеристики	15
2.1 Расчет основных энергетических характеристик СПД	15
2.2 Расчет основных размеров разрабатываемого двигателя	18
2.3 Время работоспособности двигателя	22
2.4 Система хранения и подачи рабочего тела	25
2.5 Система электропитания СПД	27
3 Прочность СПД	31
3.1 Расчет запаса прочности анода	31
4 Технология проведения испытаний СПД	36
4.1 Ресурсные испытания двигателя	36
4.2 Испытания катодов-компенсаторов	37
4.3 Порядок проведения испытания	37
5 Увеличение срока активного существования	40
5.1 Магнитный экран для СПД	40
5.2 Эрозия стенок разрядной камеры СПД	41
5.3 Схема магнитной системы	42
6 Специальная часть	45
6.1 Электро-аневмосхема СПД	45
6.2 Алгоритм управления ДУ СПД	50
7 Безопасность жизнедеятельности при работе с СПД двигателями	54
7.1 Меры безопасности при работе с аргоном	54

7.2 Меры безопасности при проведении испытаний СПД	57
8 Экономическое обоснование разработки СПД	59
8.1 Календарный план работы над проектированием двигательной установки	59
8.2 Себестоимость двигателя	59
8.3 Оценка косвенного экономического эффекта	63
Заключение	64
Библиографический список	65

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

СПД – стационарный плазменный двигатель;

ЭРД – электрический ракетный двигатель;

РТ – рабочее тело;

КА – космический аппарат;

САС – срок активного существования;

ДУ – двигательная установка;

СИУ – слой ионизации и ускорения;

ДД – датчик давления;

ЗК – заправочный клапан;

ПК – предохранительный клапан;

ПрК – пиротехнический клапан;

РС – ресивер;

СПУ – система программного управления;

СУ – система управления;

СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела;

СЭП – система электропитания;

Ф – фильтр;

ЭК – электроклапан;

ЭФ – электрический фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Основоположник космонавтики К.Э. Циолковский впервые в 1911 г. высказал мысль, предположив, что с помощью электричества можно придавать большую скорость частицам, для разгона космических аппаратов. Позже идеи Циолковского легли в основу создания нового класса двигателей, основанных на этом принципе, – электрических ракетных двигателей.

В отличие от традиционных химических ракетных двигателей, ЭРД не используют горючее для создания тяги. Принцип работы ЭРД основан на преобразовании электрической энергии в кинетическую энергию рабочего вещества (инертного газа, например, ксенона или аргона) за счет электромагнитного поля. Отличаются они от других космических двигателей, работающих на химическом топливе, тем, что они более экономичны, но обладают меньшей тяговооруженностью.

В то же время, в ЭРД источник энергии и рабочий газ разделены и используется электромагнитное ускорение, поэтому тяга двигателя будет больше (так, как удельный импульс возрастает), что обеспечивает экономию топливных запасов.

Это дает ЭРД ряд важных преимуществ:

– Высокий удельный импульс: ЭРД способны разгонять рабочее вещество до гораздо более высоких скоростей, чем химические ракеты, что приводит к значительному повышению топливной эффективности.

– Большой ресурс работы: ЭРД не подвержены износу, связанному с горением, и могут работать в течение длительных периодов времени.

– Экологичность: ЭРД не производят выхлопных газов и продуктов сгорания, что делает их более экологически чистыми по сравнению с химическими ракетами.

Актуальность проекта: Создание СПД позволит стать ключевым решением в осуществлении существующих и будущих программ по освоению ближнего и дальнего космоса.

При помощи рассматриваемого СПД решаются такие актуальные задачи как:

– Увеличение срока активного существования космических аппаратов (КА): ЭРД могут обеспечить КА электроэнергией и маневровой тягой в течение многих лет, что позволит проводить более долгосрочные космические исследования.

– Экономия топлива и снижение стоимости космических программ: Благодаря высокой топливной эффективности ЭРД использование этих двигателей может значительно сократить расходы на космические полеты.

– Сокращение времени межпланетных перелетов: ЭРД способны сообщать КА большие ускорения, что позволяет сократить время путешествий к другим планетам Солнечной системы.

Активно ведутся разработки новых, более мощных и эффективных ЭРД, которые позволят совершить настоящий прорыв в освоении космоса.

Электрические ракетные двигатели – это не просто перспективная технология, а будущее космонавтики. Они открывают новые возможности для исследования дальнего космоса, создания долговременных космических станций и реализации других амбициозных космических проектов.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Стационарный плазменный двигатель (СПД) представляет собой электромагнитный двигатель, создающий тягу путем взаимодействия заряженных частиц плазмы электрическим и магнитным полями. Рабочее тело (чаще всего газ, например, ксенон или аргон) подается в канал через анод.

Процесс ускорения плазмы:

1. Рабочее тело поступает в канал через анод и ионизируется электронами, которые движутся в электрическом поле.
2. Электроны движутся от катода к аноду в магнитном поле системы.
3. В процессе работы электроны смещаются к аноду из-за столкновений с атомами рабочего тела, ионами и со стенками канала.
4. Ионы движутся преимущественно вдоль электрического поля и ускоряются в нем.
5. На выходе получаем нейтральную плазму, которая движется с большой скоростью, что и создает тягу космического аппарата.

1.1 Конструкция СПД

Современная конструкция СПД (см. рисунок 1), представляет собой сложную систему. Анод-газораспределитель 1 играет ключевую роль в подаче газа в разрядную камеру 3, где он ионизируется. Керамическая разрядная камера с кольцевым ускорительным каналом создает условия для ускорения заряженных частиц. Катод-компенсатор 2, в свою очередь, необходим для поддержания стабильности и равномерности электрического поля внутри камеры.

Магнитная система, состоящая из наружного полюса 4, катушек намагничивания 5, центрального сердечника 6 с внутренним полюсом 7 и магнитопровода 8, создает магнитное поле, необходимое для удержания плазмы и контроля над её движением внутри камеры. Это позволяет управлять процессом разряда и оптимизировать условия для получения высокотемпературной плазмы.

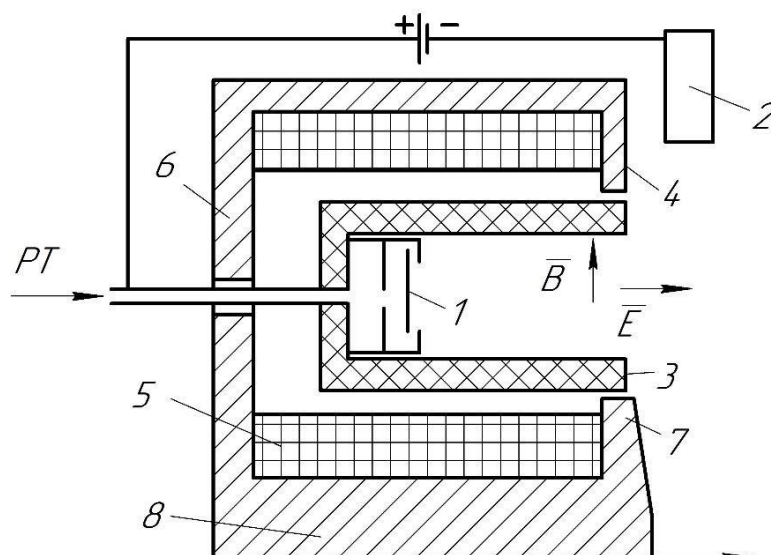


Рисунок 1 – Конструктивная схема

В конструкции СПД катод (см. рисунок 2) выполняет важную функцию источника электронов. Газоразрядный источник электронов типа полого катода обеспечивает эмиссию электронов, необходимых для поддержания плазменного разряда. Эмиттер электронов 9, обдуваемый потоком рабочего вещества и подогреваемый нагревателем 10, способствует эффективной эмиссии электронов.

Зажигание разряда с помощью поджигного электрода 11 инициирует процесс, который ведет к созданию и поддержанию плазмы в ускорительном канале. Это критически важно для работы двигателя, так как плазма является активной рабочей средой в СПД.

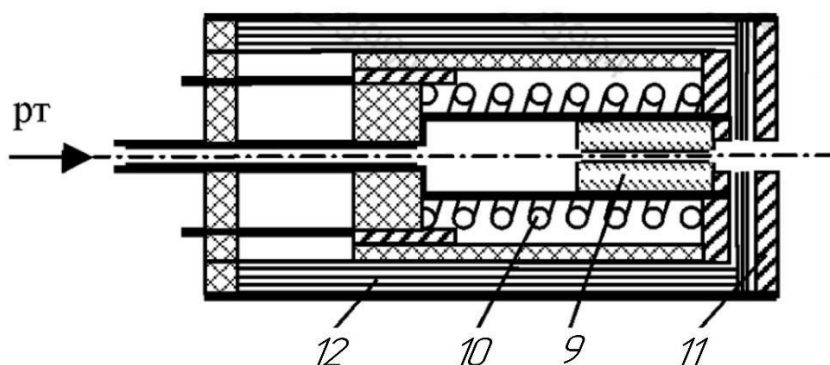


Рисунок 2 – Схема катода-компенсатора

Часть электронов, эмитируемых катодом, направляется в ускорительный

канал, где они участвуют в поддержании плазменного разряда. Остальная часть электронов присоединяется к струе, истекающей из двигателя, и компенсирует ее объемный заряд, что помогает уменьшить потери заряженных частиц и повысить эффективность двигателя.

Из-за своей двойной функции катод – компенсатор получил название.

1.2 Описание элементов СПД

Конфигурация электрического ракетного двигателя (ЭРД) обусловлена его предназначением, типом и расположением на космическом аппарате.

Основой схемы стационарного плазменного двигателя (СПД) является магнитная система. Она состоит из фланца, центрального сердечника, внутренней катушки электромагнита и внутреннего полюса.

Анод–газораспределитель имеет конструкцию в виде кольца с перегородками. Эта ступенчатая схема газораспределения позволяет выровнять поток рабочего газа, поступающего в разрядную камеру.

Разрядная камера изготавливается из керамики в виде монолитной детали с кольцевым пазом, образующим ускорительный канал. Для крепления камеры к магнитной системе используется переходная металлическая обойма с высоким тепловым сопротивлением, что минимизирует теплопередачу от анода и керамической камеры к магнитной системе.

Разрядная камера представляет собой керамическую монолитную деталь, выполненную в виде закрытого цилиндра с кольцевым пазом, который формирует ускорительный канал.

Экранно–вакуумная изоляция необходима для уменьшения тепловых воздействий, направленных к компонентам с ограниченным диапазоном рабочих температур, таким как катушки.

Катод-компенсатор размещается снаружи на внешнем полюсе магнитопровода. Для защиты от воздействия плазмы его располагают под углом 45 градусов к оси двигателя.

Большинство конструктивных элементов имеют рабочие температуры, что позволяет использовать относительно недорогие материалы для их

изготовления.

1.3 Рабочее тело СПД

Для электроракетных двигателей (ЭРД) выбор рабочего тела имеет решающее значение, поскольку оно влияет на общую производительность и эффективность космического аппарата. Как правило, рабочие тела для ЭРД бывают трех основных типов:

- газы (ксенон, криптон, аргон, водород);
- металлы (магний, цезий, ртуть, висмут, кадмий, цинк, литий);
- неметаллы (йод).

Газы, такие как ксенон, криптон и аргон, являются наиболее распространенными рабочими телами для ЭРД. Они имеют низкую плотность, что приводит к меньшей массе системы хранения и подачи. Кроме того, газы относительно просты в управлении и имеют высокую удельную тягу, что позволяет космическому аппарату развивать высокие скорости.

Металлы, такие как магний, цезий и ртуть, также могут использоваться в качестве рабочих тел для ЭРД. Они имеют более высокую плотность, чем газы, что уменьшает необходимое количество рабочего тела для достижения заданной тяги. Однако из-за высокой температуры плавления и испарения металлов требуется дополнительная энергия для их нагрева до рабочих температур.

Неметаллы, такие как йод, также можно использовать в качестве рабочих тел для ЭРД. Они имеют некоторые уникальные свойства, такие как высокая удельная тяга и способность генерировать ионные пучки с высокой энергией. Однако неметаллы могут быть коррозионно-активными и сложными в управлении.

Выбор конкретного рабочего тела для ЭРД зависит от конкретных требований миссии. Для задач, требующих экономии топлива и снижения затрат, газы, такие как аргон, являются оптимальным выбором. Аргон является относительно недорогим и простым в получении. Кроме того, его параметры, такие как плотность и удельная тяга, обеспечивают хороший баланс между производительностью и массой.

В бакалаврской работе был выбран газообразный аргон в качестве рабочего тела для ЭРД. Тщательный анализ различных рабочих тел привел к выводу, что аргон наилучшим образом соответствует поставленным задачам проектирования.

Таблица 1 – Физические свойства РТ

Рабочее тело	Плотность при н.у., кг/м ³	Температура плавления, С	К _{схп}
Ксенон(Xe)	5,89	-111,9	0,095
Криптон(Kr)	3,74	-157,3	0,269
Аргон(Ar)	1,78	-189,3	0,735
Ртуть(Hg)	13546	-38,8	0,015
Цезий(Cs)	1873	28,5	0,109
Йод(I)	4930	111,3	0,042
Литий(Li)	534	180,5	0,384
Висмут(Bi)	9790	271,4	0,021
Цинк(Zn)	7133	419,6	0,029
Магний(Mg)	1738	650	0,118

Таблица 2 – Стоимость РТ

Рабочее тело	Стоимость за 1л, руб.
Ксенон	1200
Аргон	100
Криптон	404

2 ПРОЕКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для выполнения поставленных задач проектирования двигателя необходимо выбрать характеристики двигателя, которые запишем в таблицу 3.

Таблица 3 – Исходные данные для СПД

тяга двигателя (P , мН);	300
удельный импульс ($J_{y\delta}$, км/с)	20
рабочее тело	аргон

2.1 Расчет основных энергетических характеристик СПД

Определим суммарный массовый расход двигателя:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \frac{P}{J_{y\delta}}, \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\Sigma} = 0,3/20000 = 0,015 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.}$$

Суммарный массовый расход определяется расходами через анодный блок – \dot{m}_a и через катод – \dot{m}_k :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{1,1}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_k = 0,1\dot{m}_a, \quad (3)$$

Расход через анод будет считаться:

$$\dot{m}_a = 0,015 \cdot 10^{-3} / 1,1 = 1,36 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

Расход через катод:

$$\dot{m}_k = 0,1 \cdot 1,36 \cdot 10^{-5} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с.}$$

Рассчитаем ток разряда определяется по следующей формуле:

$$I_p = \chi_{\text{аргона}} \cdot I_{\dot{m}}, \quad (4)$$

где $\chi_{\text{аргона}}$ – коэффициент, учитывающий долю сквозного электронного тока поперек магнитного поля (из экспериментов известно, что для аргона $\chi_{\text{аргона}} = 1,14$).

Рассчитаем токовый эквивалент массового расхода для тока разряда:

$$I_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_a}{M} \cdot e, \quad (5)$$

Определяем токовый эквивалент массового расхода (5):

$$I_{\dot{m}} = \frac{1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-23}} = 0,03282 \text{ А},$$

где $M = 6,63 \cdot 10^{-23}$ кг – масса атома рабочего тела;

Расчет разрядного тока из формулы (4):

$$I_p = 1,14 \cdot 0,03282 = 0,0374148 \text{ А}.$$

При определении напряжения разряда необходимо учитывать, что часть мощности разряда затрачивается на ионизацию рабочего тела и при электродные потери. Обычно ϕ – потенциал ионизации рабочего тела, U_y – разность потенциалов, разгоняющая ионы до нужной скорости, поскольку в двигателе реализуется электростатический механизм ускорения, M – масса атома рабочего тела и e – заряд электрона.

$$U_y = \frac{M \bar{v}^2}{2 \cdot e}, \quad (6)$$

где средняя скорость ионов \bar{v} определяется так удельный импульс с учетом

большой расходимости и немонотонности ускоренного ионного потока, меньше средней скорости ионов и может быть оценен с учетом экспериментальной информации как: из соответствующего значения:

$$J_{y0} = 0,83 \bar{v}, \quad (7)$$

Определение средней скорости ионов \bar{v} из формулы (7):

$$\bar{v} = \frac{20000}{0,83} = 24096,38554 \text{ м/с.}$$

Определение разности потенциалов по формуле (6):

$$U_y = \frac{6,63 \cdot 10^{-23} \cdot 24096,38554^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 120300 \text{ В,}$$

где $M = 6,63 \cdot 10^{-23}$ кг – масса атома рабочего тела;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – единичный заряд электрона.

Определении напряжения разряда U_p :

$$U_p = U_y + (3,5...4) \cdot \phi, \quad (8)$$

где ϕ – потенциал ионизации рабочего тела (для аргона $\phi = 15,75$ эВ),

U_y – разность потенциалов, разгоняющая ионы до необходимой скорости.

Определение напряжения разряда по формуле

$$U_p = 120300 + 4 \cdot 15,75 = 120363 \text{ В.}$$

Зная напряжение U_p и ток разряда I_p , легко определить мощность разряда двигателя $N_{p(дв)}$:

$$N_{p(дв)} = U_p \cdot I_p, \quad (9)$$

Определение мощности разряда двигателя:

$$N_{p(\partial\partial)} = 120363 \cdot 0,0374148 = 4503 \text{ Вт.}$$

Определение тяговой эффективности (к.п.д.) двигателя:

$$\eta = \frac{P^2}{2 \cdot \dot{m}_a N_{\partial\partial}}, \quad (10)$$

$$\eta = \frac{0,3^2}{2 \cdot 1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 4503} = 0,7348 = 73,48\% .$$

2.2 Расчет основных размеров разрабатываемого двигателя

Для конструкции СПД необходимо определить основные размерные характеристики такие как: габаритные размер, внутренний диаметр наружного полюсного наконечника и диаметр внутреннего полюсного наконечника.

Перечисленные размеры определяются с использованием величины среднего диаметра. Это обеспечит равномерное распределение потенциала ионизации атомов рабочего тела и других необходимых параметров.

Средний диаметр канала $d_{\text{ср}}$ находится с помощью экспериментального графика (см. рисунок 3) по известному значению расхода рабочего тела.

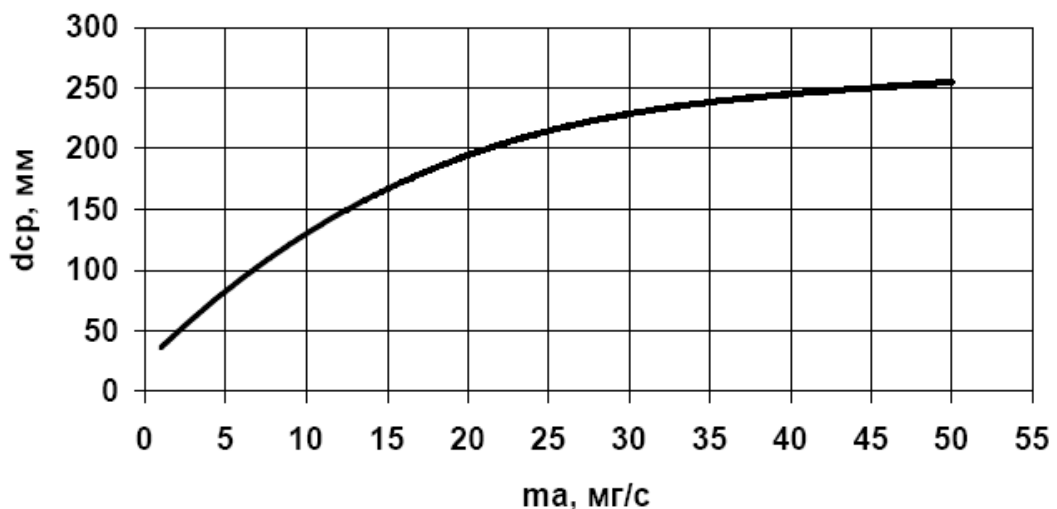


Рисунок 3 – Обобщенная экспериментальная зависимость среднего диаметра ускорительного канала от расхода рабочего тела для геометрических подобных моделей СПД

При данном расходе $\dot{m}_a = 1,36 \cdot 10^{-5}$ кг/с средний диаметр разрядной камеры будет: $d_{cp} = 0,15$ м.

Ширина канала b_k выбирается такой, чтобы двигатель работал на нормальном тепловом режиме, который обеспечивается соответствующей плотностью мощности в канале – отношением мощности разряда N_p к поперечной площади канала S_k , равной:

$$S_k = \pi d_{cp} b_k, \quad (11)$$

По найденному значению d_{cp} определяем плотность мощности в канале и с учетом этого рассчитаем значение ширины канала b_k .

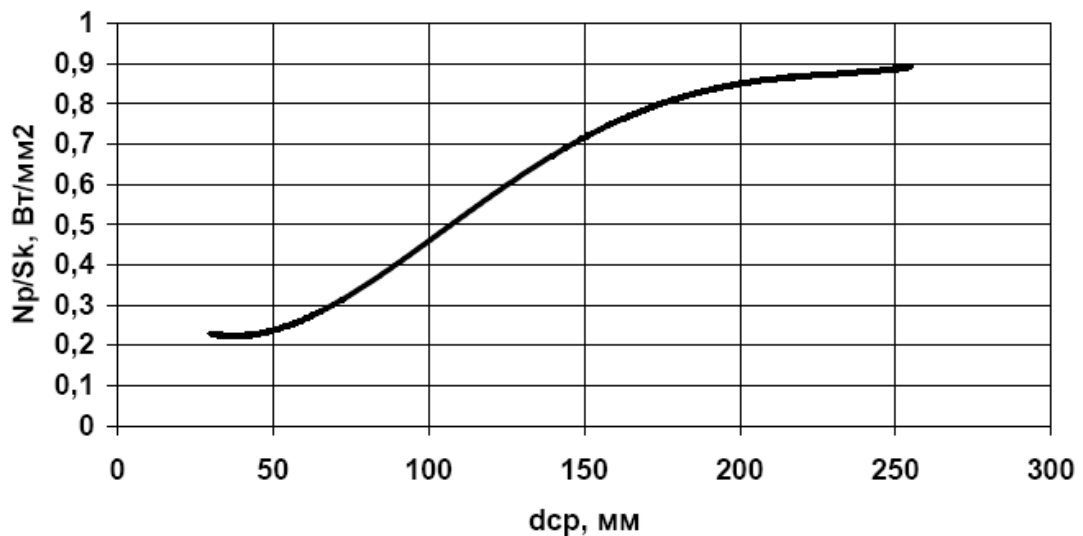


Рисунок 4 – Обобщенная экспериментальная зависимость плотности разрядной мощности от среднего диаметра ускорительного канала

Определяем поперечную площадь канала S_k :

$$\frac{N_p}{S_k} = 0,72 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

$$S_k = \frac{4503}{0,72 \cdot 10^6} = 0,00625 \text{ м}^2.$$

Определение из выражения (11) ширину канала b_k :

$$b_k = \frac{0,00625}{3,14 \cdot 0,15} = 0,013 \text{ м.}$$

Определение внутреннего диаметра $d_{вн}$ ускорительного канала:

$$d_{вн} = d_{ср} + b_k, \quad (12)$$

Определим из выражения (12) внутренний диаметр $d_{вн}$ ускорительного канала:

$$d_{вн} = 0,15 + 0,013 = 0,163 \text{ м.}$$

Рассчитаем геометрические размеры СПД (см. рисунок 5)

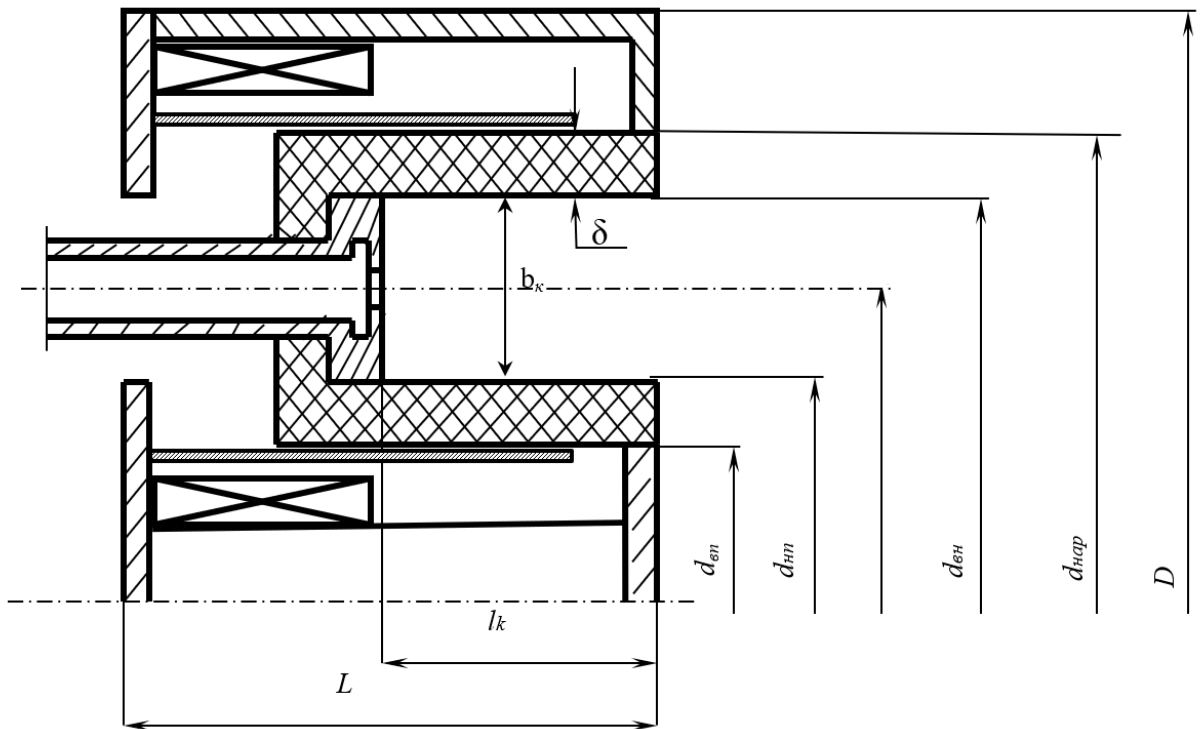


Рисунок 5 – Геометрические размеры СПД

– длина ускорительного канала:

$$l_k = (1,5 - 2) b_k, \quad (13)$$

$$l_k = 2 \cdot 0,013 = 0,026 \text{ м.}$$

– толщина стенок ускорительного канала:

$$\delta = 0,1b_k, \quad (14)$$

$$\delta = 0,1 \cdot 0,013 = 0,0013 \text{ м.}$$

– габаритные размеры двигателя:

Диаметр:

$$D = 1,2d_{вн}, \quad (15)$$

$$D = 1,2 \cdot 0,163 = 0,1956 \text{ м.}$$

Длина:

$$L = 2l_k, \quad (16)$$

$$L = 2 \cdot 0,026 = 0,052 \text{ м.}$$

– определяем наружный диаметр $d_{нар}$ ускорительного канала:

$$d_{нар} = d_{вн} + 2\delta, \quad (17)$$

$$d_{нар} = 0,163 + 2 \cdot 0,0013 = 0,1656 \text{ м.}$$

– внутренний диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{вп}$ определяется:

$$d_{вн} = d_{ср} - b_k - 2\delta, \quad (18)$$

$$d_{вн} = 0,15 - 0,013 - 2 \cdot 0,0013 = 0,1344 \text{ м.}$$

– наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{нп}$

определяется:

$$d_{ин} = d_{ен} + 2\delta, \quad (19)$$

$$d_{ин} = 0,1344 + 2 \cdot 0,0013 = 0,137 \text{ м.}$$

Таблица 4 – Геометрические размеры СПД

$l_k, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$	$d_{вн}, \text{ м}$	$d_{нар}, \text{ м}$	$d_{вп}, \text{ м}$	$d_{нп}, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	$L, \text{ м}$
0,026	0,0013	0,163	0,1656	0,1344	0,137	0,1956	0,052

2.3 Время работоспособности двигателя

Расчет времени работоспособности СПД является важным аспектом при планировании технического обслуживания и замены деталей двигателя. Износ стенок разрядной камеры происходит из-за высокоэнергетичных ионов, которые повреждают поверхность материала. Этот процесс приводит к уменьшению эффективности работы двигателя.

Одним из факторов, влияющих на время работоспособности, является стойкость материала стенки к распылению и долговечность керамического покрытия. Также плотность ионного тока, энергия ионов и толщина керамической стенки также важны для определения срока службы деталей двигателя.

В действительности процесс определения времени работоспособности СПД носит более сложный характер и требует экспериментальной проверки. Для более точного определения времени работы двигателя необходимо провести комплексные эксперименты, учитывающие все вышеуказанные факторы. Предварительная оценка времени работоспособности может быть основана на изучении степени износа выходной кромки внутренней стенки ускорительного канала.

Время работоспособности будем определять временем распыления материала керамики:

$$\tau = \frac{\Omega}{K_s \cdot I_{ct}}, \quad (20)$$

где Ω – объем распыленного материала до момента начала ухудшения характеристик, I_{ct} – ток ионов на стенку, K_s – объемный коэффициент распыления материала.

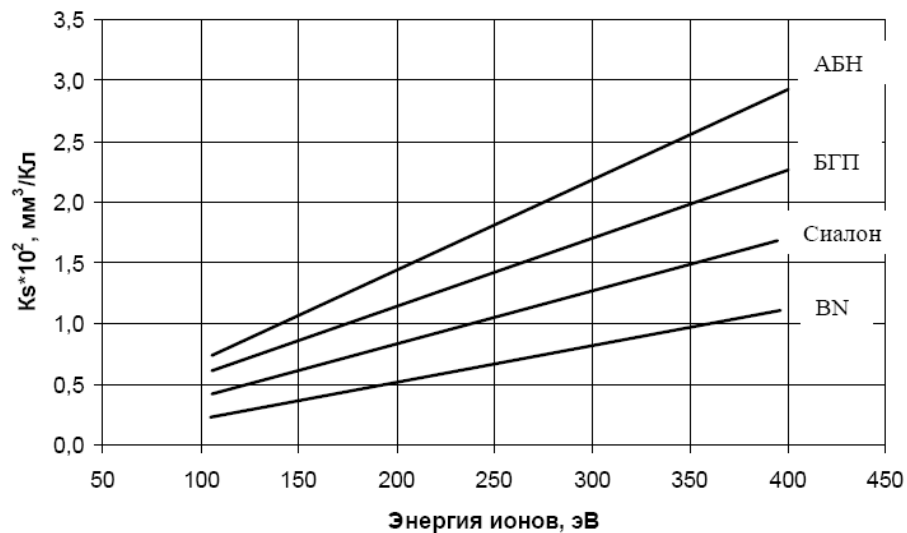


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость коэффициента распыления керамических материалов

Определяем объем распыленного материала по формуле (выбираем для схемы с узкими катушками):

$$\Omega = \pi \left(r_{вн} l_c \delta - \frac{l_c \delta^2}{3} \right), \quad (21)$$

где $r_{вн}$ – радиус внутреннего полюсного наконечника, так как у нас наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{вн} = 0,137$ м, то:

$$\Omega = 3,14 \left(0,0685 \cdot 0,2146 \cdot 0,0013 - \frac{0,2146 \cdot 0,0013^2}{3} \right) = 5,962 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Плотность ионного тока:

$$j_{cm} = \frac{\dot{m}_a e \beta_{cm}}{MS_{расн}}, \quad (22)$$

где $\beta_{ст}$ – доля ионизовавшихся атомов, попадающих на стенки (для современных моделей СПД $0,02 < \beta_{ст} < 0,1$);

$S_{рас}$ – площадь зоны распыления на стенках разрядной камеры;

M – масса иона рабочего тела.

$$S_{рас} = 2\pi d_{cp} l_c, \quad (23)$$

Тогда находим $S_{рас}$ площадь зоны распыления по формуле (25):

$$S_{рас} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,15 \cdot 0,2146 = 0,2 \text{ м}^2.$$

После этого определяем $j_{ст}$ плотность ионного тока на стенки по формуле (29), где $\beta_{ст} = 0,099$.

$$j_{cm} = \frac{1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,099}{6,63 \cdot 10^{-23} \cdot 0,2} = 0,0162 \text{ А/м}^2.$$

Определяем ток ионов на стенку:

$$I_{cm} = j_{cm} 2\pi r_{вн} l_c, \quad (24)$$

где $r_{вн}$ – радиус внутреннего полюсного наконечника, так как у нас наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{вн} = 0,137$ м, то $r_{вн} = 0,101$ м.

$$I_{cm} = 0,0162 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0685 \cdot 0,2146 = 0,0015 \text{ А}.$$

Выбираем материал разрядной камеры «АБН». При энергии ионов $W = 350$ эВ рабочего газа: $K_s = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Кл}$.

$$\tau = \frac{5,962 \cdot 10^{-6}}{2,6 \cdot 10^{-11} \cdot 0,0015} = 42464 \text{ часов}.$$

Рассчитаем запас рабочего тела по формуле (25):

$$M_{pm} = 1,2 \dot{m}_\Sigma \tau, \quad (25)$$

$$M_{pm} = 1,2 \cdot 0,015 \cdot 10^{-3} \cdot 42464 \cdot 3600 = 2751,66 \text{ кг.}$$

Суммарный импульс:

$$J_\Sigma = P\tau, \quad (26)$$

$$J_\Sigma = 0,3 \cdot 42464 \cdot 3600 = 45861120 \text{ с.}$$

Уточним расчет исходных данных.

Уточним тягу двигателя:

$$P = \beta_{\text{дв}} \dot{m}_a \bar{v}, \quad (27)$$

где \dot{m}_a – расход рабочего тела через анод определяется выражение,

$\beta_{\text{дв}}$ – коэффициент использования рабочего тела (0,85...0,9).

$$\dot{m}_a = \frac{I_p M}{\lambda e}, \quad (38)$$

где λ – коэффициент, учитывающий долю сквозного электронного тока поперек магнитного поля (из экспериментов известно, что для аргона $\lambda = 1,14$),

$$\dot{m}_a = \frac{0,0374148 \cdot 6,63 \cdot 10^{-23}}{1,14 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,35997 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

$$P = 0,9 \cdot 1,35997 \cdot 10^{-5} \cdot 24096,38554 = 0,2949 \text{ Н.}$$

Уточняем суммарный расход двигателя через выражения (2):

$$\dot{m}_\Sigma = 1,1 \cdot 1,35997 \cdot 10^{-5} = 1,4959 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

2.4 Система хранения и подачи рабочего тела

Блок системы подачи и хранения рабочего тела обеспечивает надежное хранение рабочего тела, его бесперебойную и точную подачу в разрядную камеру, а также поддержание необходимого давления и температуры рабочего тела.

Это требует сложной системы управления и регулирования, которая включает в себя резервуары для хранения, насосы, клапаны, датчики и контроллеры. Все эти компоненты должны работать синхронно и точно, чтобы рабочее тело подавалось в двигатель в нужный момент, в нужном количестве и состоянии.

Система подачи и хранения состоит из трех основных частей:

1. Система хранения:

– Бак хранения рабочего тела: служит для хранения рабочего вещества в нужном фазовом состоянии.

– Заправочная горловина: используется для заправки и слива рабочего вещества.

– Датчик давления: контролирует давление в баке, что критически важно для стабильности работы двигателя.

– Пироклапан: предотвращает нежелательное перемещение рабочего тела из системы хранения в систему подачи.

2. Система дросселирования:

– Жиклер: ограничивает поток рабочего тела, помогая поддерживать необходимое давление.

– Ресивер: буферная емкость, которая выравнивает пульсации давления рабочего тела.

Электроклапаны: управляют потоком рабочего тела, обеспечивая его точную подачу.

3. Система регулирования и распределения рабочего тела:

– Жиклеры: регулируют объем подаваемого рабочего тела.

– Электроклапаны: распределяют рабочее тело по различным частям двигателя.

– Термодроссели: контролируют температуру рабочего тела, что важно для поддержания эффективности и стабильности работы двигателя.

В последнее время в системах подачи и хранения рабочего вещества были внедрены значительные технологические усовершенствования, такие как:

– Композитные материалы: Композитные материалы, такие как углеродное волокно, используются в конструкции баков и других компонентов системы, обеспечивая низкий вес, высокую прочность и химическую совместимость с рабочим веществом.

– Интеллектуальные датчики и системы управления: Интеллектуальные датчики и системы управления в режиме реального времени отслеживают параметры системы и оптимизируют подачу рабочего вещества, обеспечивая повышенную эффективность и безопасность.

2.5 Система электропитания СПД

В просторах космоса, где нет доступа к привычным земным источникам энергии, космические аппараты полагаются на специализированные системы электропитания, обеспечивающие их бесперебойную работу. Одна из основных таких систем — система электропитания (СЭП).

В настоящее время СЭП космических аппаратов находятся в непрерывном развитии, ведутся исследования и разработки новых технологий, направленных на повышение их мощности, эффективности и надежности. Эти улучшения позволяют расширить возможности космических аппаратов и открыть новые горизонты в освоении космоса.

СЭП космического аппарата представляет собой сложную систему, которая отвечает за преобразование различных форм энергии в электрическую и распределение ее по бортовым потребителям. Ее основными компонентами являются:

– Источники питания: устройства, преобразующие химическую, ядерную или солнечную энергию в электричество.

– Распределительная сеть: сеть кабелей и устройств, распределяющих электроэнергию по аппарату.

– Устройства управления: система, контролирующая напряжение, ток и режимы работы источников питания, а также распределяющая электроэнергию в зависимости от требований нагрузки.

Существуют различные типы источников питания, используемых в СЭП космических аппаратов:

– Химические батареи: компактные и надежные устройства, которые преобразуют химическую энергию в электрическую.

– Солнечные батареи: панели, которые преобразуют солнечный свет в электричество.

– Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ): устройства, которые преобразуют тепловую энергию, выделяющуюся при распаде радиоактивных изотопов, в электричество.

Для эффективной работы СПД в космическом пространстве будем использовать Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ). Они позволят обеспечить системы СПД достаточным энергоснабжением для поддержания работы на весь срок эксплуатации двигателя.

РИТЭГ состоят из двух основных элементов:

– Источник тепла.

– Термопары.

Термопары в РИТЭГ используют тепло от источника тепла (радиоактивного изотопа) для нагрева горячей стороны термопары и холод окружающего пространства для низкой температуры на холодной стороне.

РИТЭГ отличаются от традиционных источников питания следующими преимуществами:

– Непрерывное электроснабжение: РИТЭГ работают без перерывов, 24 часа в сутки, независимо от положения космического аппарата относительно Солнца или состояния его батарей.

– Длительный срок службы: РИТЭГ могут работать в течение многих десятилетий, что делает их идеальными для долгосрочных миссий.

– Надежность: РИТЭГ не имеют движущихся частей, что повышает их

надежность и уменьшает вероятность сбоев.

– Компактность и простота конструкции: РИТЭГ относительно компактны и просты в установке, экономя ценное пространство и вес на космическом аппарате.

Одним из наиболее важных компонентов РИТЭГ является источник тепла, который обычно содержит изотоп кюрия. Кюрий обладает высокими показателями производства тепла, что делает его идеальным для использования в РИТЭГ.

Два изотопа кюрия, наиболее часто используемых в РИТЭГ, это кюрий–242 и кюрий–244:

– Кюрий–242: Имеет высокий выход тепловой энергии до 120 Вт/г и относительно короткий период полураспада 162,8 дня.

– Кюрий–244: Менее мощный, чем кюрий–242, производит около 2,83 Вт/г, но имеет значительно более длительный период полураспада в 18,1 года.

Кюрий–242 обеспечивает более высокую мощность и имеет, достаточный для наших целей, период полураспада, поэтому в РИТЭГ будем использовать его.

Ввиду дефицита ^{238}Pu в качестве альтернативного топлива для РИТЭГ рассматривается америций–241 (^{241}Am). Этот изотоп обладает периодом полураспада 432 года и является практически чистым альфа–излучателем. ^{241}Am присутствует в ядерных отходах и имеет высокую степень изотопической чистоты.

Однако удельная мощность ^{241}Am составляет всего 25% от удельной мощности ^{238}Pu . К тому же, продукты распада ^{241}Am испускают более проникающее излучение, что требует более эффективного экранирования. Тем не менее, требования к экранированию излучения для ^{241}Am лишь незначительно строже, чем в случае с ^{238}Pu .

Все каналы электропитания подключены к общей выходной шине электроэнергетической системы (СЭС). Из системы управления по шине обмена, поступают сигналы управления на все системы электропитания (СЭП), входящие

в состав СУ.

Так же необходимо учитывать дополнительные затраты на вспомогательные системы (примерно 130 Вт), работу клапанов системы подачи (примерно 20 Вт), что составит примерно 10% от общей потребляемой мощности. Тогда необходимая потребляемая мощность будет рассчитана с учетом мощность разряда $N_p = 4503$ Вт и составит:

$$N = 4503 + 450,3 = 4953,3 \text{ Вт.}$$

Для осуществления питания всех систем ДУ будем использовать РИТЭГ «ИУЭ–1М» Российского производства в количестве 4-х изотопных генераторов мощностью 2,2 кВт.

3 ПРОЧНОСТЬ СПД

3.1 Расчет запаса прочности анода

Из подобранного материала рассчитаем напряжение в аноде и его запас прочности:

Таблица 5 – Исходные данные

Материал	Сталь X18H9T
Модуль упругости E, Мпа	$1,45 \cdot 10^5$
Угол α , 1/град	$21,2 \cdot 10^{-6}$
Температура по длине анода	Возрастает линейно

Левый конец анода жестко закреплен.

Определим протяжение полного периода функции:

$$\beta = \frac{1,29}{\sqrt{rh}}, \quad (29)$$

$$\beta = \frac{1,29}{\sqrt{22,57 \cdot 0,5}} = 0,384 \text{ 1/мм.}$$

Цилиндрическая жесткость D:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (30)$$

$$D = \frac{1,45 \cdot 10^5 \cdot 0,5^3}{12(1-0,3^2)} = 1663 \text{ кН/м.}$$

Найдем погонные реакции \bar{Q}_R и \bar{M}_R :

$$\bar{M}_R = 2\beta^2 D \left[\frac{\delta'(0)}{\beta} + \delta(0) \right] + D\delta''(0), \quad (31)$$

$$\delta(0) = r\alpha\Delta t_0 = 22,57 \cdot 21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 430 = 0,20574 \text{ мм}; \quad (32)$$

$$\delta'(0) = \alpha\Delta t_0 = 21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 430 = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}; \quad (33)$$

$$\delta''(0) = 0.$$

$$\bar{M}_R = 2 \cdot 0,384^2 \cdot 1663 \left[\frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{0,384} + 0,20574 \right] = 112,525 \text{ Н}.$$

$$\bar{Q}_R = -2\beta^3 D \left[\frac{\delta'(0)}{\beta} + 2\delta(0) \right] + D\delta''(0), \quad (34)$$

$$\bar{Q}_R = -2 \cdot 0,384^3 \cdot 1663 \left[\frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{0,384} + 2 \cdot 0,20574 \right] = -213,585 \text{ Н/мм}.$$

Рассчитаем прогиб оболочки:

$$\omega_p = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} \left[\beta M_R (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_R \cos \beta x \right] + \delta = \omega_0 + \delta, \quad (35)$$

Рассчитаем напряжение оболочки:

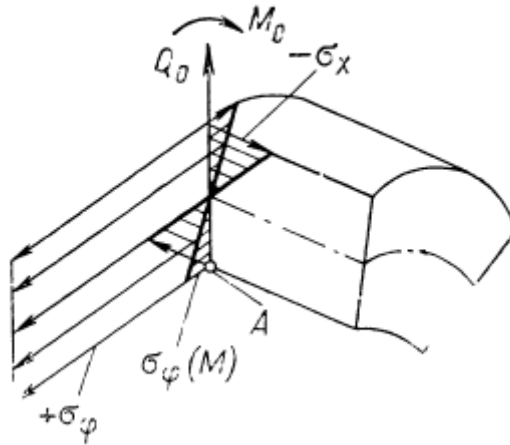


Рисунок 7 – Эпюр напряжение оболочки

$$\sigma_{\phi} = \frac{E\omega_0}{r}, \quad (36)$$

$$\sigma_x = \frac{6D\omega_p''}{h^2}, \quad (37)$$

$$\sigma_{\phi}(M) = 0,3\sigma_x. \quad (38)$$

Определяем коэффициенты:

$$2\beta^3 D = 2 \cdot 0,384^3 \cdot 1663 = 188,3284 \text{ Н/мм};$$

$$\beta M_R = 0,384 \cdot 112,525 = 43,2096 \text{ Н/мм};$$

$$\frac{E}{r} = \frac{1,45 \cdot 10^5}{22,57} = 6424,45724 \text{ МН/мм}^3;$$

$$\beta x = 0,384 \cdot 35 = 13,44 \text{ мм}.$$

$$\omega_p = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} \left[\beta M_R (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_R \cos \beta x \right] + \delta, \quad (39)$$

$$\omega_p = \frac{e^{-(13,44)}}{188,3284} \left[43,2096 (\cos 13,44 - \sin 13,44) + (-213,585) \cos 13,44 \right] + 0,20574 = 0,205736 \text{ мм.}$$

Рассчитаем прогиб, с помощью которого после определим напряжение в цилиндрической оболочке:

$$\omega_0 = \omega_p - \delta = 0,20574 - 0,205736 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ мм.} \quad (40)$$

Рассчитаем вторую производную прогиба оболочки:

$$\omega_p = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} \left[\beta M_R (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_R \cos \beta x \right] + \delta; \quad (41)$$

$$\omega_p' = -\frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} \left[2\beta M_R \cos \beta x + Q_R (\cos \beta x + \sin \beta x) \right] + \delta'; \quad (42)$$

$$\omega_p'' = \frac{e^{-\beta x}}{\beta D} \left[\beta M_R (\cos \beta x + \sin \beta x) + Q_R \sin \beta x \right]. \quad (43)$$

Рассчитаем коэффициенты:

$$\beta D = 0,384 \cdot 1663 = 638,592 \text{ Н/мм,}$$

$$\frac{6D}{h^2} = \frac{6 \cdot 1663}{0,5^2} = 39912 \text{ МН/м}^2.$$

$$\omega_p'' = \frac{e^{-(13,44)}}{638,592} \left[43,2096 (\cos 13,44 + \sin 13,44) + (213,585) \sin 13,44 \right] = 0,231 \cdot 10^{-6} \text{ мм.}$$

Рассчитаем напряжения по формулам (36), (37), (38):

$$\sigma_\phi = 6424,45724 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 0,025 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_x = 39912 \cdot 0,231 \cdot 10^{-6} = 0,0092 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_\phi (M) = 0,3 \cdot 0,0092 = 0,0027 \text{ МПа.}$$

Рассчитаем напряжение в оболочке:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + [\sigma_\phi + \sigma_\phi(M)]^2} - \sigma_x [\sigma_\phi + \sigma_\phi(M)], \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sqrt{0,0092^2 + [0,025 + 0,0027]^2} - 0,0092 \cdot [0,025 + 0,0027] = \\ &= 0,007989 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Запас прочности высчитывается по следующей формуле:

$$n = \frac{\sigma_{B,t}^{(t)}}{\sigma_i}, \quad (45)$$

где $\sigma_{B,t}^{(t)}$ – температурное напряжение определяется из графика (см. рисунок 8).

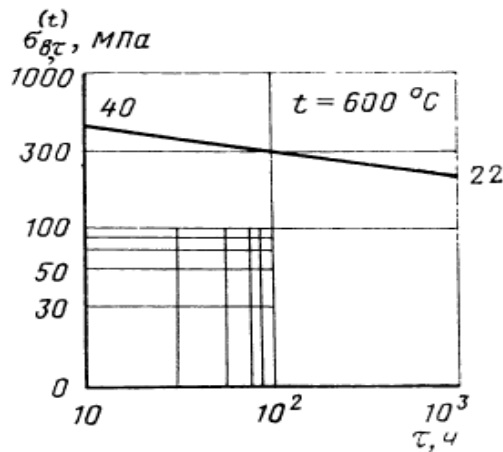


Рисунок 8 – График температурного напряжения для стали X18H9T

Определим из рисунка (8) температурное напряжение: $\sigma_{B,t}^{(t)} = 30$ МПа.

Следовательно рассчитаем запас прочности по формуле (49):

$$n = \frac{30}{0,0079} = 3797,468354.$$

Найденное значение удовлетворяет необходимому условию $n \geq 1,2$.

4 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СПД

Для успешного осуществления задач освоения космического пространства необходимо чтобы все компоненты двигательной установки работали в космическом пространстве. А для этого необходимо провести испытания СПД в наземных условиях.

4.1 Испытания двигателя

В процессе длительной эксплуатации двигателя его поверхности неизбежно загрязняются продуктами работы из вакуумной камеры и из самого двигателя. Наиболее критично загрязнение поверхностей стенок разрядной камеры.

На поверхности образуются темные пленки, что приводит к снижению тяги двигателя. Состав загрязняющих пленок на показал наличие таких элементов, как кремний (Si), бор (B), хром (Cr), никель (Ni) и железо (Fe). Эти элементы входят в состав материалов анода и стенок вакуумной камеры. С увеличением времени испытаний толщина пленки на стенке тоже увеличивается, пока не достигнет критического порога.

Для определения времени работоспособности поверхностей ставят датчики из молибдена и керамики. Эти материалы обладают высокой стойкостью к загрязнению и служат в качестве опорной поверхности для определения толщины отложений.

Показания датчиков позволили установить, что скорость нарастания пленки зависит от вакуумной плотности, концентрации остаточных газов, температуры на поверхности, состава материалов, из которых изготовлены стенки разрядной камеры.

Загрязнение поверхностей двигателя приводит к следующим негативным последствиям, таким как: снижение тяги, увеличение амплитуды колебаний разрядного напряжения, повышение температуры на поверхностях, снижение электрической прочности изоляции.

Реализация этих мер позволяет продлить срок службы двигателя, улучшить его и обеспечить стабильность его работы в течение длительного времени.

4.2 Испытания катода–компенсатора

Отработка катода-компенсатора действительно является важной частью подготовки двигательной установки, особенно для стационарных плазменных двигателей (СПД), где катод играет ключевую роль в управлении плазмой и обеспечении её стабильности. Вот некоторые из типичных испытаний, которые могут быть проведены для оценки работоспособности катода:

– Исследование характеристик катодов при совместной работе с двигателем: Проверка совместимости катода с другими компонентами двигателя. Оценка влияния катода на общую эффективность и стабильность работы двигателя.

– Исследования катодов в "чистом" виде: Тестирование на имитаторе для оценки базовых характеристик катода без влияния других систем двигателя.

Экспериментальная проверка узлов и материалов катода для определения их долговечности и надежности.

– Исследования испытаний на сохраняемость и прочность при перегрузках: Тестирование катода на способность выдерживать длительные периоды без активации и сохранять работоспособность.

Испытания на прочность при механических и термических перегрузках, имитирующих условия реальной эксплуатации.

Дистанционное управление оборудованием через специальные панели управления позволяет проводить все эти испытания в безопасных и контролируемых условиях, минимизируя риски для персонала и обеспечивая точность и повторяемость результатов. Если у вас есть дополнительные вопросы по этой теме или нужна более детальная информация, пожалуйста, сообщите мне.

4.3 Порядок проведения испытания

Подготовка к испытаниям:

– Перед началом работ персонал должен пройти инструктаж по технике безопасности, так как испытания проходят в условиях высокого напряжения и вакуума. Инструктаж должен включать в себя изучение потенциальных опасных факторов, правил поведения в аварийных ситуациях и использования средств индивидуальной защиты.

– Необходимо убедиться, что все технологическое и вспомогательное оборудование находится в рабочем состоянии, прошло техническое обслуживание и готово к использованию.

– Доставка двигателя: Двигатель транспортируется из зоны хранения в испытательный зал на специальной тележке. Перемещение осуществляется с помощью подъемно–транспортного оборудования, с соблюдением мер предосторожности для предотвращения повреждений.

Установка двигателя на испытательный стенд:

- Подготовительные работы:
- Проверка работоспособности всех систем стенда.
- Диагностика стенда на наличие неисправностей.
- Калибровка измерительных приборов.
- Монтаж датчиков.

Подсоединение систем происходит в строгом соответствии с инструкцией по безопасности. При проведении работ необходимо присутствие представителя от завода–изготовителя для осуществления авторского надзора.

– Проверка герметичности: После установки и подключения всех систем проводится тщательная проверка герметичности всех соединений двигателя и датчиков.

Проведение испытаний:

– Эвакуация персонала: Перед началом откачки воздуха из вакуумной камеры подается сигнал, оповещающий персонал о необходимости покинуть испытательный зал. Персонал переходит в зал управления, где ведется наблюдение за ходом испытаний через систему видеонаблюдения.

– Откачка воздуха: С помощью вакуумных насосов воздух из камеры

откачивается до заданного значения разрежения. Все параметры процесса отображаются на экранах диспетчерского пульта в испытательном зале.

– Запуск двигателя: После достижения необходимого разрежения в вакуумной камере запускается двигатель.

– Сбор и обработка данных: Во время испытаний система сбора и обработки информации регистрирует и фиксирует все параметры работы двигателя.

– Мониторинг и управление: Персонал в зале управления следит за ходом испытаний на мониторах, корректирует параметры работы двигателя и стенда при необходимости.

– Анализ результатов: По завершении испытаний полученные данные анализируются с целью оценки соответствия характеристик двигателя заявленным требованиям. При необходимости проводятся дополнительные испытания или доработки двигателя.

Завершение испытаний:

– После завершения всех испытаний двигатель останавливается, вакуумная камера заполняется воздухом.

– От двигателя отсоединяются все системы коммуникаций: питание, рабочий газ, датчики.

– Двигатель аккуратно демонтируется с испытательного стенда и транспортируется в зону хранения или на следующий этап работ.

– По результатам испытаний оформляется отчет, в котором содержится подробная информация о ходе испытаний, полученных данных, выводах и рекомендациях.

5 УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

5.1 Магнитный экран для СПД

Использование магнитного экрана в разрядной камере стационарного плазменного двигателя (СПД) представляет собой новый подход к уменьшению эрозий стенок и повышению КПД двигателя.

Размещение магнитного экрана внутри разрядной камеры стационарного плазменного двигателя (СПД) позволяет не только более эффективно управлять зонами ускорения ионов и защиты стенок от эрозии, но и увеличивает общую надежность и эффективность двигателя.

Основные преимущества включения магнитного экрана в конструкцию СПД:

- Улучшенное управление магнитным полем: Благодаря магнитному экрану, магнитное поле в разрядной камере становится более однородным, что способствует более точному управлению ионными потоками, что напрямую влияет на повышение КПД.

- Снижение эрозии стенок: Магнитный экран снижает скорость распыления стенок, тем самым увеличивая срок службы камеры.

- Повышение КПД двигателя: Оптимизация зон ускорения ионов и снижение эрозии стенок приводят к повышению общего КПД двигателя.

- Использование пермендюра для изготовления магнитного экрана дополнительно усиливает эти преимущества, высокая магнитная проницаемость и температура точки Кюри пермендюра делают его идеальным материалом для магнитного экрана, обеспечивая стабильность и эффективность магнитного поля.

Эти преимущества показывают, что внедрение магнитного экрана может значительно улучшить работу СПД, снизив эрозию стенок и повысив общую эффективность двигателя.

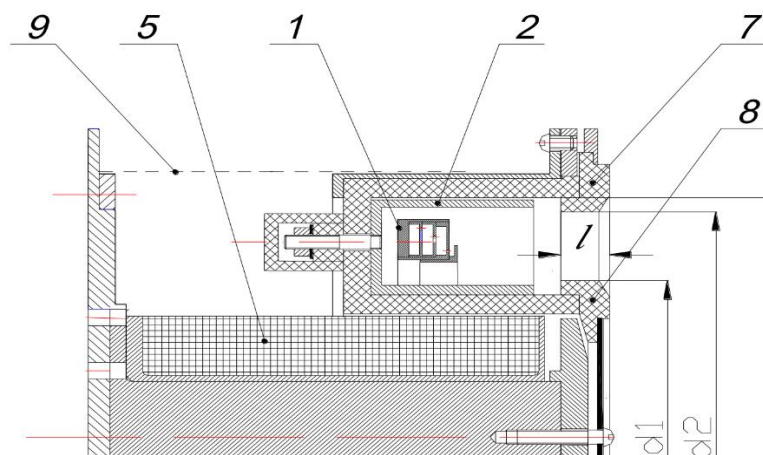


Рисунок 9 – Конструкционная схема СПД с магнитным экраном

1 – анод – газораспределитель; 2 – магнитный экран; 3,4 – магнитные полюса; 5,6 – катушки намагничивания; 7,8 – выходные кольца разрядной камеры; 9 – экранирующая сетка

5.2 Эрозия стенок разрядной камеры СПД

Разрядная камера (РК) – это ключевой элемент электрореактивных двигателей (ЭРД), который существенно влияет на срок их безотказной эксплуатации. Для прогнозирования ресурса ЭРД проводится анализ степени эрозии выходной части канала РК, которая зависит от следующих факторов:

1. Пространственное распределение плотности и структуры потока ионов в выходной части канала

Плотность ионного потока максимальна в начальной части слоя ионизации и ускорения (СИУ). Расположение СИУ определяется:

- Величиной магнитной индукции в канале РК
- Режимом работы двигателя, в частности, величиной тока разряда
- Расходом и видом рабочего тела (РТ)

Уменьшение расхода РТ приводит к смещению СИУ в сторону анода и, соответственно, зоны эрозии. Это связано с увеличением продольной протяженности (размера) СИУ при уменьшении расхода.

2. Эрозионная стойкость материала РК к ионному распылению

Эрозионная стойкость определяется:

- Свойствами материала РК

- Характером и параметрами потока ионов
- Технологией изготовления и обработки РК

Эрозия происходит за счет распыления материала ионами, которое зависит от их энергии, угла падения и материала мишени (РК).

Дополнительные факторы, влияющие на эрозию выходной части канала РК:

- Ток разряда: влияет на положение СИУ и, следовательно, на эрозию.
- Расход рабочего тела: влияет на давление в канале, концентрацию нейтральных атомов и параметры СИУ.
- Концентрация нейтральных атомов в ускорительном канале: влияет на толщину слоя и плотность потока ионов.
- Давление в канале РК: влияет на степень эрозии за счет столкновений ионов с атомами рабочего тела.
- Материал рабочего тела: определяет параметры потока ионов, эрозионную стойкость РК и влияние нейтральных атомов на эрозионный процесс.

Анализ эрозии выходной части канала РК позволяет оценить ресурс ЭРД и определить меры по его повышению, такие как:

- Оптимизация параметров потока ионов (плотность, структура и др.)
- Использование эрозионно-стойких материалов и покрытий
- Оптимизация конструкции РК (форма, размер, расположение)
- Регулирование рабочих режимов двигателя (расход, ток разряда)
- Применение защитных мер (экраны электроды, нейтрализаторы)

Учет этих факторов позволяет повысить ресурс СПД, обеспечить их надежную и эффективную работу и расширить возможности использования в различных космических миссиях.

5.3 Схема магнитной системы

Переход на магнитную систему с узкими полюсами позволит уменьшить размер полюсных наконечников, а следовательно, и уменьшить магнитную проводимость системы. Что, в свою очередь, приведет к уменьшению затрат

энергии на намагничивание, а также к улучшению условий ускорения частиц и увеличению тяговой эффективности.

Для дальнейшего повышения эффективности СПД было разработано ряд дополнительных конструктивных мер.

– Использование сверхпроводящих материалов. Сверхпроводящие материалы обладают очень низким электрическим сопротивлением, что позволяет создавать магнитные поля с очень большой напряженностью. Использование сверхпроводящих материалов в СПД позволило значительно увеличить градиент магнитного поля и, следовательно, повысить эффективность ускорения частиц.

– Применение постоянных магнитов. Постоянные магниты обладают постоянным магнитным полем, что позволяет значительно уменьшить потребление энергии на намагничивание. Использование постоянных магнитов в СПД позволило снизить эксплуатационные затраты и повысить надежность системы.

Помимо конструктивных усовершенствований, для повышения эффективности СПД также можно использовать новые методы управления системой.

– Оптимизация рабочих режимов СПД. Рабочие режимы СПД могут быть оптимизированы для достижения максимальной эффективности ускорения частиц. Оптимизация рабочих режимов может включать в себя регулировку тока в катушках намагничивания, изменение частоты тока и изменение формы магнитного поля.

– Использование специализированных программных пакетов. Для управления СПД используются специализированные программные пакеты. Разработка новых программных пакетов может значительно повысить эффективность управления системой и упростить ее эксплуатацию.

В результате проведенных усовершенствований СПД стали высокоэффективными системами, которые могут использоваться для различных приложений. Дальнейшее развитие СПД будет направлено на повышение их

эффективности, надежности и стоимости.

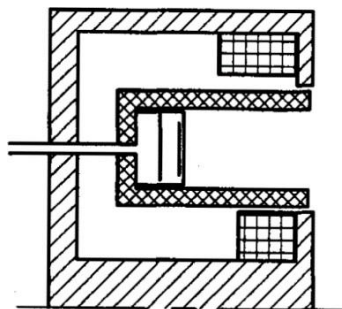


Рисунок 10 – Схема СПД с «узкими» полюсами катушки

6 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

6.1 Электро–пневмосхема СПД

Электро-пневмосхема двигательного модуля представляет собой сложную систему, обеспечивающую надежное и точное управление работой стационарного плазменного двигателя (СПД). Ключевые элементы этой системы:

- Термодроссель (ТД): Регулирует расход аргона, работая при давлении.
- Фильтры (Ф): Обеспечивают тонкую механическую очистку газа, предотвращая загрязнение элементов системы с малыми отверстиями.
- Пакет жиклеров (Ж): Позволяет дополнительно настроить расход аргона, необходимый для работы двигателя.
- Электроклапаны (ЭК): Используются для контроля подачи газа в двигатель и его отключения. Двойная конфигурация клапанов повышает надежность системы.

Электропитание к модулю подводится от блока системы электропитания (СЭП) и распространяется по различным цепям управления. Включая в себя питание электроклапанов, термодросселя, катушек электромагнита и анода.

Для уменьшения электромагнитных помех в системе используется согласующий электрический фильтр (ЭФ), состоящий из конденсатора (С), катушки индуктивности (L) и шунтирующего сопротивления (R). Параметры этих элементов подбираются в ходе испытаний для оптимизации работы СПД.

Элементы газового тракта и электрический фильтр могут быть размещены в пространстве крепежной фермы сегмента или на раме двигательного модуля, что позволяет гибко интегрировать систему в различные конструкции.

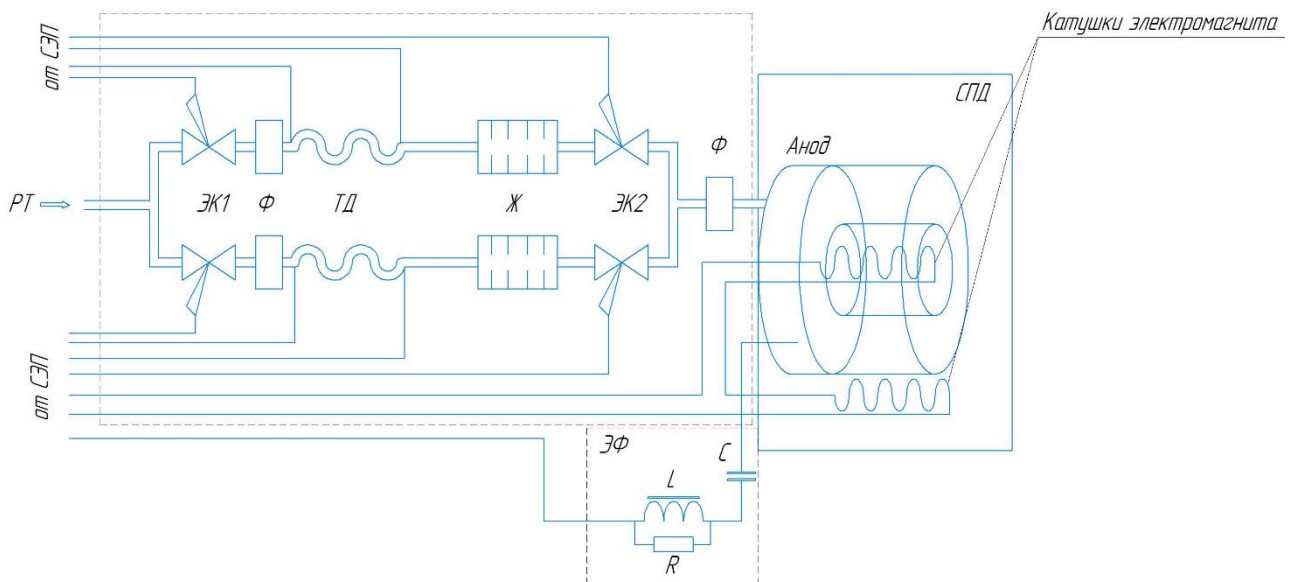


Рисунок 11 – Электро–пневмосхема двигательного модуля анода

Газовый тракт катода (см. рисунок 12), участвует в управлении и поддержании работы катода в стационарном плазменном двигателе. Вот более подробное описание его компонентов:

- Пуско-отсечной электроклапан (ЭК): Этот клапан контролирует начало и прекращение подачи газа в катод, что критично для запуска и остановки работы двигателя.

- Фильтр (Ф): Очищает газ от механических примесей перед его поступлением в катод, предотвращая тем самым загрязнение и износ.

- Пакет жиклеров (Ж): Регулирует конечный расход газа, обеспечивая точное дозирование необходимого для работы катода.

Цепи электропитания катодного модуля обеспечивают работу следующих элементов:

- Электроклапана: Питание электроклапана обеспечивает его функционирование в соответствии с заданными параметрами управления.

- Стартового нагревателя: Нагреватель подготавливает катод к работе, повышая его температуру до необходимого уровня для инициации плазменного разряда.

- Поджигного электрода: Используется для зажигания плазмы в катоде, что является начальным этапом работы двигателя.

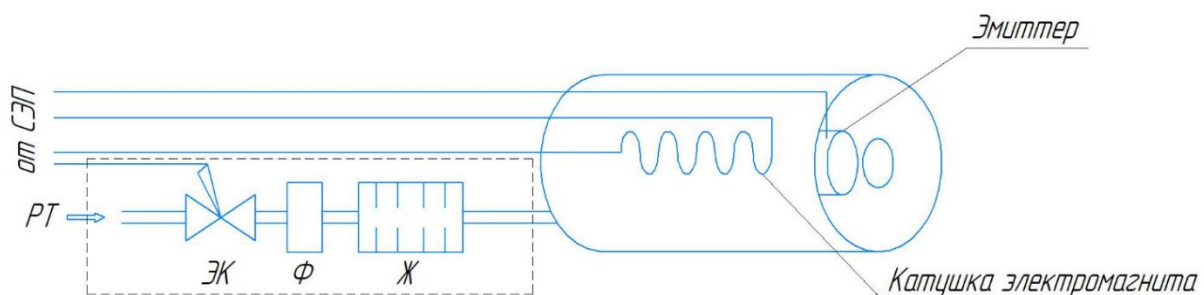


Рисунок 12 – Электро–пневмосхема модуля катода

Система хранения рабочего тела (РТ) обеспечивает стабильность центра масс и надежное снабжение двигательной установки (ДУ) рабочим телом. Компоненты системы:

- Бак с рабочим телом: Является основным хранилищем для РТ, его расположение оптимизировано для поддержания баланса центра масс КА.

- Заправочный клапан (ЗК): Используется для заполнения бака РТ перед запуском КА.

- Предохранительный клапан (ПК): Служит для предотвращения чрезмерного давления в баке, обеспечивая безопасность системы.

- Пусковой пиротехнический клапан (ПрК): Активируется для начала подачи РТ из бака в систему ДУ.

Электроклапаны (ЭК4) регулируют выход РТ из баков. Датчика давления (ДД1) осуществляет контроль давления РТ в баке.

После активации ПрК, РТ распределяется по системе через:

- Электроклапаны (ЭК1): Контролируют подачу РТ в магистрали.

- Механический редуктор давления (РД): Снижает давление РТ до рабочих параметров.

- Управляющие электроклапаны (ЭК2): Поддерживают необходимое давление в ресивере (РС), контролируемое датчиком давления (ДД2).

- Группа электроклапанов (ЭК3): Регулируют подачу РТ в активный сегмент ДУ.

- Магистраль с электроклапанами (ЭК5): Обеспечивает дублирование

функций основных магистралей.

Управление системой осуществляется через подсистему управления ДУ (СУ СХП). Она координирует работу всех элементов системы хранения и подачи РТ. Эта система обеспечивает надежное и эффективное функционирование космического аппарата, позволяя поддерживать работу двигательной установки в течение всей миссии.

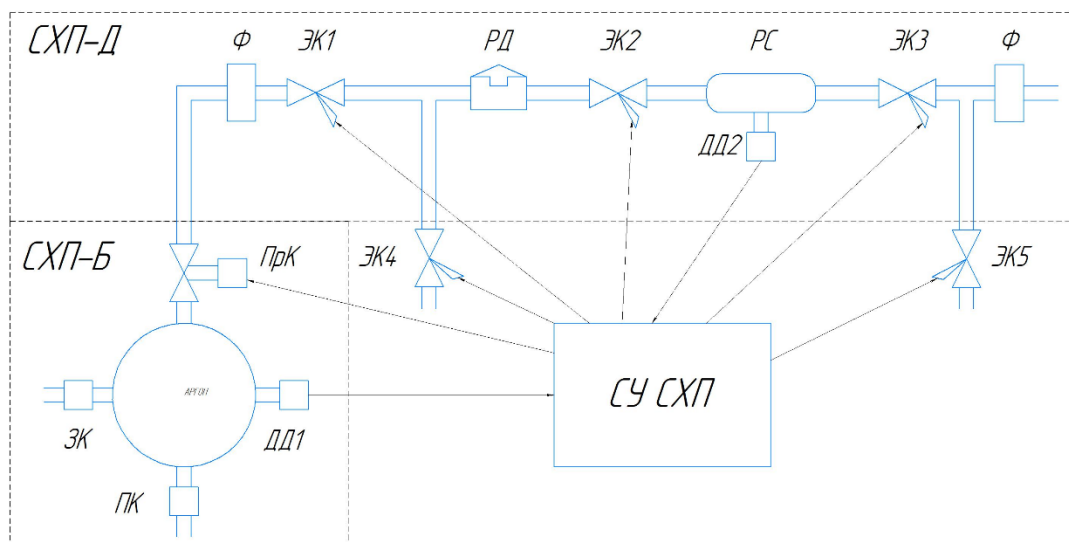


Рисунок 13 – Пневмосхема СХП

Блок системы электропитания осуществляет питание двигательной установки. Компонентов блока СЭП:

- Командный модуль СПУ У: Генерирует управляющие сигналы для блока питания и формирует информацию о состоянии ДУ.
- Блок преобразования напряжения: Преобразует напряжение для соответствия требованиям системы.
- Блок проверки целостности цепей: Проверяет целостность и работоспособность основных и резервных источников напряжения.

Для обеспечения надежности, блок питания включает в себя источники напряжения для каждого из следующих элементов и следующие компоненты:

- Основного разряда U_p
- Поджигного электрода катода U_n
- Электромагнита двигателя U_m

- Цепи накала катода U_n
- Датчик тока ДТ: Установлен в выходной части разрядной цепи для мониторинга тока.
- Блок управления расходом: Обрабатывает сигнал с ДТ и регулирует ток нагрева термодросселя.

Эта система электропитания обеспечивает стабильное и надежное функционирование двигательных модулей, что критически важно для успешной работы космического аппарата.

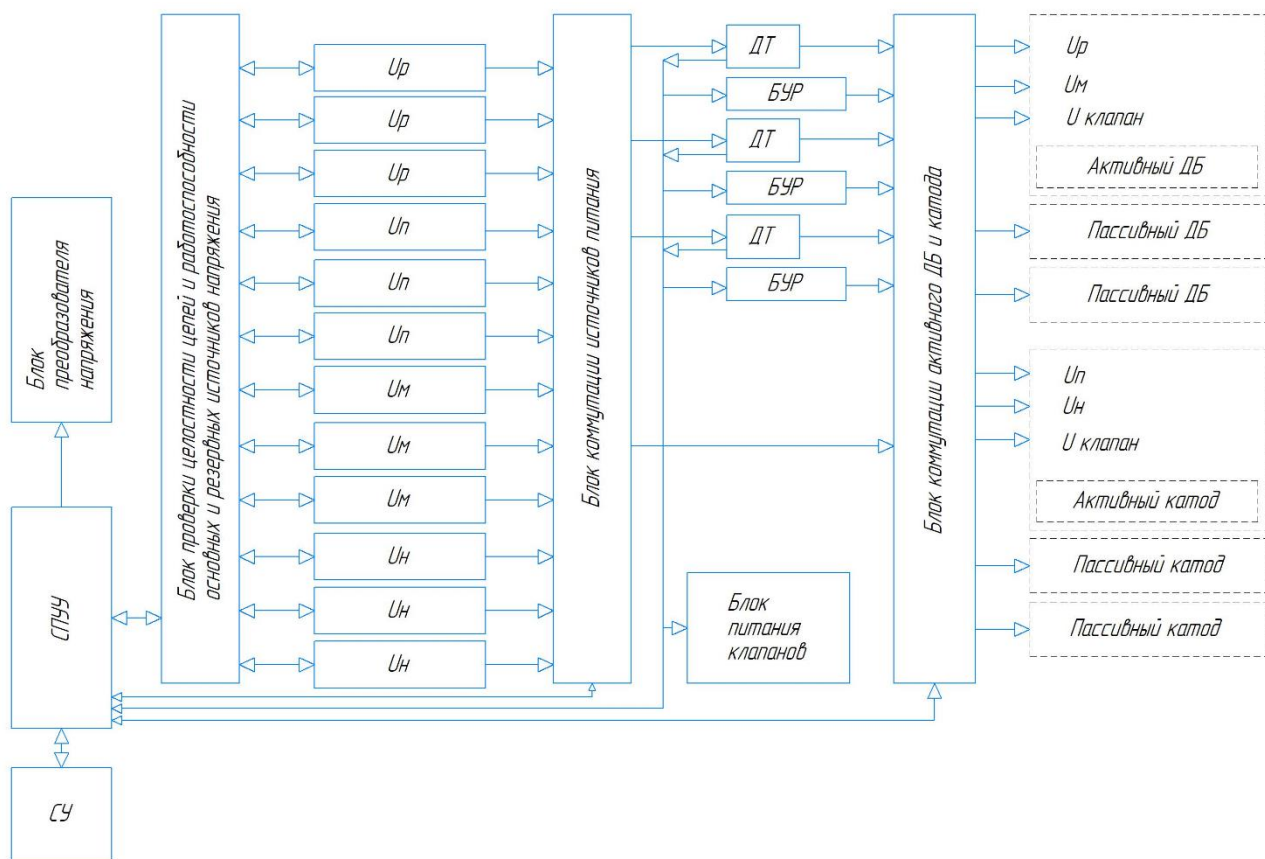


Рисунок 14 – Блок схема системы электропитания сегмента

Блок системы управления ДУ, управляет силовой установкой космического аппарата. Описание его функций и компонентов:

- Коммутация бортового питания: Переключает питание на активный сегмент и управляет включением и отключением двигателя.
- Контроль и управление системой хранения рабочего тела: Обеспечивает функционирование системы хранения до выведения аппарата на рабочую орбиту

и в течение активного существования.

Компоненты блока:

– АЗС – Блок коммутации входного питания

– СУ СПХ – Система управления системы подачи и хранения рабочего тела.

– СУ ДУ – Система управления двигательной установкой. Является центральным блоком управления, обрабатывая входящие данные и выдавая команды.

– СУ СЭП – Система управления системами электропитания: Координирует электропитание различных сегментов.

Эта система управления обеспечивает централизованное и точное управление силовой установкой, что важно для успешного выполнения миссии космического аппарата.

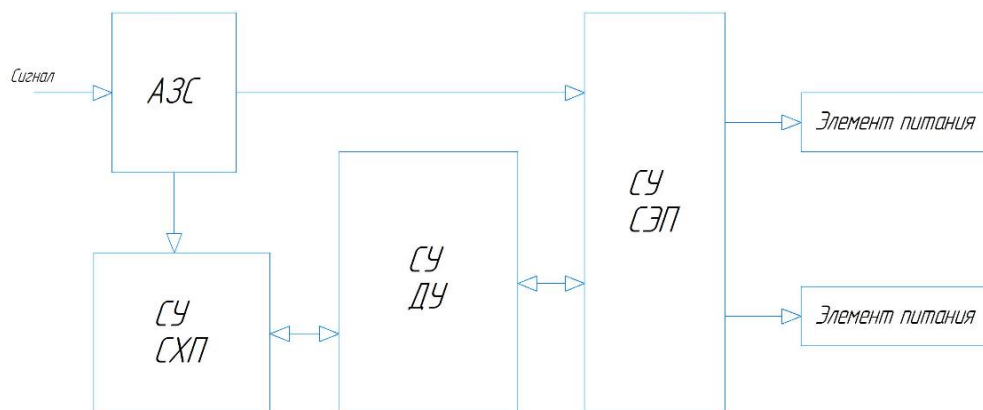


Рисунок 15 – Блок схема системы управления ДУ

6.2 Алгоритм управления ДУ СПД

Представленный алгоритм управления ДУ охватывает все основные операции подготовки, запуска и контроля, выполняемые на этапах проверок работоспособности, заправки рабочим телом, а также по командам системы управления в ходе космического полета. Стоит отметить, что данный алгоритм не является универсальным и может корректироваться в зависимости от особенностей конструкции ДУ и ее работы в условиях космического полета.

Предполетная подготовка:

Проверка работоспособности: Все проверки функциональности ДУ, включая герметичность системы, работоспособность клапанов и электронных компонентов, проводятся на специализированных испытательных стендах изготовителя. Тестирование осуществляется в соответствии с утвержденными нормативами.

Заправка рабочим телом: Заправка ДУ рабочим телом, например, сжатым газом, осуществляется с использованием заправочного клапана ЗК блока СХП–Б. Точное количество заправляемого газа определяется с помощью датчика давления ДД1 и данных о температуре бака. После заправки проводится контрольное взвешивание для точной оценки массы заправленного газа.

По завершении заправки блок СХП–Б герметизируется.

Проверка команд управления: На стартовой позиции, перед запуском КА, осуществляется комплексная проверка прохождения команд на открытие клапанов и работоспособности системы привода управления (СПУ) с помощью блока электрического имитатора работы ДУ.

Работа на орбите:

Запуск двигательной установки: После выведения КА на рабочую орбиту и успешной проверки всех систем, система управления (СУ) выдает команду на открытие пироклапанов ПрК блоков СХП–Б. Это приводит к заполнению СХП рабочим телом.

Управление подачей рабочего тела: Электроклапан ЭК1 блока СХП–Д регулирует подачу газа высокого давления. Совместная работа с клапаном ЭК4 обеспечивает перераспределение рабочего тела между баками, оптимизируя его использование и сохраняя положение центра массы КА. Давление хранения снижается редуктором РД до рабочего давления в ресивере РС и поддерживается с помощью открытия–закрытия клапана ЭК2. Управление клапаном ЭК2 осуществляется по командам от СУ СХП по сигналу с датчика давления ДД2. Подача газа в активный сегмент происходит при открытии клапана ЭК3.

Контроль и регулировка: В процессе работы ДУ система управления непрерывно отслеживает параметры работы, такие как давление, расход газа, тяга и т.д. На основе полученных данных СУ может корректировать работу ДУ.

Система управления активными двигателем и катодом получает команды от системы программного управления (СПУ) и обеспечивает комплексную работу всех элементов.

- Обеспечивается подача напряжения на все необходимые компоненты системы.

- Осуществляются проверки работоспособности всех электрических цепей, задействованных в работе двигателя и катода.

- На этом этапе происходит идентификация основных и резервных трактов питания: клапанов ВПК, основного разряда UP, поджигного электрода катода UN, электромагнита двигателя UM и накала катода UN.

Используя блок коммутации КДБ, система переключается на активные двигатель и катод, выбранные оператором.

Подаются команды на открытие:

- ЭК блока газораспределения БГР–К катода (обеспечивает подачу газа к катоду)

- Группы клапанов ЭК1 и ЭК2 блока БГР–ДМ (выбор основного или резервного тракта питания газом двигателя)

В результате активации электромагнитных клапанов, газ заполняет магистрали активных катода и двигателя, создавая условия для их работы.

Запуск:

Нагрев катода: Включается цепь накала UN, катод разогревается до рабочей температуры в течение некоторого времени.

Инициализация магнитного поля: Первоначально ток в цепи электромагнита UM минимален, магнитное поле слабое. Электроны от разогретого катода устремляются к аноду, создавая ток разряда, который фиксируется датчиком тока ДТ.

Включение рабочего режима: Сигнал с датчика ДТ поступает в блок контроля и диагностики БКД. БКД подает номинальный ток в цепь электромагнита УМ, создавая рабочее магнитное поле. Двигатель выходит на рабочий режим.

Отключение нагрева катода: Цепь накала УН отключается после достижения катодом рабочей температуры.

Работа:

Поддержание рабочего режима: БУР регулирует ток нагрева термодросселя, поддерживая тем самым необходимую температуру катода и, следовательно, требуемую тягу двигателя.

Контроль и управление: По заранее заложенной программе происходит контроль и корректировка режима работы электромагнита в зависимости от выработанного ресурса двигателя.

Защита от нештатных ситуаций: При возникновении резкого скачка тока разряда (режим КЗП — режим короткозамкнутого промежутка) формируется сигнал телеметрии, двигатель отключается, а информация о нештатной ситуации передается в центр управления.

Автоматический перезапуск: При отсутствии команды на выключение после КЗП происходит автоматическая попытка повторного запуска двигателя.

Для обеспечения равномерной наработки элементов ДУ, повышающей надежность двигательной установки, производится периодическая смена активных и пассивных двигательных модулей и катодов.

7 БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ С СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Хотя СПД предназначены для работы в открытом космосе, они также могут представлять опасность для жизни человека и на Земле. Неправильное обращение с СПД, включая сам двигатель и его рабочее тело, может привести к серьезным последствиям для здоровья и окружающей среды. Чтобы избежать возможных происшествий, крайне важно соблюдать строгие меры безопасности при работе с СПД и его рабочим телом.

В данном разделе мы рассмотрим основные правила и рекомендации по безопасной работе с аргон и при проведении испытаний СПД.

7.1 Меры безопасности при работе с аргонном

Транспортировка и хранение аргона осуществляются в стальных сосудах, наружная поверхность которых должна быть окрашена в серый цвет, нанесена надпись «АРГОН» зеленым цветом.

Остаточное давление в баллонах должно составлять не меньше 1 атмосферы. Такое условие должно обеспечить отсутствие различного рода загрязнений и примесей в аргоне.

К обслуживанию сосудов, на которые распространяются «ДНАОП 0.00–1.07–94 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», допускаются лица, достигшие 18–летнего возраста, прошедшие медицинский осмотр, обучение по соответствующей программе, аттестованные и имеющие удостоверение на право обслуживания сосудов.

Ответственными за исправное состояние и безопасное действие сосудов, а также ответственными по надзору за техническим состоянием и эксплуатацией баллонов назначаются приказом лица, прошедшие в установленном порядке проверку знаний ДНАОП 0.00–1.07–94 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

Все баллоны должны иметь вентили, плотно ввернутые в отверстия горловины. Замена или ремонт вентиля должна осуществляться на пунктах освидетельствования баллонов.

На верхней сферической части баллона должны быть выбиты (отчетливо видны) следующие данные:

- товарный знак предприятия изготовителя;
- номер баллона;
- фактическая масса пустого баллона (кг) с точностью до 0,2 кг (емкостью от 12 до 55 л);
- дата (месяц, год) изготовления и следующего освидетельствования;
- рабочее давление (Р), МПа (кгс/см²);
- пробное гидравлическое давление (П), МПа (кгс/см²);
- емкость баллона (л) с точностью до 0,3л (емкостью от 12 до 55 л);
- клеймо ОТК предприятия–изготовителя круглой формы диаметром 10 мм.

В процессе транспортировки следует проследить, чтобы баллоны были расположены одинаково, а именно, вентили были направлены в одно и то же направление.

Для заправки аргоном допускаются исключительно аттестованные емкости с исправными вентилями, на корпусе сосуда не должно быть трещин, вмятин, ржавчины и прочих дефектов; необходимо проследить, чтобы во время перевозки вентили не подвергались какому–либо механическому воздействию, поэтому их лучше всего будет прикрыть специальными колпаками.

Баллоны должны иметь рабочее давление более 150 атмосфер, а пробное давление не должно быть меньше 225 атмосфер. Приемка емкостей осуществляется в соответствии с нормами ГОСТ 10157–79.

При эксплуатации аргона на предприятии обязательно назначение ответственного работника, контролирующего соблюдение техники безопасности.

Для работы с аргоном необходимо использовать специально разработанное оборудование, предназначенное для инертных газов. Обычные приспособления не подходят, так как могут стать причиной аварий и несчастных случаев.

При работе с аргоном необходимо обеспечить хорошую вентиляцию помещения, которая исключит скопление газа в закрытом пространстве. Утечка аргона создает опасные концентрации, способные нанести вред здоровью человека.

Согласно ГОСТ 10157-2016 в местах с риском скопления аргона следует проводить газовый контроль воздуха, отслеживая концентрации кислорода и принимая необходимые меры при превышении допустимого порога в 19 %. Снижение концентрации кислорода в помещении до 18% вызывает сонливость, головные боли, снижение трудоспособности. При меньшем содержании кислорода атмосфера становится непригодной для длительного пребывания человека. Вдыхание аргона вызывает мгновенное удушье и потерю сознания. Поэтому при работе с аргоном необходимо контролировать герметичность трубопроводов, арматуры и других элементов, предотвращая утечки.

В случаях, когда работа выполняется в помещении или сосуде с пониженным содержанием кислорода, работник должен использовать изолирующий противогаз. Такие работы проводятся с участием не менее двух человек.

При отравлении аргоном необходимо немедленно эвакуировать пострадавшего из опасной зоны, провести искусственное дыхание и обеспечить приток кислорода.

Помимо перечисленных мер безопасности, при работе с аргоном необходимо соблюдать дополнительные меры предосторожности:

— Запрещено курить вблизи рабочего места с аргоном, поскольку газ легковоспламеняем.

— Следует избегать контакта газа с кожей и глазами, так как он может вызвать раздражение или ожоги.

— Работники должны быть защищены специальными средствами индивидуальной защиты, включая респираторы, перчатки и защитные очки.

— Для обнаружения утечек газа необходимо использовать специальные приборы, такие как газоанализаторы.

— Работы с аргоном следует проводить в хорошо освещенном месте, где работник может легко видеть свое рабочее пространство.

Соблюдение правил хранения, транспортировки, использования и мер безопасности при работе с аргоном позволяет минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций и обеспечить безопасность рабочего места.

7.2 Меры безопасности при проведении испытаний СПД

Измерения и испытания электрооборудования проводятся в строгом соответствии с нормами, изложенными в правилах устройства электроустановок (ПУЭ-7), требованиями производителей оборудования и стандартами. Испытания электроустановок осуществляются в объеме, установленном нормами и правилами их эксплуатации.

Электролаборатории, используемые для проведения испытаний и измерений электрооборудования, подлежат обязательной регистрации в органах Ростехнадзора. Регистрация подтверждает соответствие испытательного оборудования установленным требованиям и наличие квалифицированного персонала.

Перед началом испытаний или измерений необходимо провести подготовку объекта и средств измерения. Обесточивание оборудования, отключение нагрузки и снятие остаточного заряда являются необходимыми мероприятиями. Кроме того, следует отключить напряжение и снять остаточный заряд с соседних объектов, если не исключен доступ к ним или риск поражения электрическим током.

При проведении испытаний на одном участке вместе с руководителем работ или производителем работ может оставаться один из членов бригады, имеющий группу по электробезопасности не ниже III. Он должен пройти инструктаж от руководителя работ.

Место проведения испытаний или измерений должно быть надежно ограждено с целью обеспечения безопасности персонала. Для обеспечения безопасности персонала при проведении испытаний или измерений могут устанавливаться зоны безопасности. К этим зонам предъявляются следующие требования:

— Минимальное расстояние от оголенных токоведущих частей до границ зоны безопасности составляет не менее 0,8 м.

— Зона безопасности должна быть свободна от посторонних предметов и персонала.

— На границах зоны безопасности устанавливаются указатели со знаком "Опасность, высокое напряжение".

8 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ СПД

В данной части бакалаврская работы приводится расчет экономического проектирования СПД.

8.1 Календарный план работы над проектированием двигательной установки

План проведения работ представлен в таблице 6.

Таблица 6 – План проведения работ

№	Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, дни
1	Разработка ТЗ	Инженер	2
2	Изучение необходимой литературы	Инженер	2
3	Расчет основных характеристик	Инженер	4
4	Разработка чертежей	Инженер	3
5	Изготовление чертежей	Инженер	5
6	Подготовка документации по безопасности труда	Инженер	2
7	Подготовка всей документации	Инженер	4
8	Сдача результатов проектирования	Инженер	1
Итого			23

8.2 Себестоимость двигателя

В себестоимость работы необходимо провести расчет всех затрат, необходимых для разработки двигателя. Основные затраты:

1. Основная и дополнительная заработная плата основных

исполнителей,

2. Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования,

3. Затраты на расходные материалы,

4. Прочие расходы,

5. Накладные расходы.

Расчет затрат ведется в условных единицах (у.е.): 1 у.е. приравнивается к 1-му рублю.

Таблица 7 – Затраты на расходные материалы

Наименование	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма затрат, в у.е.
Канцелярские товары	–	–	1000
Офисная бумага для печати	1	335	335
Тонер для принтера Phaser 3020	1	790	790
MS Office 2021	1	6490	6490
КОМПАС v20	1	1490	1490
Итого			10105

Таблица 8 – Основная заработная плата разработчиков

Наименование этапов	Исполнители	Трудоем- кость, чел/день	Заработная плата, у.е.	Затраты по заработной плате, у.е.
Разработка ТЗ	Инженер	1/2	15500	1000
Изучение необходимой литературы	Инженер	1/2	15500	1000
Расчет основных характеристик	Инженер	1/4	15500	2000

Разработка чертежей	Инженер	1/3	15500	1500
Изготовление чертежей	Инженер	1/5	15500	2500
Подготовка документации по безопасности труда	Инженер	1/2	15500	1000
Подготовка всей документации	Инженер	1/4	15500	2000
Сдача результатов проектирования	Инженер	1/1	15500	500
Итого				11500

Дополнительная заработная плата составляет 20% от основной:

$$11500 \cdot 20\% / 100\% = 2300 \text{ у.е.}$$

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

$$(11500 + 2300) \cdot 30,2\% / 100\% = 4167,6 \text{ у.е.}$$

Накладные расходы составляют 180–250% от основной заработной платы:

$$11500 \cdot 180\% / 100\% = 20700 \text{ у.е.}$$

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

$$З_{пр} = N \cdot С_{мч} \cdot К_{загр}, \quad (46)$$

где N – количество часов, необходимых для разработки двигателя и подготовку технической документации всех видов работ при проектировании:

$$N = 23 \cdot 24 = 552 \text{ часа.}$$

$С_{мч}$ – стоимость машино–часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 65 у.е.,

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

$$Зпр = 552 \cdot 65 \cdot 0,7 = 25116 \text{ у.е.};$$

Таблица 9 – Себестоимость проектирования

Наименование расходов	Затраты, у.е.
Расходные материалы	10105
Основная заработная плата разработчиков	11500
Дополнительная заработная плата разработчиков	2300
Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	4167,6
Накладные расходы	20700
Прочие расходы	25116
Итого	73888,6

Таблица 10 – Расходные материалы

Наименование изделия	Единицы измер.	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма, у.е.
Сталь X18H9T	кг	100	144,8	14480
Высокотемпературный провод марки ПОЖ-700М	м	100	110	11000
Керамический материал АБН	кг	50	1541	77050
Итого				102530

Таблица 11– Затраты на заправку СПД

Наименование оборудования	Ед. измер.	Кол-во	Цена, у.е.	Сумма, у.е.
Рабочий газ аргон (в баллонах)	штук	10000	100	1000000
Итого				1000000

8.3 Оценка косвенного экономического эффекта

Исследование космического пространства Солнечной системы с использованием СПД предоставляет ряд преимуществ перед применяемыми химическими двигателями, которые отличаются высокой стоимостью производства и проектирования. Использование СПД подразумевает:

- Применение дешевых материалов, что существенно снижает расходы на производство.
- Упрощенная конструкция, приводящая к снижению стоимости изготовления.
- Использование более экономичного рабочего тела, такого как аргон, что позволяет минимизировать эксплуатационные затраты.

Совокупность этих факторов делает СПД более экономичным решением для освоения космического пространства. Благодаря такой возможности данный вид двигателей активно рассматривается для использования в космических аппаратах как отечественного производства, так и зарубежного.

Наиболее целесообразным представляется использование СПД в качестве маршевых двигателей космических аппаратов. Это позволит существенно снизить стоимость выведения на орбиты других планет различных спутников, включая спутники связи, зондирования и навигации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной бакалаврской работе, исходя из исходных данных, было осуществлено проектирование электрического ракетного двигателя.

В проектной части был осуществлён расчет основных характеристик СПД двигателя. Получены следующие параметры:

- Ток разряда двигателя: $I_p = 0,037$ А;
- Напряжение разряда: $U_p = 120363$ В;
- Мощность разряда двигателя: $N_{p(дв)} = 4503$ Вт;
- Время работоспособности двигателя: $\tau = 42464$ часов;
- Тяговая эффективность двигателя (к.п.д.): $\eta = 73,48$ %.

Для осуществления работы СПД был выбран источник питания РИТЭГ «ИУЭ–1М» Российского производства в количестве 4 изотопных генераторов мощностью 2,2 кВт.

Для продления срока активного существования, повышения КПД и снижения эрозии стенок камеры используется магнитный экран, а также подобраны материалы и выбрана схема с «узкими» полюсами и вынесенными магнитными катушками.

В специальной части была спроектирована электро–пневмо схема двигательной установки и её алгоритм управления.

В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрены особенности работы с рабочим телом аргоном, с баллонами, работающими под высоким давлением и с проведением испытаний СПД.

В экономическом разделе был произведен расчет косвенного экономического эффекта при проектировании СПД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хартов, С.А. Расчет элементов двигательной установки со стационарным плазменным двигателем / С.А. Хартов Учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ–ПРИНТ, 2009. – 84с.: ил.
2. Гопанчук, В.В. Электрореактивные двигатели для малых космических аппаратов / В.В. Гопанчук, М.Ю. Потапенко – Вестник Российского государственного университета им И. Канта, 2012. – 60–67 с.
3. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов. Патент 2447625 Рос.Федерация. № 2010110866; заявл. 22.03.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10.
4. Гопанчук, В.В. Повышение эффективности газораспределения в ускорительном канале электрореактивного двигателя / В.В. Гопанчук, М.Ю. Потапенко – Вестник Сибирского государственного университета имени академика М.Ф. Решетнева, 2011. – 104–109 с.
5. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов / Л.А. Квасников [и др.] – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 480 с.
6. Титов, М.Ю. Влияние рабочего тела на проектные параметры космических аппаратов с ЭРД. / М.Ю. Титов – Статья 2023. – 52–63 с.
7. Гришин, С.Д. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков– М.Машиностроение 1989. – 216 с.
8. ХАБР. РИТЭГ: прозаичные тепло и электричество для космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/231197> (дата обращения: 21.04.24)
9. Комаров, А.А. Разработка модели эрозии разрядной камеры стационарного плазменного двигателя. / А.А. Комаров, А.В. Румянцев – Статья 2017. – 53–58с.
10. Аполлонский, С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов / С.М. Аполлонский. – Справочник 1988. – 226 с.

11. Ким, В.П. Модель ионного потока и методика расчета эрозии стенок разрядной камеры стационарного плазменного двигателя. / В.П. Ким, В.К. Абгарян – Статья в журнале – научная статья. Журнал технической физики 2017. – 78–85 с.
12. Орехов, А.Н. Исследование относительной эрозии изолятора разрядной камеры стационарного плазменного двигателя. / А.Н. Орехов. – Статья в журнале. Журнал технической физики 2017. – 33–38 с.
13. Разработка физико–технических основ повышения ресурса стационарных плазменных двигателей второго поколения. / В.П. Ким [и др.] – Статья НИИПМЭ МАИ, 2003. – 56–69 с.
14. Горшков, О.А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов / О.А. Горшков, В.А. Муравлёв, А.А. Шагайда – под ред. Академика РАН А.С. Коротеева М.: Машиностроение, 2008. – 280 с.
15. Гуров, А.Ф. Конструирование и проектирование двигательных установок: Учебник для авиационных высших учебных заведений. // А.Ф. Гуров., Д.Д. Севрук., Д.Н. Сурнов. – под ред А.Ф. Гуров 2–е издание., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 322 с.