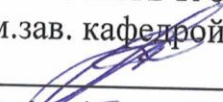


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам.зав. кафедрой


В.В. Соловьев
« 15 » июня 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА


на тему: Проектирование электроракетного двигателя для межпланетных космических аппаратов и его экспериментальная отработка в наземных условиях

Исполнитель
студентка группы 717–об


14.06.21
(подпись, дата)

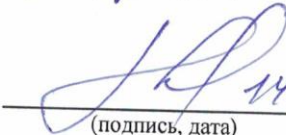
А.В.Винникова

Руководитель
доцент, канд.тех.наук.


14.06.21 г.
(подпись, дата)


А.В. Козырь

Научный консультант


14.06.21 г.
(подпись, дата)

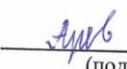
К.А.Насуленко

Консультант по БЖД
канд.физ.– мат наук.


14.06.2021
(подпись, дата)

В.Н. Аверьянов

Нормоконтроль

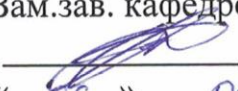

14.06.2021
(подпись, дата)

М.А. Аревков

Благовещенск 2021

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

Факультет инженерно–физический
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ
Зам.зав. кафедрой
 В.В. Соловьев
« 26 » 04 2021 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студентки Винниковой Алины Вадимовны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование электроракетного двигателя для межпланетных космических аппаратов и его экспериментальная отработка в наземных условиях

(утверждена приказом от 05.04.2021 №658–уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15 июня 2021

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: тяга двигателя 1,5 ньютона, рабочий газ аргон, суммарный расход $0,05 \cdot 10^{-3}$ килограмм в секунду.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: расчет геометрических и энергетических характеристик СПД и катода компенсатора, расчет прочности анода, описание технологии проведения испытаний, требования безопасности при проведении испытаний, экономическое обоснование внедрения разработки.


5. Перечень материалов приложения: общий вид, схема членения, конструктивно–компоновочная схема двигательной установки и стенда для испытаний ЭРД, электро–пневмосхема анода и катода, структурная схема ДУ.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Насуленко К.А.

7. Консультант по БЖД: канд. физ.– мат наук. Аверьянов В.Н.

8. Дата выдачи задания: 26.04.2021г

Руководитель выпускного квалификационного проекта: доцент, канд.тех.наук. Козырь А.В.

Задание принял к исполнению (дата): 26.04.21 

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 88 страниц, 20 рисунков, 8 таблиц, 1 приложение 10 источников.

ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (ЭРД), СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (СПД), АНОД, КАТОД – КОМПЕНСАТОР, КПД, ВРЕМЯ РАБОТЫ, РАБОЧЕЕ ТЕЛО, ЖИКЛЕР, ТЕРМОДРОССЕЛЬ, ПРОЧНОСТЬ, ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ, РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА, МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ, НАПРЯЖЕННОСТЬ, МОЩНОСТЬ РАЗРЯДА, ТЯГА, МАССОВЫЙ РАСХОД

В работе рассмотрены конструктивные схемы строения стационарного плазменного двигателя и катода – компенсатора, рассчитаны основные геометрические и энергетические характеристики, произведен расчет на прочность анода.

Цель работы – проектирование электроракетного двигателя для межпланетных космических аппаратов и описание его экспериментальной отработки в наземных условиях

Задачи:

- 1) Изучить конструкцию и принцип действия СПД;
- 2) Рассмотреть электро–пневмосхему двигателя, а также алгоритм его управления
- 3) Рассчитать основные геометрические размеры и энергетические параметры двигателя и катода – компенсатора;
- 4) Оценить время работоспособности двигателя;
- 5) Рассчитать систему хранения и подачи рабочего тела и систему электропитания СПД;
- 6) Произвести расчет на прочность анода СПД;
- 7) Описать технологию проведения испытаний СПД;

- 8) Описать меры безопасности при проведении испытаний двигателя;
- 9) Экономически обосновать разработку

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения и сокращения	7
Введение	8
1 Описание конструкции стационарного плазменного двигателя	10
1.1 Конструкция СПД двигателя	11
1.2 Детальное конструктивное выполнение двигательного модуля СПД	12
1.3 Электро–пневмосхема двигателя	15
1.4 Элементы двигательной установки	20
2 Основные проектные параметры	22
2.1 Исходные данные	22
2.2 Расчет основных энергетических характеристик и основных размеров СПД	23
2.3 Оценка времени работоспособности двигателя	33
2.4 Определение основных параметров катода – компенсатора	37
2.5 Расчёт системы хранения и подачи рабочего тела	43
2.5.1 Определение основных параметров бака для хранения рабочего вещества	44
2.6 Расчет системы электропитания СПД	48
3 Прочность СПД	51
3.1 Определение напряжение и запаса прочности цилиндрического анода по длине анода	51
3.2 Напряжение в оболочке при наличии перепада по толщине анода	57
4 Технология проведения испытаний СПД	61
4.1 Виды наземных испытаний СПД	61
4.1.1 Ресурсные испытания двигателя	61
4.1.2 Определение величины загрязнения двигателя	61
4.1.3 Испытания катодов–компенсаторов	62
4.2 Технология измерения параметров потока ускоренных ионов в струе СПД	64
4.2.1 Порядок проведения испытания	65
5 Безопасность жизнедеятельности при испытаниях электроракетного двигателя	67

5.1 Безопасность персонала при подаче электропитания на электроракетный двигатель на испытательном стенде.	67
5.2 Требование безопасности при проведении испытаний	70
5.3 Безопасность труд персонала при работе с вакуумной камерой при испытания электроракетного двигателя.	72
5.3.1 Общие требования	72
5.3.2 Правила по безопасности труда при испытании изделий	72
5.3.3 Требования к эксплуатации камер	73
6 Экономическое обоснование разработки и внедрения электроракетного двигателя для межпланетного перелета	75
6.1 Возможный рынок применения электроракетного двигателя для межпланетного перелета	75
6.2 Оценка конкурентоспособности электроракетного двигателя для межпланетного перелета	77
6.3 Себестоимость электроракетного двигателя для межпланетного перелета	77
6.4 Оценка косвенного экономического эффекта	82
Заключение	84
Библиографический список	88
Приложение А	89

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- БУР – блок управления расходом;
- ДД – датчик давления;
- ДЗЗ – дистанционное зондирование земли;
- ДУ – двигательная установка;
- Ж – жиклер;
- ЗК – заправочный клапан;
- КА – космический аппарат;
- КДБ – блок коммутации двигателя;
- КЛА – космический летательный аппарат;
- ПК – предохранительный клапан;
- ПрК – пиротехнический клапан;
- РД – редуктор давления;
- РК – разрядная камера;
- РКТ – ракетно–космическая техника;
- РС – ресивер;
- РТ – рабочее тело;
- САС – срок активного существования;
- СПД – стационарный плазменный двигатель;
- СПУ – система программного управления;
- СУ – система управления;
- СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела;
- СЭП – система электропитания;
- ТД – термодроссель;
- УЗД – ускоренный замкнутый дрейф;
- Ф – фильтр;
- ЭК – электроклапан;
- ЭРД – электрический ракетный двигатель;
- ЭФ – электрический фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электроракетные двигатели заняли нишу наиболее перспективных и эффективных двигателей, применяемых для решения задач РКТ. ЭРД используют в качестве корректирующей двигательной установки для ликвидации ошибок выведения, маневрирования между орбитами и вывода КА на необходимую орбиту, а также для поддержания орбитальных параметров. С каждым годом круг задач расширяется, теперь ЭРД нужны не только для решения маршевых и буксирных задач, но и для решения прикладных и научных: проверка работоспособности новых технологий РКТ, проведение научных исследований и получение информации в процессе ДЗЗ. Следовательно, возрастает нужда в создании новых вариантов конструкций ЭРД, учитывающих прошлый опыт и новые потребности.

Принципиальная особенность ЭРД в отличие от химических ракетных двигателей заключается в том, что для создания тяги используется электрическая энергия бортовой энергоустановки.

Электрические ракетные двигатели обладают меньшей тягой, но при этом позволяют достичь далеких целей и в более короткий срок. Использование ЭРД в ДУ КА в большинстве случаев способствует существенному увеличению массы выводимой полезной нагрузки и продлению срока активного существования КА.

В данной работе для выполнения поставленных задач был выбран стационарный плазменный двигатель.

Целью работы является разработка СПД двигателя с повышенным значением мощности и высоким удельным импульсом тяги.

Новизна работы заключается в следующем:

– произведен расчет оптимальных геометрических параметров ДУ с повышенным значением тяги и массового расхода;

– увеличено количество ампер–витков в катушках намагничивания для обеспечения эффективной работы при повышенных значениях тяги и разрядных напряжений;

– применен магнитный экран в разрядной камере для уменьшения скорости износа стенок камеры;

– в качестве рабочего тела использован инертный газ аргон.

Практическая применяемость такого ЭРД заключается в том, что в последние годы развитие РКТ направлено на увеличение срока активного существования КА. А разработанная ДУ может обеспечить не только оптимальные значения САС, но и за счет возможности увеличения значений удельного импульса тяги и мощности вывести большую массу полезной нагрузки.

1 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

СПД известен также как двигатель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗД). За рубежом он носит название «холловский двигатель», так как работает на эффекте Холла. Образец такого устройства был разработан в СССР под руководством профессора А.И. Морозова в институте Атомной энергии им. Курчатова (ИАЭ). Принцип действия (создания тяги) СПД основан на взаимодействии заряженных частиц плазмы с продольным электрическим и поперечным магнитным полями.

Принцип действия СПД основан на следующем алгоритме: на анод-газораспределитель, расположенный внутри керамической разрядной камеры, подается положительный заряд, а на катод-компенсатор содержащий эмиттер электронов, обдуваемый РТ и подогреваемый нагревателем отрицательный. От нагрева катод испускает электроны, так как они отрицательно заряжены, то они отталкиваются от катода и следовательно, притягиваются к положительно заряженному аноду.

По дороге к аноду электроны встречаются с магнитным полем, созданным магнитной катушкой и магнитопроводом. Сталкиваясь, с магнитным полем электроны не могут дальше двигаться, и они начинают свое движение по вращательной траектории. Вокруг оси двигателя. Все это движение происходит в газоразрядной камере.

В район анод подается инертный газ, газ пытается выйти наружу, но по дороге попадает в облако электронов. Электроны, сталкиваясь с атомами рабочего тела, выбивают из них их электроны и в результате образуется плазма, РТ ионизируется. При столкновении часть электронов теряют свою скорость и падают на анод, а так как ионы РТ положительно заряжены, то следовательно они отталкиваются от анода и разгоняются до высоких скоростей проходят через разрядный канал и облако оставшихся электронов наружу мимо катода-компенсатора и захватывают часть электронов, исходящих от него. На выходе получаем

нейтральную плазму, которая движется с большой скоростью, что и образует обратный импульс и создает тягу КА.

1.1 Конструкция СПД двигателя

Стационарный плазменный двигатель представляет собой ускоритель с замкнутым дрейфом электронов (УЗД). Современная конструктивная схема СПД (см. рисунок 1.1) содержит анод–газораспределитель 1, расположенный внутри керамической разрядной камеры (РК) 3, стенки которой образуют ускорительный канал кольцевой формы, катод–компенсатор (К–К) 2 и магнитную систему, включающую наружный полюс 4, катушки намагничивания 5, центральный сердечник 6 с внутренним полюсом 7 и магнитопровод 8. В качестве рабочих тел (РТ) в СПД могут применяться инертные и активные газы, их смеси, щелочные металлы и др. В качестве катода в СПД (см. рисунок 1.2), используют газоразрядный источник электронов типа полого катода, содержащий эмиттер электронов 9, обдуваемый потоком рабочего вещества и подогреваемый нагревателем 10. Зажигание разряда осуществляется при помощи специального поджигного электрода 11[2].

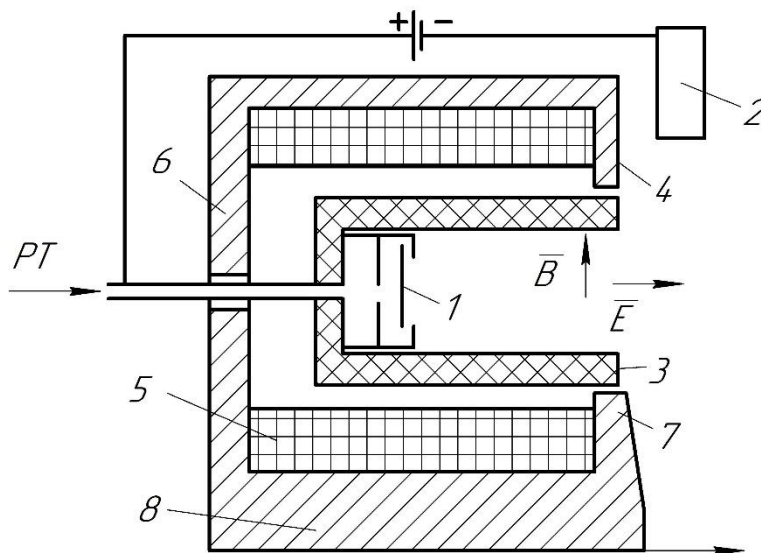


Рисунок 1.1 – Конструктивная схема СПД

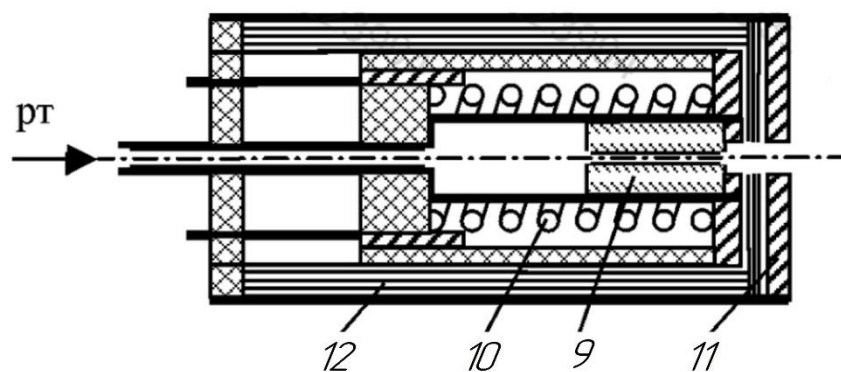


Рисунок 1.2 – Схема катода–компенсатора СПД

Часть электронов, которые эмиттирует катод направляется в ускорительный канал газоразрядной камеры для создания и поддержания горения заряда (плазмы), а другая часть – присоединяется к истекающей из двигателя струе и компенсирует ее объемный заряд. В силу своей двойной функции катод в СПД получил название «катод – компенсатор»

1.2 Детальное конструктивное выполнение двигательного модуля СПД

Конструкция двигательной установки зависит от назначения самого двигательного модуля и КА, а также от условий размещения двигателя на космическом аппарате. В конструктивной схеме СПД основу силовой схемы составляет магнитная система, на которой смонтированы все элементы. Она выполнена в виде фланца с центральным сердечником, на котором намотана внутренняя катушка электромагнита и закреплен внутренний полюс. Анод–газораспределитель представляет собой полукольцевую коробку, содержащую перегородки с отверстиями малого диаметра. Такая схема в виде разделяющих ступеней газораспределения служит для выравнивания поступающего рабочего тела в разрядную камеру в условиях перехода от непрерывного к свободно молекулярному течению газа.

Керамическая разрядная камера выполняется в виде монолитной детали с кольцевым пазом, образующим ускорительный канал. Для крепления разрядной камеры к магнитной системе используется переходная металлическая обойма, которая выполнена из материала с повышенным тепловым сопротивлением, что

в результате снижает передачу тепла от анода и керамической камеры к магнитной системе.

Для создания электрической изоляции анода в трубопроводе подачи РТ используется газоэлектрическая развязка, выполненная в виде диэлектрических труб с металлическими наконечниками, к которым присоединяются подводящие и отводящие газ трубки. В конструкции имеется экранно–вакуумная изоляция предназначенная для снижения потоков тепла, передаваемого к элементам крепления двигателя (или к элементам с ограниченным диапазоном рабочих температур, например, катушкам электромагнита). Катод–компенсатор устанавливается снаружи двигателя на магнитопровод (наружный полюс) с помощью кронштейна. Для защиты его поверхностей от распыления ускоренными ионами, ось катода располагают под углом 45° к оси двигателя либо параллельно ей.

Большинство элементов конструкции, исключая детали анода и катода, имеют рабочие температуры в пределах умеренности (обычно не выше 500 К) и поэтому могут использоваться не очень дорогостоящие и неостродефицитные материалы. Магнитопроводы изготавливаются из электротехнической нелегированной стали марки 10880. Коэрцитивная сила составляет 64 – 95 А/м. Сведения о магнитных свойствах указаны в ГОСТ 11036–75. В качестве обмоточного провода, имеющего круглое сечение, используется жаростойкий, выдерживающий кратковременное повышение температуры до 700 °С провод марки ПОЖ–700М. Провод изготовлен из меди с нанесенным покрытием из родия, который обладает высокой отражающей способностью (до 85 %). Элементы крепления, корпус и анод выполняются из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Для газоразрядной камеры применяется жаростойкая и устойчивая против ионной эрозии керамика марки БГП – 10 содержащая 70 % VN и 30 % SiO₂. В качестве изолятора используется конструкционная керамика ВК – 94 на основе окиси алюминия, которая хорошо выдерживает термоциклические нагрузки.

В конструкции катода, используют тугоплавкий материал – молибден, так как катод функционирует при высоких температурах.

Характеристики магнитного поля в ускорительном канале воздействуют на

качество направленности ионного потока, что в итоге влияет на эффективность преобразования энергии в СПД. При этом учитывается не только движение ионов, покинувших ускорительный канал, но и их перемещение внутри разрядной камеры и взаимодействие со стенками канала.

Ионы в разрядной камере движутся в разных направлениях их влияние на стенки камеры оценивается как вектор наибольшего возрастания электронного давления поперек ускорительного канала. На выходе из канала ионы имеют большую энергию и распыляют стенки керамического канала. Скорость износа ионного распыления может составлять до 10 мм/ч .

Толщина стенок зависит от межполюсного зазора магнитной системы и подобранной оптимальной шириной ускорительного канала и в случае полного распыления стенок начинается процесс разрушения полюсов магнитной системы. Если учесть, что скорость распыления слоев металла выше скорости распыления керамики, то в скором времени будет происходить изменение величины индукции и конфигурации магнитного поля, что приведет к снижению характеристик двигателя. Из этого следует, что время, в течение которого значение тяги двигателя будет обеспечиваться в установленных пределах ($\pm (2 - 5) \%$), это время безотказной работы двигателя.

Повышение эффективности СПД было достигнуто за счет совершенствования конструкции магнитной системы. Первым шагом на этом пути был переход от магнитной системы с широкими полюсами к системе с так называемыми "узкими" полюсами и катушками с минимальной протяженностью вдоль ускорительного канала (см. рисунок 1.3). Такая магнитная система обеспечивала быстрое нарастание радиальной компоненты индукции магнитного поля по длине ускорительного канала. При этом применение отдельных катушек намагничивания внутри и снаружи ускорительного канала позволяет регулировать форму магнитного поля в канале, что приводит к оптимизации рабочего процесса, гарантирующего высокий уровень тяговой эффективности [3].

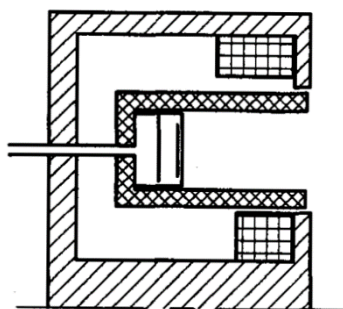


Рисунок 1.3 – Схема СПД с «узкими» полюсами и катушки

1.3 Электро–пневмосхема двигателя

Электро–пневмосхема двигательного модуля представленная на рисунке 1.4. включает двигатель СПД, газовый тракт и линии электрической коммутации. Газовый тракт модуля содержит две линии, что позволяет повысить надежность функционирования системы, в каждой из которых имеются электроклапаны (ЭК), фильтры (Ф), регулятор расхода аргона – "термодроссель" (ТД), пакет жиклеров (Ж). Группы электроклапанов ЭК1 и ЭК2 (нормально закрытые) служат для подачи газа в двигатель и для его отключения. Установка последовательно двух клапанов повышает время безотказной работы системы. С помощью электроклапанов производится также переключение с основной линии газового тракта на резервную. С помощью термодроссель и жиклеров осуществляется точная регулировки расхода аргона при работе двигателя. Так как рабочее давление термодросселя лежит в диапазоне $(0,175 - 0,202) \pm 0,01$ МПа, то окончательно расход аргона, необходимый для работы двигателя, устанавливается путем уменьшения давления на пакете жиклеров. Для защиты от загрязнения элементов газовой системы с малыми отверстиями в трактах подачи установлены фильтры тонкой механической очистки газа (размер ячейки – 5 мкм). Электропитание к модулю подводится от коммутирующего элемента блока системы электропитания (СЭП) и распределяется по цепям управления: к электроклапанам; для нагрева и регулировки термодросселя; для питания последовательно соединенных наружной и внутренней катушек электромагнита и питания анода. Для подавления распространения возможных электромагнитных помех, генерируемых в разряде при работе двигателя, по цепям электропитания двигательный

модуль содержит согласующий электрический фильтр ЭФ. В состав фильтра входит конденсатор C и катушка индуктивности L , шунтируемая сопротивлением R . Параметры элементов фильтра подбираются в ходе комплексных доводочных испытаний конкретной СПУ с работающим двигателем. Элементы газового тракта и электрический фильтр располагаются в пространстве крепежной фермы сегмента или на раме двигательного модуля в случае его автономного выполнения.

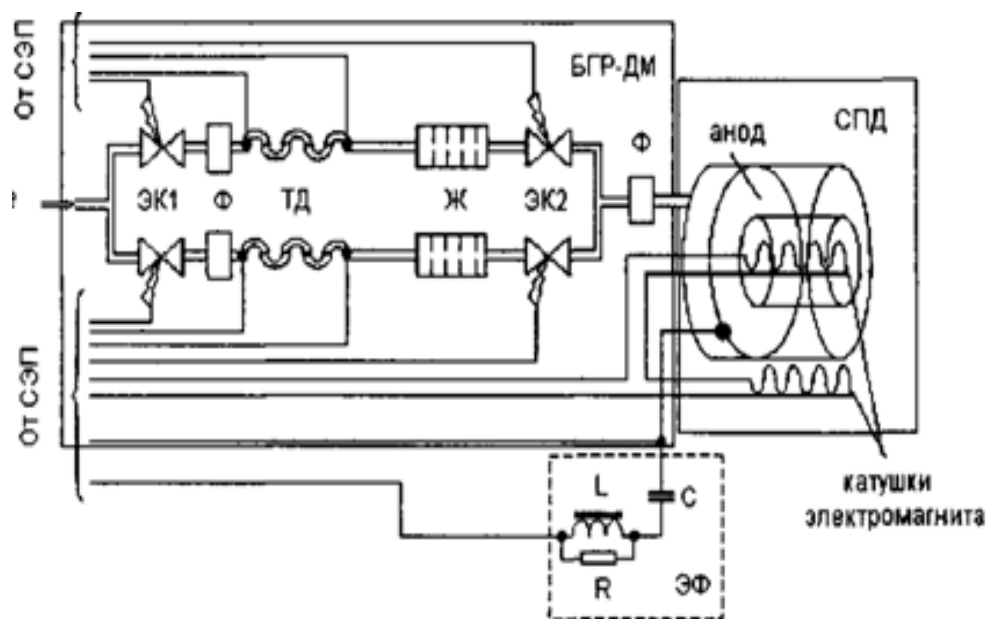


Рисунок 1.4 – Электро–пневмосхема двигательного модуля

Катод–компенсатор, применяемый для работы СПД требует расхода газа для организации рабочего процесса. В газовом тракте катода установлены: пуско–отсечной электроклапан ЭК, фильтр Ф и пакет жиклеров Ж. Электропитание катодного модуля имеет цепи питания: электроклапана, стартового нагревателя и поджигного электрода. Электропневмосхема модуля катода представлена на рисунке 1.5.

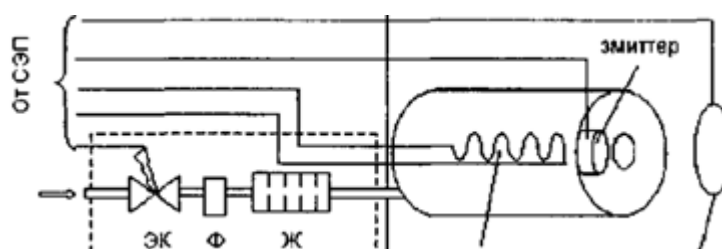


Рисунок 1.5 – Электро–пневмосхема модуля катода

Система хранения рабочего тела располагается в корпусе КА вблизи его центра масс. В случае КА массой более 800кг расположение системы хранения выбирается из условия сохранения положения центра масс аппарата по мере выработки рабочего тела. Система хранения содержит бак с РТ, который снабжен заправочным (ЗК), предохранительным (ПК) и пусковым пиротехническим (ПрК) клапанами (см. рисунок 1.6). Контроль давления при хранении и оценка запаса газа осуществляется с помощью датчика давления (ДД1). Равномерность выработки РТ из баков выравнивается с помощью электроклапанов (ЭК4), установленных в резервной магистрали высокого давления. После разрыва мембран (ПрК) газ заполняет две параллельных магистрали первичной регулировки расхода питания для каждого сегмента ДУ. Каждая из магистралей содержит группы электроклапанов (ЭК1) подачи расхода в магистраль; механический редуктор давления (РД), понижающий давление до рабочей величины, необходимой для оптимальной работы термодросселя; управляющие электроклапаны (ЭК2), поддерживающие в ресивере (РС) заданное давление, которое контролируется датчиком давления (ДД2) и группу электроклапанов подачи расхода в активный сегмент (ЭК3) ДУ. Для повышения надежности работы ДУ предусмотрена дополнительная резервная магистраль низкого давления с группой электроклапанов (ЭК5) в ней, осуществляющих дублирование работы магистралей системы хранения для повышения надежности. Управление работой системы хранения и подачи осуществляется от подсистемы управления ДУ СУ СХП.

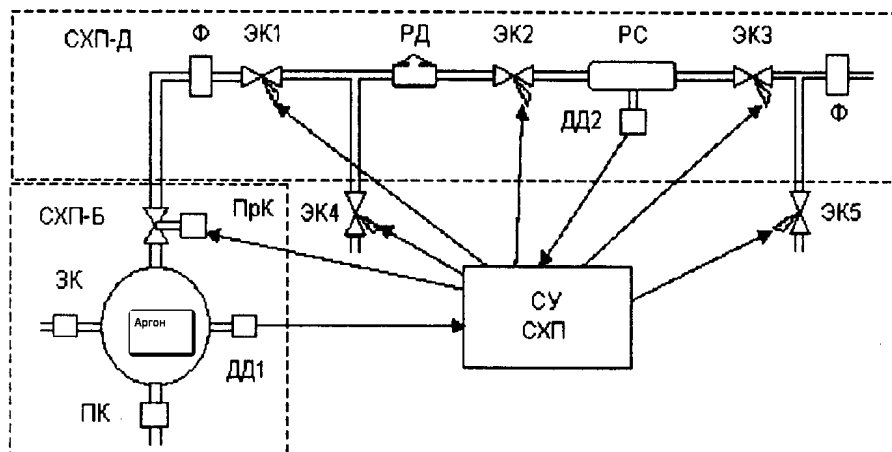


Рисунок 1.6 – Пневмосхема СХП

Блок системы электропитания сегмента осуществляет питание и управление функционированием двигательных модулей и катодов. Схема блока представлена (см. рисунок 1.7). Блок содержит: командный модуль СПУ У, вырабатывающий по командам от системы управления ДУ сигналы, необходимые для управления блоком питания, и формирующий телеметрическую информацию о работоспособности сегмента ДУ; блок преобразования напряжения ПН; блок проверки целостности цепей и работоспособности основных и резервных источников напряжения КЦ; блок коммутации цепей питания и блок переключения электропитания работающего двигателя в сегменте КДБ. Блок питания содержит для повышения надежности по три однотипных источника напряжения для питания: основного разряда U_p , поджигного электрода катода U_n , электромагнита двигателя U_m и цепи накала катода U_n .

Для плавной регулировки работы двигателя путем точного управления подачей расхода через него в выходной части разрядной цепи установлен датчик тока ДТ, сигнал с которого обрабатывается блоком управления расходом БУР, который в свою очередь регулирует ток нагрева термодросселя. Для максимального повышения времени безотказной работы системы также предусмотрено тройное резервирование систем управления термодросселя. С этой же целью предусмотрена возможность коммутации линий питания и управления

работающего двигателя в данном сегменте от блока КДБ системы питания противоположного сегмента. Питание клапанов осуществляется от отдельного блока БПК.

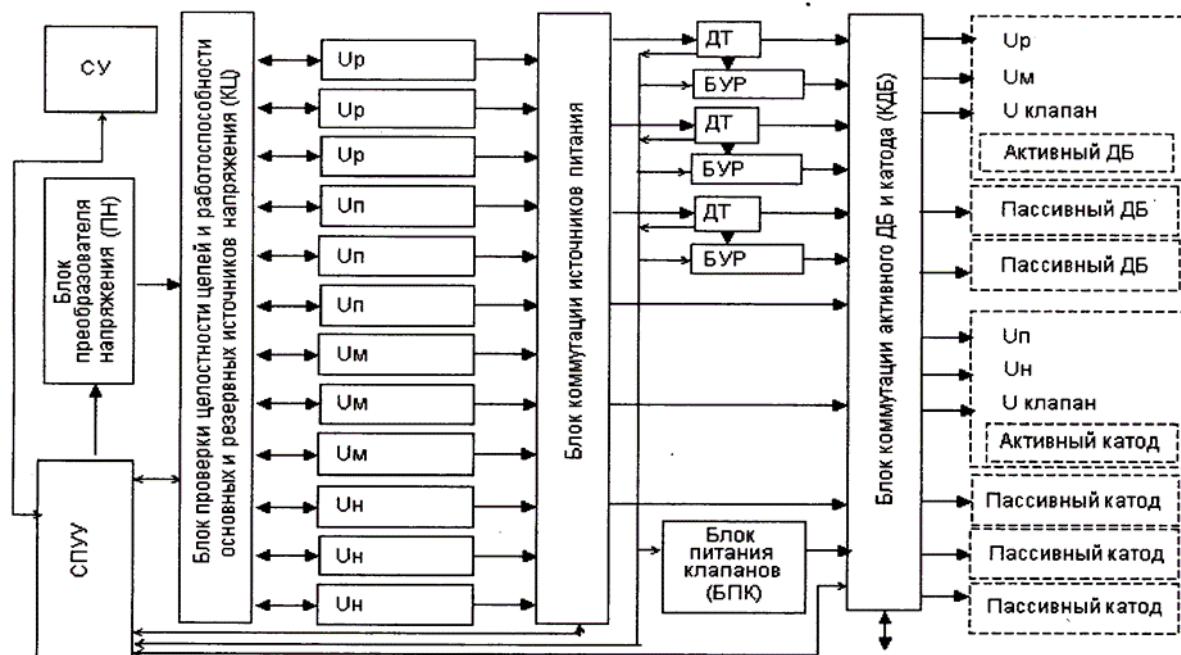


Рисунок 1.7 –Блок схема системы электропитания сегмента

Блок системы управления ДУ (см. рисунок 1.8) предназначен для управления силовой установкой в целом. Блок коммутирует бортовое питание с активным сегментом и выдает команды на включение и отключение двигателя; осуществляет контроль и управление работой системы хранения аргона на этапе до выведения на рабочую орбиту и активного существования КА; генерирует телеметрическую информацию для передачи в центральный компьютер. Он содержит блок коммутации входного питания и защиты питающей шины АЗС, блок управления работой системы хранения аргона СУ СПХ, центральный процессор ЭВМ и блок управления системами электропитания сегментов СУ СЭП. Для управления элементами ДУ применяется специальный интерфейс с гальванической развязкой между программирующим устройством и управляемыми элементами.

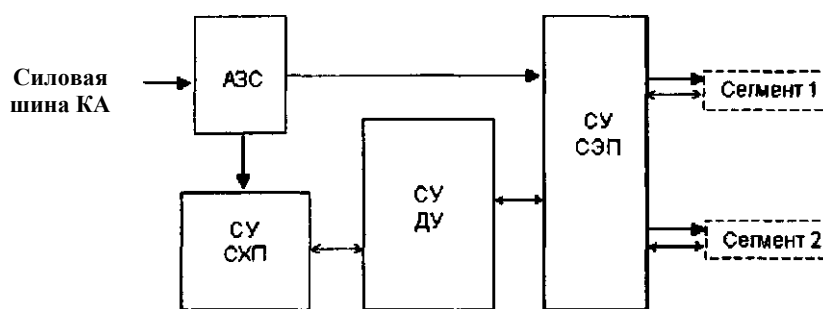


Рисунок 1.8 – Блок схема системы управления ДУ

1.4 Элементы двигательной установки

Для размещения и фиксации положения двигательных и катодных модулей с учетом направления вектора тяги ДУ используется крепежная ферма. Данная механическая конструкция также предназначена для размещения конструктивных элементов газовых трактов и электрических цепей.

Для хранения рабочего тела, а в частности инертного газа применяются баки сферической формы выполненный из титанового сплава, баковый коэффициент которых составляет 0,3, а рабочее давление хранения 14 МПа.

Газовый тракт ДУ включает термодроссель, пакет жиклеров, ресивер и фильтр.

Термодроссель – элемент точного регулирования расхода газа представляет собой капиллярную трубку из нержавеющей стали нагреваемые от внешнего источника питания. Электрическое сопротивление цепей $0,25 \pm 0,5$ Ом, давление на входе 0,13 – 0,2 МПа.

Пакет жиклёров – набор медных шайб, обеспечивающих за счёт гидравлического сопротивления точность поддержания расхода при падении давления с 0,6 МПа до 13,3 МПа

Трубопроводы выполнены из нержавеющей стали со сварными соединениями, негерметичность составляет $(2 - 6) \cdot 10^{-8}$ ст.куб.см/с по гелию.

Ресиверы – емкость цилиндрической формы, выполненная из титанового или алюминиевого сплава, рабочее давление составляет $0,2 \pm 0,3$ МПа.

Электроклапан – электромеханическое устройство, используемое для регулирования потока РТ. Рабочее давление электроклапана низкого и высокого давления составляет ниже 0,2 МПа и ниже 14 МПа соответственно. Напряжение в режиме открытия 27 В, а в режиме удержания 15 В. Масса не более 35 г, время срабатывания 30 – 50 миллисекунд, число срабатываний не менее 6000.

2 ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Основные проектные параметры ЭРД являются группой независимых параметров, однозначно определяющих облик ЭРД и влияющих на его летно–технические характеристики.

Целью задачи ОПП и их выбора является нахождение точного их сочетания, которые обеспечивают выполнение основной задачи и полета.

2.1 Исходные данные

Исходными данными для выбора ОПП являются:

- тяга двигателя;
- суммарный массовый расход рабочего тела через анодный блок и катод;
- рабочее тело.

Дополнительными исходными данными для выбора ОПП являются:

- потенциал ионизации рабочего тела;
- единичный заряд;
- масса атома рабочего тела;
- плотность рабочего тела.

Исходные данные представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для межпланетного ЭРД

тяга двигателя (P , Н);	1,5
суммарный массовый расход рабочего тела через анодный блок и катод (\dot{m}_Σ , кг/с)	$0,05 \cdot 10^{-3}$
рабочее тело	аргон

Для осуществления задачи межпланетного перелета выбирается стационарный плазменный двигатель (СПД).

2.2 Расчет основных энергетических характеристик и основных размеров СПД

Расчёт основных характеристик и основных размеров СПД произведён в соответствии с экспериментально–теоретическими методическими разработками.

К числу основных геометрических параметров, с помощью которых можно описать СПД типовой схемы, представленной на рисунке 2.1, относятся:

- средний диаметр ускоряющего канала $d_{\text{ср}}$ определяющий масштаб модели;
- диаметр наружного наконечника ускоряющего канала $d_{\text{нар}}$;
- диаметр внутреннего наконечника ускоряющего канала $d_{\text{вн}}$;
- ширина канала $b_{\text{к}}$;
- длина канала $l_{\text{к}}$;
- толщина выходных кромок изолятора $\delta_{\text{к}}$.

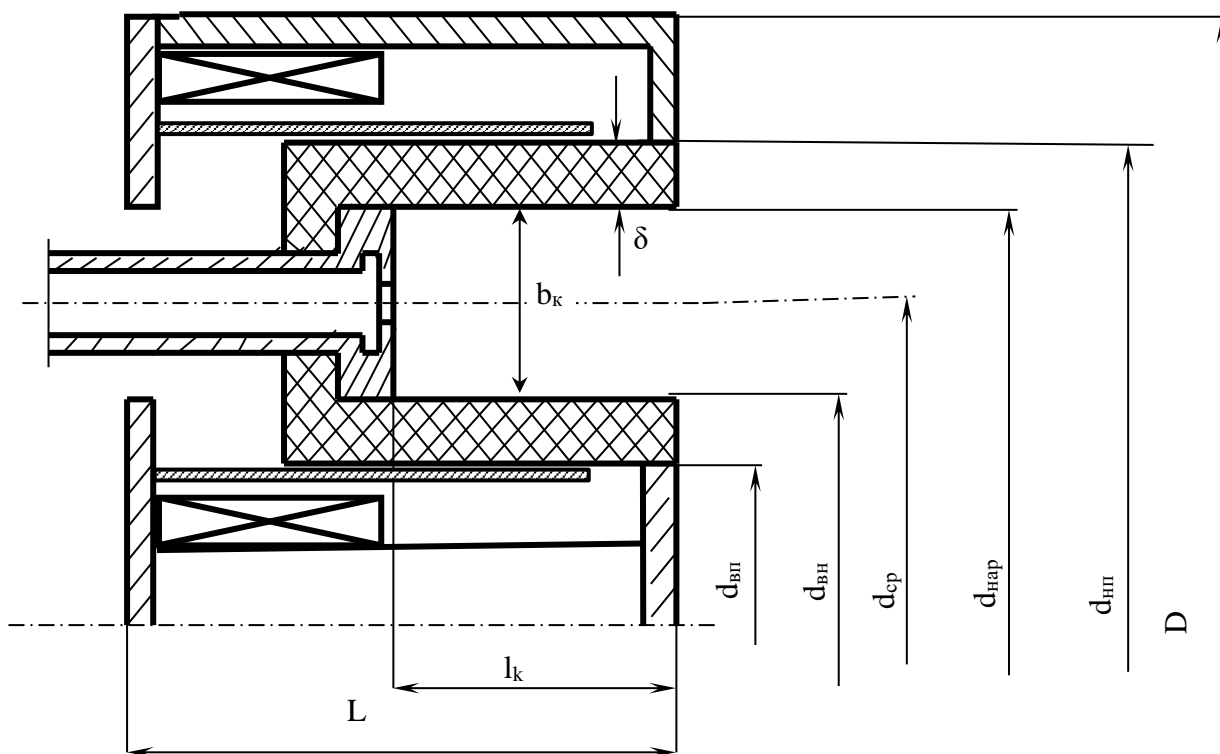


Рисунок 2.1 – Геометрические размеры СПД

Основной задачей расчета является определение геометрических параметров двигателя, а также параметров магнитной системы (количество ампер–

витков и размеры элементов магнитопровода), которые обеспечивают выполнение заданных требований.

Перечисленные размеры определяются с использованием величины среднего диаметра двигателя, что должно обеспечить идентичность относительного распределения потенциала и других локальных параметров в разрядной камере, и, т.о., обеспечить выполнение условий подобия процессов ионизации и ускорения рабочего тела (РТ) в РК. Как следствие, это позволяет ожидать идентичности интегральных характеристик моделей различного масштаба в сопоставимых условиях работы.

Суммарный массовый расход двигателя определяется как:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \frac{P}{J_{уд}}, \quad (2.1)$$

Найдем значение удельного импульса используя формулу (2.1):

$$J_{уд} = \frac{1,5}{0,05 \cdot 10^{-3}} = 30000 \text{ м / с.}$$

При условии, что суммарный массовый расход определяется, как сумма расходов через анодный блок – \dot{m}_a и через катод – \dot{m}_k . Учитывая, что расход через катод определяется по формуле (2.2), рассчитываем значение расхода через анодный блок \dot{m}_a :

$$\dot{m}_k = 0,1 \dot{m}_a, \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{1,1}, \quad (2.3)$$

Расход через анодный блок равен:

$$\dot{m}_a = \frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 4,54 \cdot 10^{-5} \text{ кг / с.}$$

Расход через катодный блок определяется по формуле (2.2):

$$\dot{m}_k = 0,1 \cdot 4,54 \cdot 10^{-5} = 4,54 \cdot 10^{-6} \text{ кг / с.}$$

Зная значение расхода рабочего тела, можем определить средний диаметр канала d_{cp} с помощью экспериментального графика (см. рисунок 2.2). Данный график построен с учетом геометрического подобия моделей СПД, базирующегося на оптимальности обеспечения условий ионизации рабочего тела. Ширина канала b_k выбирается такой, чтобы двигатель работал на нормальном тепловом режиме.

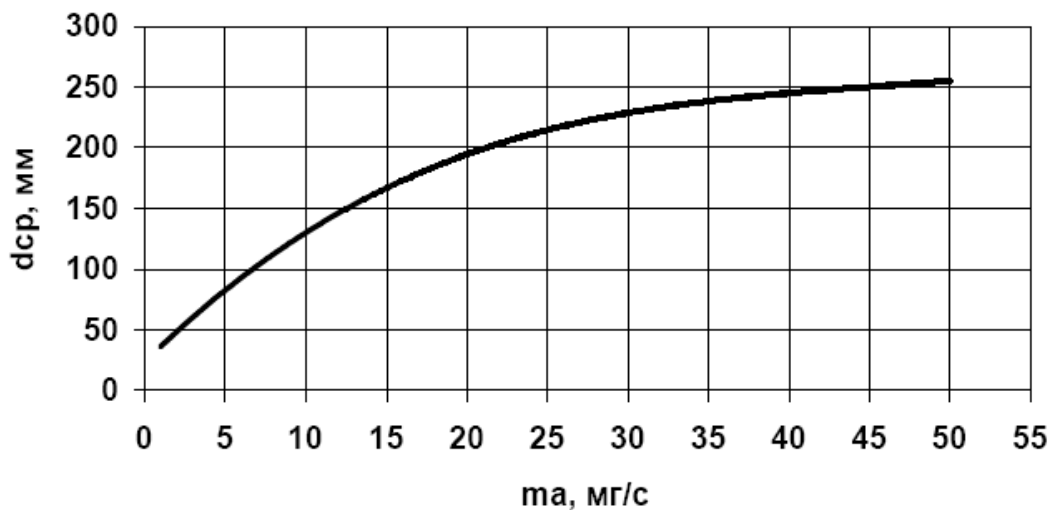


Рисунок 2.2 – Обобщенная экспериментальная зависимость среднего диаметра ускорительного канала от расхода рабочего тела для геометрических подобных моделей СПД.

Из графика для данного расхода $\dot{m}_a = 4,54 \cdot 10^{-5}$ кг/с найден средний диаметр разрядной камеры:

$$d_{cp} = 0,25 \text{ м.}$$

Ширина канала b_k выбирается такой, чтобы двигатель работал на нормальном тепловом режиме, который обеспечивается соответствующей плотностью мощности в канале. Мощность определяется как отношение мощности разряда

N_p к поперечной площади канала S_k , равной:

$$S_k = \pi \cdot d_{cp} \cdot b_k, \quad (2.4)$$

Используем эмпирическую зависимость, полученную при обработке многочисленных экспериментов (см. рисунок 2.3). По значению d_{cp} определяем плотность мощности в канале и с учетом этого значения ширину канала b_k .

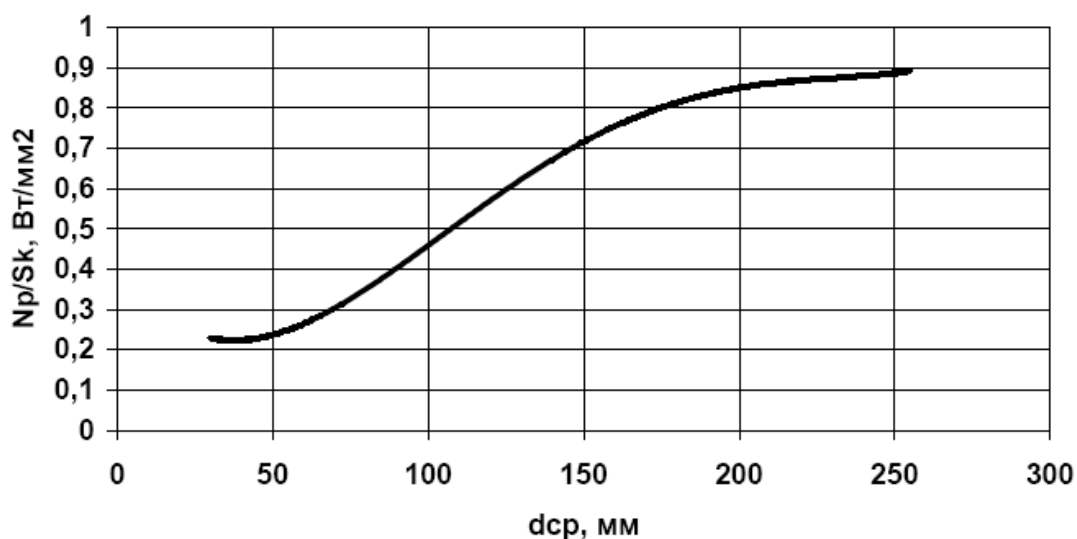


Рисунок 2.3 – Обобщенная экспериментальная зависимость плотности разрядной мощности от среднего диаметра ускорительного канала

Для определения ширины канала b_k необходимо вычислить следующие энергетические параметры.

Ток разряда определяется по следующему полуэмпирическому соотношению:

$$I_p = \chi_{Ar} \cdot I_{in}, \quad (2.5)$$

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

Токовый эквивалент массового расхода рассчитываем с учётом

определённого ранее значения массового расхода по формуле:

$$I_m = \frac{\dot{m}_a}{M} \cdot e, \quad (2.6)$$

Токовый эквивалент массового расхода равен:

$$I_m = \frac{4,54 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-23}} = 0,1096 \text{ А.}$$

Рассчитываем значение разрядного тока из формулы (2.5):

$$I_p = 1,14 \cdot 0,10956 = 0,1249 \text{ А.}$$

Определяем напряжение разряда U_p с учетом того, что часть мощности разряда затрачивается на ионизацию рабочего тела и при электродные потери:

$$U_p = U_y + (3,5...4) \cdot \varphi, \quad (2.7)$$

где $\varphi = 15,75$ эВ – потенциал ионизации рабочего тела,

U_y – разность потенциалов, разгоняющая ионы до нужной скорости, так как в двигателе реализуется электростатический механизм ускорения, которая определяется по формуле:

$$U_y = \frac{M\bar{v}^2}{2 \cdot e}, \quad (2.8)$$

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

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

\bar{v} – средняя скорость ионов, определяется из формулы удельного импульса с учетом экспериментальной информации:

$$J_{уд} = 0,83\bar{v}, \quad (2.9)$$

Следовательно средняя скорость ионов \bar{v} равна:

$$\bar{v} = \frac{30000}{0,83} = 36144,5783 \text{ м/с.}$$

Определяем значение разности потенциалов по формуле (2.8)

$$U_y = \frac{6,63 \cdot 10^{-23} \cdot 36144,5783^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 270676,0778 \text{ В.}$$

Рассчитываем напряжение разряда по формуле (2.7)

$$U_p = 270676,0778 + 4 \cdot 15,75 = 270739,0778 \text{ В.}$$

Зная напряжение U_p и ток разряда I_p , определяем мощность разряда двигателя $N_{p(\text{дв})}$:

$$N_{p(\text{дв})} = U_p \cdot I_p, \quad (2.10)$$

Определение мощности разряда двигателя:

$$N_{p(\text{дв})} = 270739,0778 \cdot 0,1249 = 33815,3108 \text{ Вт.}$$

Цена тяги – затраты мощности на получение единицы тяги:

$$C_T = \frac{N_{\text{дв}}}{P}, \quad (2.11)$$

Определение цены тяги:

$$C_T = \frac{33815,3108}{1,5} = 22543,5405 \text{ Вт/Н.}$$

Определение N_p / S_k (см. рисунок 2.3) на основании среднего диаметра $d_{cp} = 0,25 \text{ м}$:

$$\frac{N_p}{S_k} = 0,87 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2. \quad (2.12)$$

Определяем из выражения (2.12) поперечную площадь канала S_k :

$$S_k = \frac{33815,3108}{0,87 \cdot 10^6} = 0,0389 \text{ м}^2.$$

Из выражения (2.4) найдем ширину канала b_k :

$$b_k = \frac{0,038}{\pi \cdot 0,25} = 0,048 \text{ м}.$$

Определяем остальные геометрические размеры (см. рисунок 2.1).

– длина ускорительного канала:

$$l_k = (1,5 - 2)b_k, \quad (2.13)$$

– толщина стенок ускорительного канала в зоне межполюсного зазора:

$$\delta = 0,1b_k, \quad (2.14)$$

– внутренний диаметр $d_{\text{вн}}$ ускорительного канала:

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{ср}} + b_k, \quad (2.15)$$

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

$$d_{\text{нар}} = d_{\text{вн}} + 2\delta, \quad (2.16)$$

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

$$d_{\text{вп}} = d_{\text{ср}} - b_k - 2\delta, \quad (2.17)$$

– наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{\text{нп}}$ определяется:

$$d_{\text{нп}} = d_{\text{вн}} + 2\delta, \quad (2.18)$$

– габаритные размеры двигателя:

Диаметр:

$$D = 1,2d_{\text{вн}}, \quad (2.19)$$

Длина:

$$L = 2l_{\text{к}}, \quad (2.20)$$

Таблица 2.2 – Геометрические размеры СПД

$l_{\text{к}}, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$	$d_{\text{вн}}, \text{ м}$	$d_{\text{нар}}, \text{ м}$	$d_{\text{вп}}, \text{ м}$	$d_{\text{нп}}, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	$L, \text{ м}$
0,096	0,0048	0,298	0,307	0,192	0,202	0,357	0,192

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

$$\eta = \frac{P^2}{2 \cdot m_{\text{а}} N_{\text{дв}}}, \quad (2.21)$$

$$\eta = \frac{1,5^2}{2 \cdot 4,54 \cdot 10^{-5} \cdot 33815,3108} = 0,7328.$$

Определение максимальной величины индукции магнитного поля $B_{r\text{max}}$.

Максимальная величина индукции магнитного поля $B_{r\text{max}}$, срединной линии ускорительного канала в зоне межполюсного зазора и ширина канала $b_{\text{к}}$ связаны полуэмпирической зависимостью представленной ниже:

$$B_{r\text{max}} = 0,15 \cdot (b_{\text{к}} \cdot 10^3)^{-0,8}, \quad (2.22)$$

$$B_{r\max} = 0,15 \cdot (0,0495 \cdot 10^3)^{-0,8} = 0,0066 \text{ Тл.}$$

Определяем межполюсный зазор магнитной системы двигателя.

Для расчета соленоида в первом приближении, обеспечивающего создание такого поля примем магнитную систему за «С – образный» плоский магнитопровод с воздушным зазором, величина которого равна межполюсному зазору магнитной системы двигателя:

$$L_{\text{заз}} = b_k + 2\delta + \delta_T, \quad (2.23)$$

где δ_m – технологический зазор между магнитопроводом и разрядной камерой (примем $\delta_m = 2 \cdot 10^{-3}$ м).

$$L_{\text{заз}} = 0,0495 + 2 \cdot 0,00495 + 2 \cdot 10^{-3} = 0,0614 \text{ м.}$$

Определение протяженности слоя ионизации и ускорения (СИУ).

В результате анализа экспериментальных данных полученных в процессе использования СПД различных типоразмеров получаем, что величина l_c протяженности слоя ионизации и ускорения занимает область разрядной камеры (РК), в которой радиальная составляющая индукции магнитного поля располагается на средней линии канала. Предполагая, что величина магнитного поля значительно спадает на протяжении l_k по экспоненциальной зависимости, величина l_c может быть определена с достаточной точностью из соотношения:

$$l_c = 5 \sqrt{\frac{m_e \cdot U_p}{e \cdot B_{r\max}^2}}, \quad (2.24)$$

$$l_c = 5 \sqrt{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 270739,0778}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0066^2}} = 0,9382 \text{ м.}$$

Напряжённость электрического поля определяется как:

$$E = \frac{U_y}{I_c}, \quad (2.25)$$

$$E = \frac{270676,0778}{0,9382} = 288505,7320 \text{ В/м.}$$

Определение количества ампер – витков для создания оптимального магнитного поля определяется из формулы:

$$I_c w = k_{\text{ном}} L_{\text{ззз}} \frac{B_{r \text{ max}}}{\mu_0}, \quad (2.26)$$

где I_c – ток в соленоиде;

w – число витков;

$k_{\text{ном}} = 2,5$ – коэффициент потерь на поля рассеяния и осесимметричность магнитопровода;

$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с}/(\text{А} \cdot \text{м})$ – магнитная проницаемость вакуума.

$$I_c w = 2,5 \cdot 0,0596 \frac{0,006613}{1,25 \cdot 10^{-6}} = 788,2696 \text{ А} \cdot \text{витков.}$$

Примем, что ток в соленоиде равен току разряда $I_c = I_p = 0,1249 \text{ А}$, тогда получим, что количество витков равно 984.

Для получения повышенных значений времени работоспособности выбираем схему магнитной системы с вынесенным максимумом магнитного поля. Отличительной особенностью данной схемы является магнитная система, создающие условия расположение максимум магнитного поля по потоку за плоскостью полюсов. Это достигается за счёт изменения соотношения зазоров между полюсами и магнитными экранами.

Исходя из этого, рассчитаем число витков соленоида. Полученное число витков распределяется между внутренней и наружной катушками в соотношении число витков внутренней катушки 0,6...0,7 от их числа в наружной.

Тогда выбираем с двумя внутренними катушками по 296 витков и с четырьмя наружными катушками по 98 витков.

2.3 Оценка времени работоспособности двигателя

Под временем работоспособности понимается время в течение которого двигатель сохраняет необходимый уровень своих энергетических, физических и геометрических характеристик. Основными элементами двигателя, подвергающимися к быстрому «изнашиванию», являются стенки разрядной камеры, так как на них оказывают влияние ионы с высокой энергией. По причине активного влияния происходит утончение выходной кромки разрядной камеры. И это разрушительное действие не приведет к существенному изменению параметров двигателя до тех пор, пока расслоение не достигнет магнитной системы. Значительные изменения параметров произойдут тогда, когда разрушение достигнет одной трети толщины магнитных полюсов. Следовательно, время работоспособности двигателя будет зависеть от толщины керамической стенки, плотности ионного тока на ее поверхность, от энергии ионов и стойкости материала стенки к ионному распылению.

Для оценки времени работоспособности двигателя рассмотрим распыление внутренней стенки разрядной камеры, находящейся в наиболее напряженных условиях и ее выходной кромки.

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что время работоспособности будет определяться временем, за которое будет распылен определенный объем материала керамики:

$$\tau = \frac{\Omega}{K_s \cdot I_{ст}}, \quad (2.27)$$

где Ω – объем распыленного материала до момента начала ухудшения характеристик;

$I_{ст}$ – ток ионов на стенку;

K_s – объемный коэффициент распыления материала.

Коэффициент объемного распыления зависит от энергии ионов аргона и определяется на основе экспериментально полученного графика (см. рисунок 2.4) На рисунке приведены данные по коэффициентам распыления для основных керамических материалов, применяемых в настоящее время в СПД (зависимости линейны вплоть до 1000 эВ).

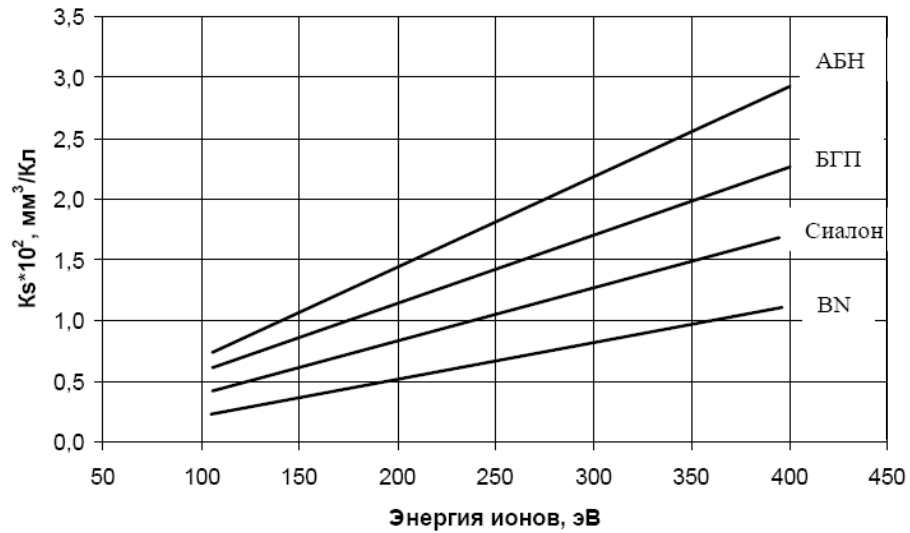


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов для основных керамических материалов.

Для определения объема распыленного материала Ω используются разные формулы в зависимости от схемы двигателя. В данном случае выбираем формулу для расчета объема распыленного материала схемы с узкими катушками, так как у нас катушки:

$$\Omega = \pi \left(r_{\text{вн}} l_c \delta - \frac{l_c \delta^2}{3} \right), \quad (2.28)$$

где $r_{\text{вн}}$ – радиус внутреннего полюсного наконечника, так как у нас наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{\text{вн}} = 0,202$ м, то

$$\Omega = \pi \left(0,1003 \cdot 0,9382 \cdot 0,00495 - \frac{0,93823 \cdot 0,0048^2}{3} \right) = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ток ионов на стенку рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\text{ст}} = j_{\text{ст}} 2\pi r_{\text{вн}} l_c, \quad (2.29)$$

где $j_{\text{ст}}$ – плотность ионного тока на стенке;

$r_{\text{вн}}$ – радиус внутреннего полюсного наконечника.

Плотность ионного тока на стенки можно оценить как:

$$j_{\text{ст}} = \frac{\dot{m}_a e \beta_{\text{ст}}}{M S_{\text{расп}}}, \quad (2.30)$$

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

$S_{\text{расп}}$ – площадь зоны распыления на стенках разрядной камеры;

M – масса иона рабочего тела.

Находим $S_{\text{расп}}$ площадь зоны распыления по формуле:

$$S_{\text{расп}} = 2\pi d_{\text{ср}} l_c \quad (2.31)$$

$$S_{\text{расп}} = 2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 0,9382 = 1,4737 \text{ м}^2.$$

После этого определяем $j_{\text{ст}}$ плотность ионного тока на стенки по формуле (2.30), где $\beta_{\text{ст}} = 0,099$.

$$j_{\text{ст}} = \frac{4,54 \cdot 10^{-5} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,099}{6,63 \cdot 10^{-23} \cdot 1,4737} = 0,0074 \text{ А / м}.$$

Определяем ток ионов на стенку по формуле (2.29), так как у нас наружный диаметр внутреннего полюсного наконечника $d_{\text{вн}} = 0,2005 \text{ м}$, то $r_{\text{вн}} = 0,1003 \text{ м}$:

$$I_{\text{ст}} = 0,0073 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,1003 \cdot 0,9382 = 0,0043 \text{ А}$$

Определяем времени работоспособности двигателя(τ) по формуле (2.27). Выбираем материал разрядной камеры «БГП» и исходя из рисунка 2.4 выбираем

объемный коэффициент распыления материала для энергии ионов $W = 350$ эВ рабочего газа, которая составляет $K_s = 2 \cdot 10^{-11}$ м²/Кл.

$$\tau = \frac{13,09 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-11} \cdot 0,0043 \cdot 3600} = 46511,6279 \text{ ч.}$$

Рассчитаем запас рабочего тела:

$$M_{\text{рт}} = 1,2 \dot{m}_{\Sigma} \tau, \quad (2.32)$$

$$M_{\text{рт}} = 1,2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 46511,6279 \cdot 3600 = 10046,5116 \text{ кг.}$$

Рассчитаем суммарный импульс по следующей формуле:

$$J_{\Sigma} = P \tau, \quad (2.33)$$

$$J_{\Sigma} = 1,5 \cdot 46511,6279 \cdot 3600 = 251162790,66 \text{ с.}$$

Уточняющий расчет исходных данных через другие выражения.

Уточняем тягу двигателя через выражение:

$$P = \beta_{\text{дв}} \dot{m}_a \bar{v}, \quad (2.34)$$

где \dot{m}_a – расход рабочего тела через анод определяется из выражения (2.6);

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

$$\dot{m}_a = \frac{I_p M}{\chi \cdot e}, \quad (2.35)$$

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

$$\dot{m}_a = \frac{0,1249 \cdot 6,63 \cdot 10^{-23}}{1,14 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,5396 \cdot 10^{-5} \text{ кг / с.}$$

$$P = 0,9 \cdot 4,5396 \cdot 10^{-5} \cdot 36144,5783 = 1,4767 \text{ Н}$$

Уточняем суммарный расход двигателя, используя выражение (2.2):

$$\dot{m}_\Sigma = 1,1 \cdot 4,5395 \cdot 10^{-5} = 4,9935 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

2.4 Определение основных параметров катода – компенсатора

Для правильной работы СПД катод – компенсатор располагается снаружи двигателя вблизи наружного полюса, для защиты его поверхностей от распыления ускоренными ионами, ось катода располагают под углом 45°.

Основные геометрические размеры катода – компенсатора (см. рисунок 2.5).

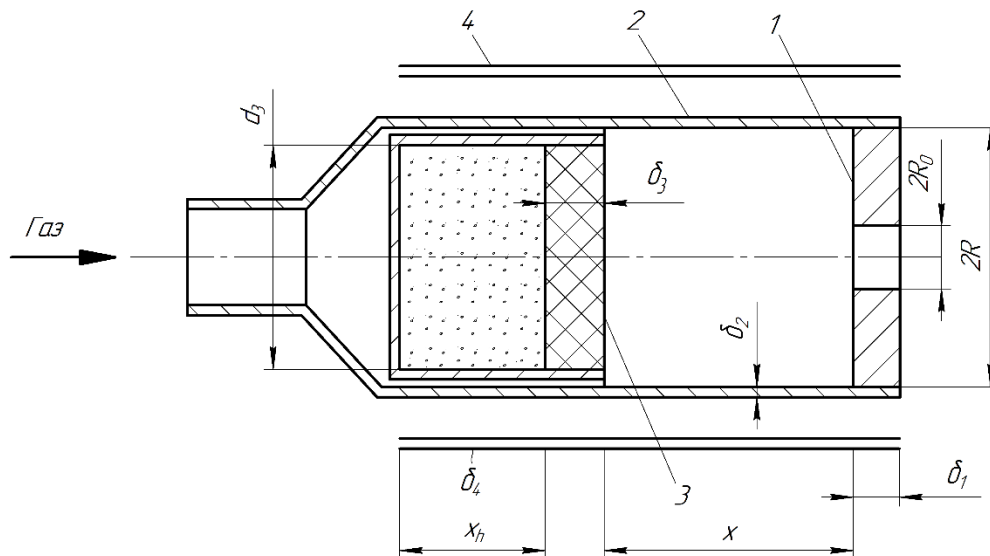


Рисунок 2.5 – Конструктивная схема полого катода

В наиболее общем случае полость катода ограничена тремя поверхностями:

- поверхностью диафрагмы (1);
- боковой поверхностью разрядной полости (2);
- поверхностью элемента с активатором (эмиттера) (3).

При заданном значении давления плазмообразующего газа в разрядной полости диафрагма служит для снижения расхода газа за счет дросселирования его в отверстие диафрагмы с радиусом R_0 меньшим, чем радиус разрядной полости

R . Толщина диафрагмы – δ_1 .

Длина X боковой поверхности является одновременно и длиной разрядной полости. Толщина боковой поверхности δ_2 .

Эмиссия электронов катода может происходить как с поверхности металла, так и с поверхности пленки, на металле специальным веществом (активатором), снижающем работу выхода электронов с поверхности и увеличивающим таким образом, плотность точки эмиссии при фиксированном значении температуры поверхности. В активированном полем катоде активатор может содержаться либо в порах материала эмиттера (катод с пористым эмиттером), либо в специальной камере (5) с пористой вставкой (3) подаваться на поверхности в результате диффузия в порах элемента с активатором. В дальнейшем данным элемент конструкции во всех случаях будет именоваться элементом с активатором. Толщина этого элемента – δ_3 . Средняя длина поры в пористой вставке – X_h , эффективный средний диаметр поры – δ_h . Дополнительным элементом конструкции катода может быть также тепловой экран (4), назначением которого является ограничение теплового потока с поверхности катода во внешний объем, либо наоборот – с элементов внешней конструкции (ЭРД) на боковую поверхность катода. Толщина экрана – δ_4 . Также дополнительные элементы отображены (см. рисунок 2.6).

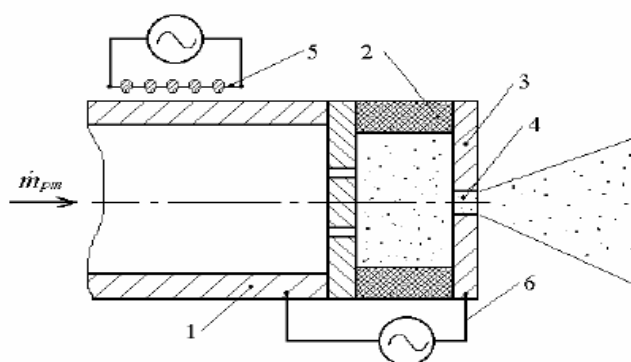


Рисунок 2.6 – Конструктивная схема катода.

1 – внутренний электрод; 2 – изолятор; 3 – внешний электрод; 4 – экстракционное отверстие; 5 – стартовый нагреватель; 6 – источник питания вспомогательного разряда.

Исследования проводились с использованием методики расчета параметров полого катода с внутренним разрядом, которая основана на анализе экспериментальных данных. Данные обобщены в виде эмпирических зависимостей, коэффициенты которых определены экспериментально.

Определяем геометрические размеры и энергетические параметры катода.

Зная, расход $\dot{m}_k = 4,54 \cdot 10^{-6}$ кг/с рабочего тела через катод из формулы 2.3, определяем диаметр экстракционного отверстия катода:

Определяем диаметр экстракционного отверстия (диафрагмы) через расход по формуле:

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2}{4} v \rho, \quad (2.36)$$

где v – скорость течения жидкости;

$\rho = 1,7839$ кг/м³ – плотность рабочего вещества.

$$d = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{v\rho}}, \quad (2.37)$$

Определяем скорость рабочего тела через диафрагму:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}, \quad (2.38)$$

где M – масса атома рабочего тела;

k – постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$;

T – температура рабочего тела (примем $T = 293$ К):

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{3,14 \cdot 6,63 \cdot 10^{-23}}} = 12,4651 \text{ м / с.}$$

Определяем диаметр экстракционного отверстия (диафрагмы) по

формуле (2.37)

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,54 \cdot 10^{-6}}{12,46512 \cdot 1,7839}} = 0,0005 \text{ м}$$

Тогда площадь экстракционного отверстия:

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,0005^2}{4} = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2.$$

Определяем плотность тока в отверстии по формуле:

$$j_{\text{отв}} = \frac{I_p}{S_{\text{отв}}}, \quad (2.39)$$

Определяем ток разряда катода по выражениям (2.5) и (2.6):

$$I_{\text{in}} = \frac{4,54 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-23}} = 0,01095 \text{ А},$$

$$I_p = 1,14 \cdot 0,010956 = 0,0125 \text{ А},$$

$$j_{\text{отв}} = \frac{0,012489}{1,96 \cdot 10^{-7}} = 6,3794 \cdot 10^4 \text{ А / м}^2.$$

Определяем давление в полости катода:

$$P_k = 1,081 \cdot 10^{-9} \cdot j_{\text{отв}}^{1,15}, \quad (2.40)$$

$$P_k = 1,081 \cdot 10^{-9} \cdot (6,3794 \cdot 10^4)^{1,15} = 0,00036251 \text{ Па}.$$

Зная давление в полости катода P_k , определяем температуру бачка с рабочим телом по соотношению:

$$T_6 = \frac{3750}{6,88 - \lg(P_k)}, \quad (2.41)$$

$$T_6 = \frac{3750}{6,88 - \lg(0,00036251)} = 363,3960 \text{ К}.$$

Зная давление в полости, определяем оптимальную температуру

поверхности эмиттера для минимального энергопотребления катода:

$$T_{\text{к.опт}} = 5,879 \ln(P_{\text{к}}) + 952,3, \quad (2.42)$$

$$T_{\text{к.опт}} = 5,879 \ln(0,00036251) + 952,3 = 905,7239 \text{ К.}$$

Находим плотность эмиссионного тока с поверхности эмиттера при оптимальной температуре:

$$j_{\text{эм}} = 2,567 \ln(P_{\text{к}}) + 15,45, \quad (2.43)$$

$$j_{\text{эм}} = 2,567 \ln(0,00036251) + 15,45 = 1,90508 \text{ А / м}^2$$

Определяем диаметр катода, через выражение (2.44):

$$I_{\text{п}} = j_{\text{эм}} S_{\text{к}}, \quad (2.44)$$

где $S_{\text{к}}$ – площадь катода:

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4}, \quad (2.45)$$

$$d_{\text{к}} = \sqrt{\frac{4I_{\text{п}}}{\pi j_{\text{эм}}}}, \quad (2.46)$$

Рассчитаем значение диаметра

$$d_{\text{к}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,012489}{3,14 \cdot 1,90508}} = 0,09138 \text{ м.}$$

Определяем напряжение внутреннего разряда $U_{\text{р}}$:

$$U_{\text{р}} = (72,88 I_{\text{п}}^{6,681}) T_{\text{к}}^{(-1,13 \ln(I_{\text{п}}) - 0,584)}, \quad (2.47)$$

$$U_{\text{р}} = (72,88 \cdot 0,012489^{6,681}) \cdot 363,39603^{(-1,13 \ln(0,012489) - 0,584)} = 2,14284 \text{ В.}$$

Находим мощность внутреннего разряда:

$$N_p = I_p U_p, \quad (2.48)$$

$$N_p = 0,012489 \cdot 2,14284 = 0,02676 \text{ Вт}$$

Толщина боковой стенки δ_2 катода. Технологически эта толщина должна быть больше 0,2 мм. Тогда выбираем $\delta_2 = 0,5$ мм.

Диаметр губки элемента с активатором. Максимальная величина определяется диаметром полости (катода) и размерами газоподводящих каналов (толщиной боковой стенки δ_2):

$$d_3 \leq d_k - 2\delta_2, \quad (2.49)$$

$$d_3 \leq 0,09138 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3},$$

$$d_3 \leq 0,09038 \text{ м, м,}$$

$$d_3 = 0,09038 \text{ м.}$$

Для губки все ее характеристики взяты на основании стандартных значений.

Толщина губки X_h в миллиметрах:

$$0,05 < X_h < 0,8,$$

Примем: $X_h = 0,1$

Диаметр пор δ_h в губке:

$$0,8 \text{ мкм} < \delta_h < 1,2 \text{ мкм,}$$

Примем: $\delta_h = 1,1$ мкм.

Степень пористости губки χ :

$$0,15 < \chi < 0,2.$$

Длина камеры элемента с активатором определяется необходимым запасом активатора для заданного ресурса. Варьирование этой величины при расчете связано с довольно сложной зависимостью поступления активатора в полость от

температуры и объема камеры.

$$\frac{V_k}{S_3} < X_3 < k_a \frac{V_k}{S_3}, \quad (2.50)$$

где k_a – коэффициент запаса прочности активатора, выбираем $k_a = 2$;

S_3 – площадь диаметра губки;

V_k – объём камеры, который определяется выражением:

$$V_k = \frac{\dot{m}_k \tau}{\rho}, \quad (2.51)$$

где τ – ресурс работы ($\tau = 1000 \cdot 3600 = 3600000$ с);

ρ – плотность рабочего вещества через активатор $\rho_{\text{раб.вещ}} = 1,7839$ кг/м³ и материала активатора (молибден) $\rho_{\text{Мо}} = 10200$ кг/м³.

$$\rho = \rho_{\text{Мо}} + \rho_{\text{раб.вещ}} = 10200 + 1,7839 = 10201,78 \text{ кг/м}^3,$$

Следовательно объём камеры равен:

$$V_k = \frac{4,54 \cdot 10^{-6} \cdot 3600000}{10201,78} = 0,0016 \text{ кг/м}^3,$$

Площадь диаметра губки находим по следующей формуле:

$$S_3 = \frac{3,14 \cdot 0,09038^2}{4} = 0,0064 \text{ м}^2,$$

Длина камеры элемента с активатором варьируется между следующими величинами:

$$\frac{0,0016}{0,0064} < X_3 < 2 \cdot \frac{0,0016}{0,0064},$$

$$0,25 < X_3 < 0,5,$$

Принимаем длину камеры элемента с активатором равную $X_3 = 0,26$ м.

2.5 Расчёт системы хранения и подачи рабочего тела

В систему хранения и подачи входят: бака (Б) с рабочим телом,

заправочное устройство (ЗУ), пусковой клапан (ПК), предохранительный клапан (ПК), два электроклапана (ЭК1 и ЭК2), редуктор (Р), ресивер (РС), пара жиклёров (Ж1 и Ж2) и сам двигатель (СПД).

Рабочее тело в газообразном состоянии поступает через заправочное устройство в бак. Контроль за состоянием РТ осуществляется с помощью датчиков температуры (ДТ) и давления (ДД1), вся полученная информация поступает в систему управления (СУ). Для попадания топлива в систему подачи используется пироклапан. Далее рабочее тело направляется в редуктор для понижения давления. После, пройдя через электроклапан, газ попадает в ресивер, где происходит сглаживание пульсаций и стабилизирование его расхода. Для контроля за давлением в ресивере используется датчик давления (ДД2). Затем с помощью электроклапана (ЭК2) и жиклёров (Ж1 и Ж2) осуществляется подача рабочего тела в анод СПД и в катод–компенсатор.

2.5.1 Определение основных параметров бака для хранения рабочего вещества

Наибольшую долю массы размеров ДУ составляют топливные баки с РТ. Требования к материалу и конструкции бака определяются видом выбранного рабочего вещества и схемой системы подачи. Рассчитаем бак для данной двигательной установки.

Основные требования к баку:

- малая масса;
- прочность;
- герметичность;
- коррозионная стойкость;
- совместимость с выбранным рабочим веществом.

Запишем уравнение состояния газа, учитывая то, что газ при заправке находился под давлением P_0 и температуре T_0 :

$$P_0 \cdot V_0 = \frac{M_{\text{РТ}}}{\mu} \cdot R \cdot T_0, \quad (2.52)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж}\cdot\text{М}/\text{К}$ – универсальная газовая постоянная.

Определим из формулы 2.52 объем бака, т.е. объем рабочего тела V_0 , приняв значение $P_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (т.к. не должно превышать критическое давление $P_{\text{кр}}$) и $T_0 = 293 \text{ К}$ (температура при нормальных условиях), $\mu = 242,125 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ – вязкость газа (аргона):

$$V_0 = \frac{M_{\text{пр}}}{\mu P_0} R T_0, \quad (2.53)$$

$$V_0 = \frac{5378,91}{242,125 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^6} \cdot 8,31 \cdot 293 = 10,81815 \text{ м}^3.$$

Зная объем бака, найдем его диаметр d_6 :

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_0}{\pi}}, \quad (2.54)$$

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10,81815}{3,14}} = 2,74468 \text{ м}.$$

В случае если условия хранения газа в баке изменятся (т.е. T_0 выросла до T_{max}), то уравнение состояния газа примет следующий вид:

$$P_{\text{max}} \cdot V_0 = \frac{M_{\text{пр}}}{\mu} \cdot R \cdot T_{\text{max}}, \quad (2.55)$$

Разделив уравнения состояния для двух случаев ($P = P_{\text{max}}$, $T = T_{\text{max}}$ и $P = P_0$, $T = T_0$) друг на друга получим:

$$\frac{P_{\text{max}}}{P_0} = \frac{T_{\text{max}}}{T_0}, \quad (2.56)$$

Величину максимальной температуры T_{max} примем равную 400 К.

Зная величину T_{max} , определяем P_{max} :

$$P_{max} = P_0 \cdot \frac{T_{max}}{T_0}, \quad (2.57)$$

$$P_{max} = 5 \cdot 10^6 \cdot \frac{400}{293} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Напряжения, возникающие в стенках бака из-за давления P , определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{P \cdot \frac{\pi \cdot d_6^2}{4}}{\pi \cdot d_6 \cdot \delta} = \frac{d_6 \cdot P}{4\delta}. \quad (2.58)$$

Максимальные напряжения будут возникать в стенках бака при $P = P_{max}$:

$$\sigma_{max} = \frac{d_6 \cdot P_{max}}{4\delta}. \quad (2.59)$$

В качестве материала, из которого изготавливается бак, выбираем титановый сплав ВТ5, имеющего степень черноты равную 0,63 допусаемое напряжение (условный предел текучести) – $[\sigma]=800$ МПа.

Зная $[\sigma]$ и учитывая то, что $\sigma_{max}^r \leq [\sigma]$, вычисляем минимальную толщину стенки бака, где k_3 – коэффициент запаса.

$$\delta_{min} = \frac{d_6 \cdot P_{max}}{4[\sigma]} k_3, \quad (2.60)$$

$$\delta_{min} = \frac{2,7447 \cdot 6,8 \cdot 10^6}{4 \cdot 800 \cdot 10^6} \cdot 1 = 0,0058 \text{ мм.}$$

Для обеспечения достаточной жесткости, чтобы использовать бак, как силовой элемент конструкции СХПРТ, с учетом коэффициента запаса прочности

$$n = \frac{\sigma_{B,\tau}^t}{\sigma_{\max}} \geq 1,1 \quad (\text{для сферы}), \text{ принимаем } n = 2, \text{ тогда}$$

$$\delta_{\sigma} = \delta_{\min} \cdot n = 0,0058 \cdot 2 = 0,0116 \text{ м.}$$

Масса конструкции бака равна:

$$M_{\text{кб}} = \rho_{\sigma} \cdot S_{\sigma} \cdot \delta_{\min} = \rho_{\sigma} \cdot \pi \cdot d_{\sigma}^2 \cdot \delta_{\min}, \quad (2.61)$$

$$M_{\text{кб}} = 4400 \cdot 3,14 \cdot 2,74468^2 \cdot 0,00583 = 606,7843 \text{ кг.}$$

Масса заправленного газом бака равна:

$$M_{\text{зб}} = M_{\text{кб}} + M_{\text{рт}}, \quad (2.62)$$

$$M_{\text{зб}} = 606,7843 + 5378,91 = 5985,6943 \text{ кг.}$$

Важной характеристикой для СХПРТ, является коэффициент складирования, который показывает, во сколько раз масса заправленного бака, больше массы хранящегося в нём рабочего тела.

$$\gamma = \frac{M_{\text{зб}}}{M_{\text{рт}}}, \quad (2.63)$$

$$\gamma = \frac{5985,69427}{5378,91} = 1,11$$

Конструкция будет считаться наиболее оптимальной, когда коэффициент складирования принимает меньшее значение.

При расчете не было учтено изменение объема бака в случае нагрева.

В результате были получены следующие конструктивные параметры системы хранения:

- форма бака – сферическая;
- масса бака составила $M_{кб} = 606,78427$ кг;
- масса заправленного бака: $M_{зб} = 5985,69427$ кг;
- коэффициент складирования: $\gamma = 1,11$;

Расчет параметров термодросселя и жиклера представлен в приложение А.

2.6 Расчет системы электропитания СПД

Основной задачей системы электропитания является поддержание работы ЭРД и систем, обеспечивающих его функционирование.

Определение мощности СПД необходимой для работы всех его систем.

Так как, затраты на вспомогательные системы стартовый разогрев катода (130–140 Вт), работу клапанов системы подачи (10–20 Вт), что в сумме это составит порядка 150 Вт или 0,1 от потребляемой мощности разряда. Тогда потребляемая мощность составит, если мощность разряда $N_p = 33,812$ кВт:

$$N = 33812,60343 + 33381,26 = 37193,86377 \text{ Вт.}$$

Для осуществления этой задачи установим 25 изотопных генераторов с мощностью 1,5 кВт.

Так как, радиоизотопный генератор состоит из ампул. Произведем расчет ампулы.

Задана электрическая мощность $N_{эл} = 1500$ Вт.

Задаемся эффективным КПД $\eta = 0,02$.

Необходимая тепловая мощность определяется выражение

$$N_T = \frac{N_{эл}}{\eta}, \quad (2.64)$$

$$N_T = \frac{1500}{0,02} = 75000 \text{ Вт.}$$

Для заданного ресурса в 1 год выбираем топливо на основе кюрия 242 и америция 241 с периодом полураспада 162,5 суток: 40% Cm_2O_3 + 60% Am_2O_3 .

Для улучшения теплопередачи в одну часть такого топлива принято добавлять пять частей золота.

Определение необходимого объема внутри ампулы для выделяющегося гелия при распаде окиси кюрия Cm_2O_3 (присутствием в топливе америция пренебрегаем): Атомная масса кюрия – 242, кислорода – 16, гелия – 4.

Масса молекулы окиси кюрия M с учетом выделившегося гелия:

$$M = 242 \cdot 2 + 16 \cdot 3 + 4 \cdot 2 = 484 + 48 + 8 = 540 \text{ а.е.м.}$$

Относительный выход гелия при распаде:

$$\chi = 8/540 = 0,015.$$

Исходная масса топлива:

$$m = N_T / q_m, \tag{2.65}$$

где удельное тепловыделение топлива $q_m = 44,4 \text{ Вт/г}$.

$$m = 75000/44,4 = 1689,189 \text{ г.}$$

Объем топлива:

$$V_T = m/\rho, \tag{2.66}$$

где плотность топлива $\rho = 10 \text{ г/см}^3$.

$$V_T = 1689,189/10 = 168,9189 \text{ см}^3.$$

Масса выделившегося гелия:

$$m(\text{He}) = \chi_m = 0,015 \cdot 168,9189 = 2,53378 \text{ г.}$$

Газовая постоянная гелия:

$$R(\text{He}) = R/\mu, \tag{2.67}$$

$$R(\text{He}) = 8314/4 = 2078 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град.}$$

где μ – молекулярная масса гелия (при заданной температуре $T = 1200 \text{ К}$ и максимально допустимом давлении $P = 107 \text{ Па}$).

Объем выделившегося гелия:

$$V(\text{He}) = m(\text{He})R(\text{He})T/p, \quad (2.68)$$

$$V(\text{He}) = (2,53378 \cdot 2078 \cdot 1200)/107 = 59,0489 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Пренебрегая объемом самого топлива и задаваясь внутренним диаметром d ампулы (пусть $d = 2$ см), определяем ее длину:

$$l = V(\text{He})/0,785d \cdot 2, \quad (2.69)$$

$$l = 590,489/0,785 \cdot 2 = 376,1076 \text{ см}$$

Ампулу такой длины можно “разрезать” на несколько секций, например, на шесть. Тогда в топливном блоке барабанного типа нужно разместить шесть ампул длиной 22,5 см.

3 ПРОЧНОСТЬ СПД

Основное содержание расчета на прочность двигателя сводится к нахождению запасов прочности деталей, работающих длительное время в условиях высоких температур и значительных температурных градиентов. Такими элементами в плазменном двигателе являются анод и баки системы подачи РТ.

Расчет анода следует вести для двух случаев. Первый расчетный случай – это длительная работа анода на маршевом режиме двигателя, когда расчетной нагрузкой на анод является давление плазмы или рабочего тела и характерными условиями являются высокие температуры оболочки анода и длительное время работы. На этом режиме в силу релаксационных явлений температурные напряжения будут незначительны. Второй расчетный случай – это режим запуска двигателя, когда расчетными условиями нагрузки на анод будут тепловые нагрузки, создающие большие температурные перепады, как по длине анода, так и по толщине его стенки, при сравнительно небольшой длительности действия, равной времени пуска двигателя. Таким образом, в этом случае следует определять температурные напряжения в аноде двигателя.

Аноды плазменных двигателей имеют «цилиндрическую, коническую и более сложные формы. Рассмотрим расчет цилиндрического анода. Будем рассматривать его как оболочку, нагруженную внутренним давлением, а затем и перепадом температур.

3.1 Определение напряжения и запаса прочности цилиндрического анода по длине анода

Определяем напряжение и запас прочности цилиндрического анода, размеры которого указаны (см. рисунок 3.1), если известны: материал – сталь Х18Н9Т; $E = 1,45 \cdot 10^5$ МПа; $\alpha = (21,2 \dots 22,2) \cdot 10^{-6}$ 1/град. Левый конец анода закреплен жестко. Температура по длине анода нарастает линейно.

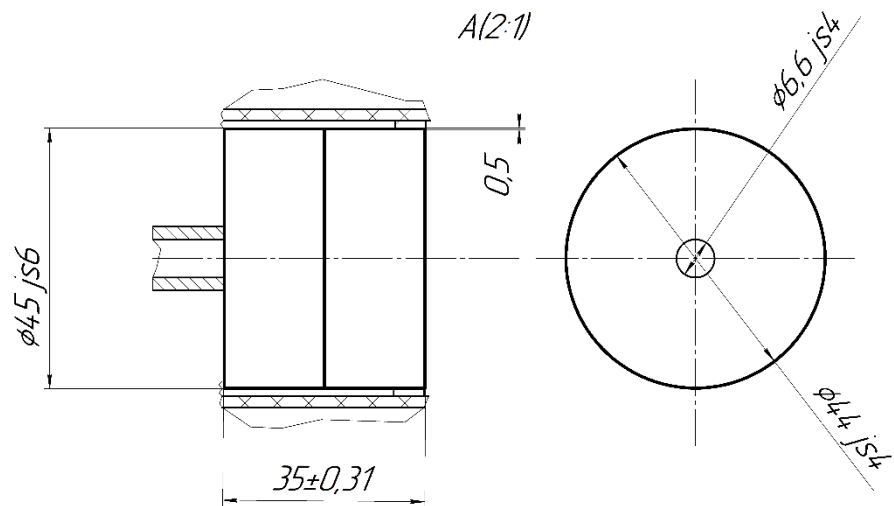


Рисунок 3.1 – Геометрические размеры анода

Закон изменения температуры по длине анода:

$$\Delta t = B_0 + B_1 x, \quad (3.1)$$

из условия при $x = 0$ $\Delta t = 430$ °C; при $x = l$ $\Delta t = 580$ °C; получаем $B_0 = 430$ град;
 $B_1 = 4,3$ град/мм.

Закон изменения температуры по длине анода:

$$l_d = 2,5\sqrt{rh}, \quad (3.2)$$

где r – радиус анода;

h – толщина оболочки

$$l_d = 2,5 \cdot \sqrt{22,57 \cdot 0,5} = 8,39828 \text{ мм.}$$

т.е. рассчитываемая оболочка относится к классу данных. Определим протяжение полного периода гармонической функции:

$$\beta = \frac{1,29}{\sqrt{rh}}, \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{1,29}{\sqrt{22,57 \cdot 0,5}} = \frac{1,29}{3,359312} = 0,384 \text{ 1/мм.}$$

Цилиндрическая жесткость D

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (3.4)$$

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

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

$$\bar{M}_R = 2\beta^2 D \left[\frac{\delta'(0)}{\beta} + \delta(0) \right] + D\delta''(0), \quad (3.5)$$

$$\bar{Q}_R = -2\beta^3 D \left[\frac{\delta'(0)}{\beta} + 2\delta(0) \right] + D\delta''(0). \quad (3.6)$$

Рассчитаем функцию $\delta(0)$ и ее производные:

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

$$\delta'(0) = \alpha\Delta t_0 = 21,2 \cdot 10^{-6} \cdot 430 = 9,1 \cdot 10^{-3}; \quad (3.7)$$

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

Определим погонные реакции:

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

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

Найдем прогиб оболочки в результате действия давления ω_p :

$$\omega_p = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [\beta M_R (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_R \cos \beta x] + \delta = \omega_0 + \delta . \quad (3.8)$$

Найдем напряжение оболочки согласно эпюру напряжения оболочки (см. рисунок 3.2):

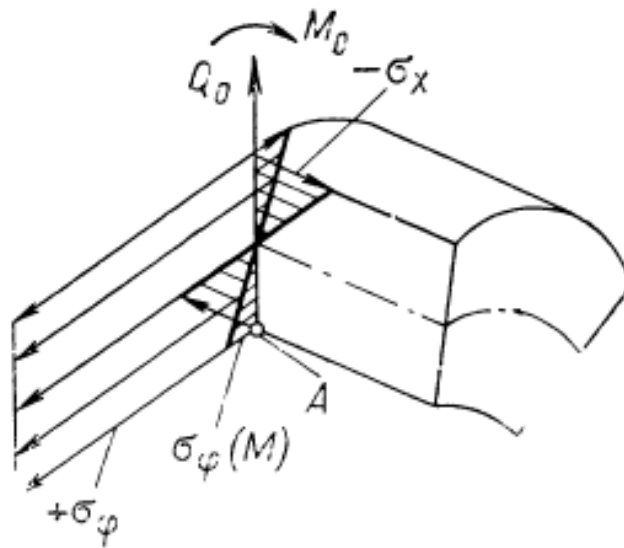


Рисунок 3.2 – Эпюру напряжение оболочки

$$\sigma_\phi = \frac{E\omega_0}{r}, \quad (3.9)$$

$$\sigma_x = \frac{6D\omega_p''}{h^2}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_\phi(M) = 0,3\sigma_x, \quad (3.11)$$

Определяем коэффициенты для формулы (3.8):

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

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

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

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

Рассчитаем значение прогиба оболочки в результате действия давления ω_p :

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

Тогда прогиб ω_0 , определяющий напряжение в цилиндрической оболочке, равен:

$$\omega_0 = \omega_p - \delta, \tag{3.12}$$

$$\omega_0 = 0,20574 - 0,205736 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ мм}.$$

Найдем вторую производную прогиба оболочки в результате действия давления ω_p :

$$\begin{aligned} \omega_p &= \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [\beta M_R (\cos \beta x - \sin \beta x) + Q_R \cos \beta x] + \delta, \\ \omega_p' &= -\frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [2\beta M_R \cos \beta x + Q_R (\cos \beta x + \sin \beta x)] + \delta', \\ \omega_p'' &= \frac{e^{-\beta x}}{\beta D} [\beta M_R (\cos \beta x + \sin \beta x) + Q_R \sin \beta x]. \end{aligned} \tag{3.13}$$

Определяем коэффициенты:

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

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

Тогда вторая производная:

$$\omega_p'' = \frac{e^{-(13,44)}}{638,592} [43,2096(\cos 13,44 + \sin 13,44) + (213,585) \sin 13,44] =$$

$$= 0,231 \cdot 10^{-6} \text{ мм.}$$

Определяем напряжения по формулам (3.8), (3.9), (3.10):

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

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

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

Определяем обобщенное напряжения в оболочке:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + [\sigma_\phi + \sigma_\phi(M)]^2} - \sigma_x[\sigma_\phi + \sigma_\phi(M)], \quad (3.14)$$

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

Определяем запас прочности:

$$n = \frac{\sigma_{B,t}^{(t)}}{\sigma_i}, \quad (3.15)$$

где $\sigma_{B,t}^{(t)}$ – температурное напряжение определяется из графика (см. рисунок 3.3).

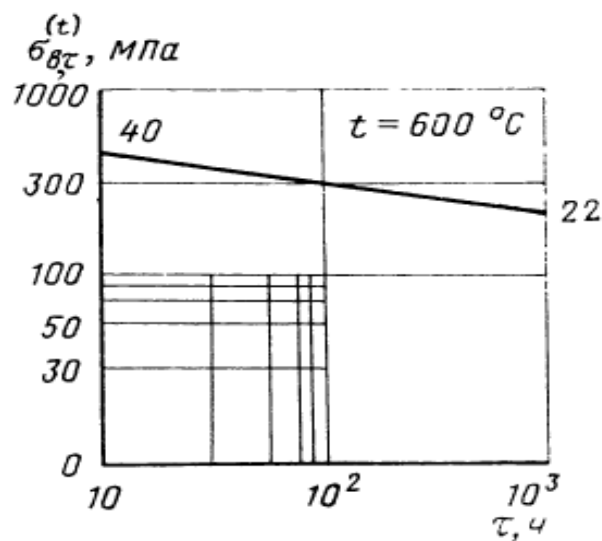


Рисунок 3.3 – График температурного напряжения для стали X18Н9Т

Выбирается из графика температурного напряжения для $\tau = 23538,82264$ часов, которое равняется $\sigma_{B,t}^{(t)} = 30$ МПа.

Запас прочности равняется:

$$n = \frac{30}{0,0079} = 3797,46835.$$

Полученное значение удовлетворяет условию: $3797,468354 \geq 1,2$.

3.2 Напряжение в оболочке при наличии перепада по толщине анода

В свободной, не закрепленной, цилиндрической оболочке, имеющей перепад температуры по толщине, возникнут температурные напряжения.

Полагаем, что температура по толщине оболочки изменяется по линейному закону (см. рисунок 3.4) и одинакова на всем ее протяжении. В точках, находящихся на значительном расстоянии от концов оболочки, изгиба не будет. Упругую деформацию элемента при тепловом нагружении найдем методом, рассмотренном в выше. Для этого условно фиксируем оболочку жестко по обоим концам, находим значения реактивного момента M_R^* и напряжений σ_x^* , σ_φ^* в местах фиксации оболочки, возникающих в результате ее нагрева.

Далее приложим к краям оболочки изгибающие моменты $M_0 = M_R^* = M_K$ и найдем деформацию и напряжения от этих моментов.

Известно, что упругая деформация элемента при тепловом нагружении, следовательно, и напряжения будут равны сумме деформации зафиксированного состояния и деформации от момента M_0 .

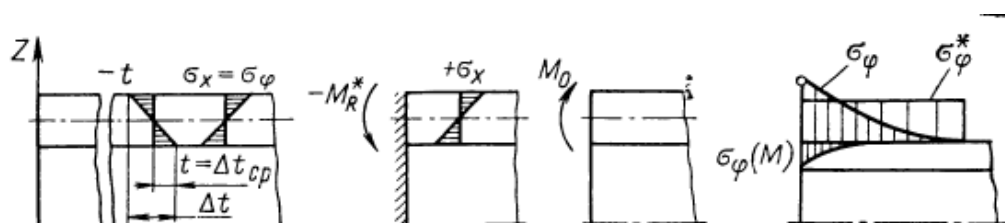


Рисунок 3.4 – Напряжения на кромках свободной оболочки

Итак, дано: r , h , Δt .

Закон изменения температуры по длине анода:

$$\Delta t = B_0 + B_1 z, \quad (3.16)$$

Из условия при $z = 0 \Delta t = 430 \text{ }^\circ\text{C}$; при $z = h \Delta t = 580 \text{ }^\circ\text{C}$; получаем $B_0 = 430$ град; $B_1 = 300$ град/мм.

$$\Delta t = 430 + 300 \cdot 0,5 = 580 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определяем упругую деформацию оболочки и изгибающий момент в заделки:

$$\varepsilon_{XY}^* = -\alpha \Delta t, \quad (3.17)$$

где $\alpha = (21,2 \dots 22,2) \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Рассчитаем упругую деформацию оболочки

$$\varepsilon_{XY}^* = 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 580 = 0,01288.$$

Определяем напряжения согласно эпюру напряжения в оболочке по ее толщине (см. рисунок 3.5) в оболочке в результате фиксации:

$$\sigma_\phi^* = -\frac{E\alpha\Delta t}{1-\mu}, \quad (3.18)$$

$$\sigma_\phi^* = -\frac{1,45 \cdot 10^5 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 430}{1-0,3} = 1977,38571 \text{ МПа}.$$

Определяем изгибающий момент:

$$M_R^* = -\frac{E\alpha\Delta t h^2}{12(1-\mu)}, \quad (3.19)$$

$$M_R^* = \frac{1,45 \cdot 10^5 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 430 \cdot 0,5^2}{12(1-0,3)} = 41,19556 \text{ МПа}.$$

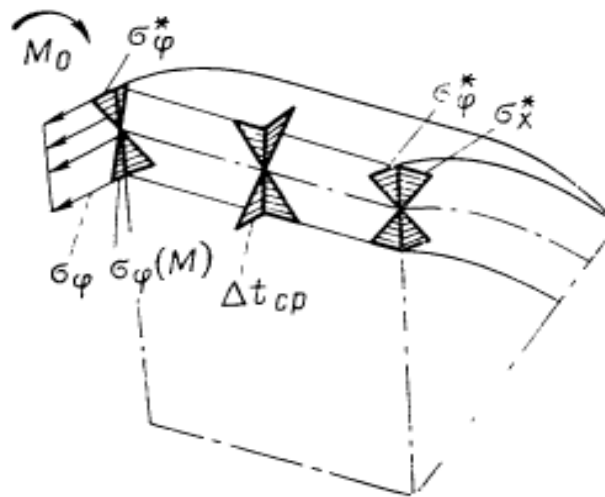


Рисунок 3.5 –Эпюр напряжения в оболочке по ее толщине

Определяем деформацию и напряжения в оболочке под действием изгибающего момента $M_0 = -M_R$:

$$\sigma_x = \frac{6M_0}{h^2}, \quad (3.20)$$

$$\sigma_\phi = \mu\sigma_x(M_0), \quad (3.21)$$

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot 41,195535}{0,5^2} = 988,69284 \text{ МПа},$$

$$\sigma_\phi(M_0) = 0,3 \cdot 988,69284 = 296,607852 \text{ МПа}.$$

Определяем напряжения σ_ϕ :

$$\sigma_\phi = E \frac{\omega(0)}{r}, \quad (3.22)$$

где $\omega(0)$ – прогиб, который определяется по формуле (3.20)

$$\omega(0) = \frac{M_0}{2\beta^2 D}, \quad (3.23)$$

где $2\beta^2 D = 638,592$ – коэффициент, который был определен ранее.

$$\omega(0) = \frac{296,607852}{638,592} = 0,46447 \text{ мм.}$$

$$\sigma_\phi = 1,45 \cdot 10^5 \frac{0,46447}{22,57} = 2983,9779 \text{ МПа.}$$

4 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СПД

Стационарные двигатели активно применяются на современных КА для решения маршевых и буксирных задач, т. е. транспортировка грузов с низкой опорной или переходной орбиты на геостационарную, и коррекция орбиты геостационарных спутников. СПД широко применяется на геостационарных спутниках.

Для корректной отработки этих задач до полета двигатель должен пройти наземные испытания. В наземных условиях необходимо воссоздать условия космического пространства, разработать технологию проведения испытаний с соответствующим оборудованием.

4.1 Виды наземных испытаний СПД

4.1.1 Ресурсные испытания двигателя

Для проведения ресурсных испытаний используют горизонтальную вакуумную камеру объем которой составляет 12...45 м³, а диаметр – 1,8...2,5 м. Испытания проводятся при давлении не более 2·10 мм рт.ст. (по воздуху), при этом статический вакуум (давление в вакуумной камере без расхода рабочего тела) составляет не более 5·10 мм рт.ст. (по воздуху).

С помощью паромасляных диффузионных насосов, снабженных криогенными азотными ловушками, температура рабочих поверхностей которых не превышает 140 К, производится откачка вакуумных камер.

4.1.2 Определение величины загрязнения двигателя

Загрязнение поверхностей двигателя участвующих в его рабочем процессе, изменяет свойства и состояние элемента и в результате оказывает негативное влияние на работоспособность ДУ. Источником загрязнений могут быть не только продукты работы двигателя, но вакуумная камера, в которой проводят испытания СПД.

При загрязнении стенок разрядной камеры и анода – газораспределителя, являющихся важными элементами СПД, образуются темные пленки, что приводит к изменению электрической проводимости отличной от свойств основного

материала. Следовательно, в результате длительных испытаний снижается показатель тяги и увеличивается значение амплитуды колебаний разрядного напряжения. Толщина пленки отложений увеличивается до тех пор, пока не достигнет критического значения и не отслоится от элемента. На верхней внутренней и нижней наружной части камеры разряда происходит скопление фрагментов пленки, в результате их падения под действием гравитационной силы. Попавшие частицы в струю газа, находящуюся в состоянии плазмы, вызывают недолговременное уменьшение сопротивления разрядного промежутка и "бросок" разрядного тока, величина которого определяется нагрузочной характеристикой системы преобразования СПУ. В этом случае визуально наблюдаются "искры", вылетающие из разрядной камеры.

Для оценки скорости нарастания пленки на стенках разрядной камеры и анода устанавливаются датчики из молибдена и керамики. Образцы из молибдена изготавливаются в виде квадратов из фольги со стороной 7 мм и толщиной 0,02 мм. Керамические образцы имеют форму круглых пластин диаметром 5 мм и толщиной 0,8 мм. Для создания датчиков используются изоляционные трубки, применяемые для термопар.

Накопленные частицы пленки, образовавшейся в результате работы двигателя, после 5 – 8 часов испытаний ДУ повторно подвергаются взвешиванию. После экспозиции в течение 5...8 часов в работающем двигателе взвешивание повторялось. Испытания проводятся на вакуумном стенде, описанном в пункте 4.1.1.

4.1.3 Испытания катодов–компенсаторов

Для проведения испытаний газоразрядных катодов необходимо использовать стендовое оборудование, соответствующее определенным требованиям работы и хранения катода в реальных условиях, а также требования к методам измерений.

Оборудование должно состоять из:

– экспериментальной установки необходимой для анализа характеристик катодов, полученных в результате совместной работе с двигателем. А также установка должна обеспечивать проведение испытаний с высокой выработкой откачной системы, таковыми являются длительные ресурсные испытания;

– специальной установки имеющую имитатор ионного пучка для воссоздания условий при реальной работе катода и проверки отдельных элементов и материалов;

– комплекс оборудования для проведения полных и всесторонних испытаний на способность сопротивления климатическим факторам, вибропрочность и сохраняемость при транспортировке и линейных перегрузках.

На основе вышеуказанных требований был разработан стенд, состоящий из трех независимых установок, в каждой из которых есть вакуумная камера системы вакуумирования, охлаждения, электропитания, измерения и вентиляции.

Для проведения исследовательских и совместных испытаний катодов и двигателей, имеющих мощность в пределах до 1...1,5 кВт используется вакуумная камера первой установки, в которой также проводятся ресурсные испытания. Конструкция имеет Г – образную форму цилиндрической полости с внутренним диаметром 900 мм. В установку входят три вакуумных агрегата с азотными ловушками, в которых расход жидкого азота на ловушку при температуре поверхности - 110... -120 °С составляет 8... 10 л/час. Ловушки необходимы для снижения поступления паров масла из насосов в камеру.

При автономных испытаниях катода – компенсатора используется третья установка стендового оборудования. Вакуумная система состоит из камеры объемом 0,5 м³. Рядом с камерой размещена дистанционная панель управления всеми вакуумными насосами, агрегатами и затворами стенда. Для предупреждения и предотвращения аварийных ситуаций в вакуумной системе имеется реле обрыва фаз нагревателей агрегатов, водяное реле, блокировка управления форвакуумными насосами и другими элементами. Измерение давления в камере и насосах производится дистанционно вакуумметром ВИТ-1 с датчиками АТ-1

(ПМТ–2) ЛМ–2 (ПМИ–2), установленными непосредственно на камере и насосах.

4.2 Технология измерения параметров потока ускоренных ионов в струе СПД

В двигателях с высоким удельным импульсом тяги и повышенным значением разрядных напряжений ионы в плазменной струе имеют большую энергию и оказывают значительное воздействие на конструкцию двигательной установки и космического аппарата.

Для определения характеристик струи проводят испытания на стенде с вакуумной камерой диаметр которой равен 2 м, а длина около 3 м, откачка производится с помощью механических вакуумных насосов. Давление в камере при работе двигателя с расходом аргона составляет обычно $(2,5 - 5) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. или $(0,7 - 1,5) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. показаниям датчика, оттарированного на воздух при этом длина свободного пробега атомов составляет более 1 м.

Стенд снабжен всеми необходимыми источниками питания двигателя электроэнергией и средствами измерения разрядного тока и напряжения, токов в катушках намагничивания. Измерения параметров электропитания проводятся с точностью не хуже $\pm 2 \%$. Оборудование стенда включает две независимые системы подачи газа в ускорительный канал и катод двигателя. Точность измерения расхода аргона в ускорительный канал оценена в $\pm 3 \%$ при величине расхода газа 5 мг/с, а точность измерения расхода по катодной линии питания – в $\pm 5 \%$ при величине расхода 0,5 мг/с. Таким образом, тяговый к.п.д. двигателя определяется с точностью $\pm 10 \%$.

Для учета основных электрических параметров, расхода газа, а также для расчета удельного импульса и тяги в стенде имеется система автоматической регистрации.

Измерения параметров струи двигателя на стенде проводятся вдоль сферической контрольной поверхности с центром в точке пересечения оси двигателя с плоскостью среза его ускорительного канала. Расстояние от двигателя до контрольной поверхности выбирается таким образом, чтобы в пределах объема,

ограниченного рассматриваемой поверхностью, процессы взаимодействия «первичных» атомов и ионов между собой были бы в основном завершены, а дальнейшее движение плазмы за пределами этой поверхности было осуществлено без столкновений. Данное расстояние должно составлять около 5 –10 калибров двигателя.

В качестве основного средства диагностики струй СПД на стенде используется плоский электростатический зонд – энергоанализатор, являющийся наиболее надежным и простым в применении. Энергоанализатор устанавливается внутри вакуумной камеры на штанге ось которой направлена в центр окружности с радиусом $R = 0,7$ м по которой и перемещается элемент, расположенной в плоскости, содержащей ось двигателя, с центром в точке пересечения оси двигателя с плоскостью среза ускорительного канала. Предполагается, что ионы распространяются из названного центра и двигаются прямолинейно.

4.2.1 Порядок проведения испытания

При проведении испытания необходимо ознакомить персонал с техникой безопасности, так как работа идет под высоким напряжением и вакуумом.

Технологическое и дополнительное оборудование должно находиться на своих рабочих местах. Двигатель из зоны хранилища транспортируется на специальной тележке в испытательный зал, где при помощи подъемно–перегрузочного оборудования и комплекта гаечных ключей, устанавливается на испытательный стенд. Перед установкой двигателя, проводятся подготовительные работы оборудования стенда и его диагностирование на исправности. Монтируется датчики измерения на стенде. Подсоединяется система подачи рабочего газа двигателя к стационарному источнику стенда, согласно инструкции безопасности. Также в соответствии с техникой безопасности подсоединяются коммутационные соединения питания двигателя к стационарному источнику питания. Соединения монтируются комплектом гаечных ключей. При монтаже соединений присутствует представитель завода изготовителя (авторский надзор). Проводится проверка всех соединений двигателя и датчиков, закрывается вакуумная камера комплектом гаечных ключей с последующей проверкой герметичностью крышки.

Выдается сирена на покидание испытательного зала персонала. Персонал удаляется из зала испытаний в зал управления, ведется видео наблюдения снаружи внутри стенда. Персонал находится в зале управления, где ведется управлением стендом и двигателям, а также система сбора и обработки информации. Начинается подготовка вакуумной камере к откачки. После этого насосами происходит откачка воздуха (до определенного давления), все процессы отображается на экранах дисплея в испытательном зале. Когда давление достигает определенного значения, происходит процесс завершения откачки. При помощи течи искателя определяются герметичность вакуумной камеры. В случаи обнаружение течи, происходит оперативное устранение течи, если течь невозможно устранить, то процесс испытания завершается. В случаи герметичности испытания продолжаются. Включается измерительная аппаратура с пульта управления измерительного зала, а именно:

- включение энергоанализатора и тензометрического датчика;
- ввод программы испытания;

Производится команда на включения двигателя, а именно:

- подача напряжения на двигатель;
- зажигание подачи сигнала на выдачу катода–компенсатора искры.

Осуществляется контроль всех систем стенда с пульта управления. Во время испытания непрерывно работает вакуумная система так как при работе двигателя возникает загрязнение вакуумной камеры рабочим телом. Идет сбор и запись информации поступающий с измерительной аппаратуры стенда на запоминающие устройства, а именно:

- измерение тяги;
- измерения ионного тока.

После необходимого сбора информации, испытания завершаются, двигатель отключается, вакуумная камера приводиться в исходное состояние. Двигатель транспортируется в исходное место, производится регламентные работы стенда для осуществление следующих испытаний.

5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

5.1 Безопасность персонала при подаче электропитания на электроракетный двигатель на испытательном стенде.

При испытаниях электроракетного двигателя СПД обслуживающий персонал подвергается опасности поражения электрическим током, так как СПД подключается к стационарному источнику питания испытательного стенда, который имеет высокие значения силы тока. В случае недопущения поражения током персонала необходимы следующие требования, которые указаны ниже.

Согласно ГОСТ 12.0.004 – 2015 инструкция по охране труда является документом, устанавливающим для работников требования к безопасному выполнению работ. Знание инструкции по охране труда обязательно для всех работников.

В соответствии с инструкцией к проведению измерений и испытаний электрооборудования допускается персонал, прошедший специальную подготовку и проверку знаний правил охраны труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок и электроракетных двигателей комиссией, в состав которой включаются специалисты по испытаниям оборудования, имеющие IV группу – в электроустановках напряжением до 1000 В. А также прошедшие предварительный медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний к выполнению указанной работы.

Допуск к самостоятельной работе оформляется соответствующим распоряжением по структурному подразделению предприятия.

Работник в процессе работы обязан проходить: повторные инструктажи – не реже одного раза в квартал; проверку знаний инструкции по охране труда; проверку знаний правил для работников, имеющих право подготовки рабочего места, допуска. Право быть производителем работ. Наблюдающим или членом бригады, – один раз в год.

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Электробезопасность должна обеспечиваться:

- конструкцией измерительных и испытательных, приборов;
- техническими способами и средствами защиты;
- организационными и техническими мероприятиями.

В действующих электроустановках следует выполнять следующие организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ при испытаниях и измерениях:

- назначение лиц, ответственных за организацию и безопасность проведение работ;
- оформление наряда или распоряжения на производство работ;
- организацию надзора за проведением работ;
- оформление окончания работы, перерыва на работе, переводов на другие виды работ, установление рационального режима труда и отдыха.

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, должны устанавливаться с учетом:

- измерительного (испытательного) напряжения прибора;
- способа электроснабжения (от стационарных сети, автономного источника питания электроэнергией);
- режимы нейтрали (средней точки) источника питания электроэнергией.
- вида исполнения испытательной установки (стационарные, передвижные, переносные);
- условий внешней среды;
- возможности снятия напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых должна проводиться работа;
- видов работ.

В электроустановках не допускается приближение людей, механизмов и грузоподъемных машин к не огражденным токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояния, до 1 кВ на ВЛ – 0,6 м, от механизмов и грузоподъемных машин – 1 м.

Безопасность производства электрических измерений и испытаний должна обеспечиваться: соблюдением установленного порядка и организованности на каждом рабочем месте, высокой производственной, технологической и трудовой дисциплиной; профессиональным отбором, обучением работающих, проверкой их знаний и навыков безопасности труда; использованием производственных помещений, удовлетворяющих соответствующим требованиям и комфортности работающих; оборудованием производственных площадок при выполнении измерений и испытаний вне помещений; использованием исходных заготовок, комплектующих узлов, элементов приспособлений, не оказывающих опасного и вредного воздействия на работающих опасного и вредного воздействия на работающих. При невозможности выполнения этого требования должны быть меры, обеспечивающие безопасность проведения электрических измерений и испытаний и защиту обслуживающего персонала применением средств измерений и испытаний (приборов, приспособлений устройств), не являющихся источником травматизма и профессиональных заболеваний;

- разработкой программ и методик измерений и испытаний, утверждаемых установленном порядке;

- применение надежно действующих и регулярно проверяемых контрольно-измерительных приборов, устройств противоаварийной защиты, средств, получения, переработки передачи информации;

- рациональной организацией рабочего места и размещением приборов;

- обозначение опасных производственных зон и работ.

Во избежание попадания под действие электрического тока не следует прикасаться к оборванным свешивающимся проводам или наступать на них.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под

напряжением в результате повреждения, изоляции, применяют следующие способы:

- защитные заземления;
- зануление;
- выравнивание, уравнивание потенциалов;
- систему защитных проводов;
- защитное отключение;
- изоляцию нетоковедущих частей;
- электрическое разделение сети;
- малое (не более 25 В) напряжение;
- контроль изоляции;
- компенсацию токов замыканию на землю;
- средства индивидуальной защиты.

Технические способы и средства защиты применяют отдельно или комбинировано для обеспечения оптимальной защиты.

Требования безопасности при проведении конкретных электрических измерений и испытаний на производстве должны устанавливаться нормативными актами по охране труда с учетом конкретных условий и утверждается в установленном порядке.

Работник, участвующий в проведении измерений и испытаний электрооборудования, должен работать в спецодежде и применять средства защиты, выдаваемые в соответствии с действующими отраслевыми нормами.

5.2 Требование безопасности при проведении испытаний

Измерения и испытания следует проводить по программам и методикам, техническим условиям организаций – изготовителей или стандартом на продукцию. Измерения и испытания электрооборудования и электроустановок, вновь вводимых в эксплуатацию, проводятся в соответствии с нормами, предусмотренными правилами электроустановок (ПУЭ), требованиями организациями изготовителей, требованиями стандартов, а измерения и испытания действующих электроустановок электрооборудования – в объеме требований норм и правил их

эксплуатации. Испытательные установки (электролаборатории) должны быть зарегистрированы в органах Ростехнадзора.

Подготовку объекта и средств измерения к испытаниям или измерениям следует проводить при отсутствии на них напряжения и остаточного заряда. Рабочее напряжение и остаточный заряд должны также быть сняты с других объектов (других частей объектов испытаний и измерений), если не исключено прикосновение или напряжение к ним или эти объекты должны быть на время подготовки и проведения испытаний ограждены.

Сборку и испытательных и (или) измерительных цепей следует выполнять при отсутствии на объекте испытания и (или) измерения или его части на средствах измерения и (или) испытания напряжения и остаточного заряда.

Место проведения испытаний или измерений следует ограждать. Ограждение выполняется персоналом бригады, проводящей испытания или измерений. В качестве ограждения могут применяться щиты, барьеры канаты с подвешенными на них плакатами «Испытания опасно для жизни!».

Для наблюдения за состоянием цепей испытания (измерения), или объекта испытаний (измерений) при нахождении их в разных помещениях или местах (участках) в случае необходимости в помещении отдельно от руководителя работ по испытаниям (измерениям) или производителя работ разрешается по условиям работы оставаться одному работнику из состава бригады, имеющему группу по электробезопасности не ниже III. Работник должен получить необходимый инструктаж от руководителя (производителя) работ.

Рекомендуется в зонах испытания двигательной установки соблюдать меры осторожности согласно правилам работы с инертными газами. При проведении работ необходим строгий контроль за уровнем кислорода в помещении, объемная доля кислорода в воздухе рабочей зоны должна быть не ниже 19%. При объемной доле кислорода в воздухе менее 19% должны быть приняты срочные меры по устранению утечек инертных газов, по вентиляции и проветриванию помещений и, в случае необходимости, по прекращению работ и эвакуации персонала. В исключительных случаях, допускается кратковременное пребывание

людей при объемной доле кислорода в воздухе менее 16% с обязательным применением шланговых и кислородно–изолирующих противогазов. Использование фильтрующих противогазов всех марок для работы в среде с пониженным содержанием кислорода воспрещается.

5.3 Безопасность труд персонала при работе с вакуумной камерой при испытании электроракетного двигателя.

Электроракетный двигатель работает в вакууме, необходимо создать вакуум в наземных условиях. При этом используется вакуумное оборудование, которые имеют следующие требования к безопасности труда.

5.3.1 Общие требования

Для получения допуска к эксплуатации вакуумной станции работник должен сдать зачет, назначенный приказом эксплуатирующей организации. Лица, сдавшие зачет, получают удостоверения на право допуска к работе на вакуумной станции. Повторная сдача зачетов и оформление допуска к работе проводятся 1 раз в 6 месяцев.

Перед началом работ на вакуумной камере необходимо получить задание на проведение работ и пройти инструктаж на рабочем месте. В журнале по технике безопасности делается соответствующая отметка за подписями лица, проводившего инструктаж и лица, допускаемого к проведению работы.

5.3.2 Правила по безопасности труда при испытании изделий

Конструктивные параметры камеры должны обеспечивать беспрепятственный доступ обслуживающего персонала ко всем ее элементам для проведения профилактических работ, осмотра, оттаивания. Для входа во внутрь камера должна быть оборудована входным люком, открывающимся снаружи и изнутри а также устройством не допускающим самопроизвольное закрытие люка. Помимо этого, необходимы средства предупредительной световой сигнализация, показывающей открыт или закрыт люк

В случае если при установке изделия в камере находятся люди необходимо оборудовать ее кнопками аварийной сирены, установленными на световом табло внутри камеры, и клапаном аварийного сброса давления.

Камеры, имеющие высоко расположенные узлы системы, которые нельзя безопасно и удобно обслуживать с пола, следует оборудовать специальными площадками и лестницами.

5.3.3 Требования к эксплуатации камер

Все работы во подготовке и проведению испытаний должны проводиться в соответствии с утвержденной технологической и технической документацией (программы, схемы и т.д.) и настоящими правилами.

Эксплуатация новой или реконструированной камеры должна проводиться только после приемки ее комиссией, назначенной приказом (распоряжением) по предприятию.

Камера должна эксплуатироваться только на тех режимах, на которые она рассчитана, и в полном соответствии с эксплуатационной документацией,

Перед испытанием изделий необходимо проверить исправность камеры и всех ее систем.

Установка изделия на стенд должна обеспечивать его устойчивое положение.

Установка, монтаж, демонтаж изделия и другие работы в камере с присутствием в них людей должны проводиться; при открытом люке камеры, при этом должны быть приняты меры, исключающие самопроизвольное закрытие камеру (выдвинут предохранительный штырь, опущена предохранительная планка и т.п.); при отключенных насосах и компрессорах; при отключенном электрическом напряжении на всех электрических щитах внутри камеры; с применением исправной технологической оснастки, соответствующей нормативно-технической документации на нее и указанной в технологической документации. При этом должны быть вывешены знаки безопасности: «Не включать, работают люди».

При обработке внутренних поверхностей корпуса вакуумной камеры бензином и спиртом должны работать в шланговом противогазе.

При испытании изделий нахождение людей в камере запрещено. Закрывать и открывать люк камеры допускается с разрешения лица, ответственного за

испытание. Разрешение закрывать люк дается после проверки, подтверждающей отсутствие человека внутри камеры

При возникновении неисправностей во время испытании изделий необходимо их немедленно прекратить, принять меры к устранению неисправностей с соблюдением требований безопасности, изложенных в инструкции по охране труда.

Открывать люк камеры и входить в нее следует после того, как будут отключены компрессоры, насосы, электрическое напряжение на всех электрических щитах внутри камеры; концентрации вредных, взрывопожароопасных веществ не будут превышать допустимые нормы. Для этого камеру необходимо провентилировать и газоанализаторам (сигнализаторам) проконтролировать уровень концентраций; температура воздуха в камере и температура испытываемых изделий и внутренней поверхности камеры не будут превышать допустимые нормы. При необходимости работы в камере при температуре, отличной от допустимой, следует регламентировать продолжительность работы. Режимы труда и отдыха устанавливает администрация предприятия по согласованию с профсоюзным комитетом.

6 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПЕРЕЛЕТА

В данной части дипломного проекта приводится расчет для обоснования экономической рациональности проектирования электроракетного двигателя для межпланетного перелета.

Для этого необходимо рассчитать затраты на проектирование электроракетного двигателя, затраты на приобретение расходных материалов на изготовление комплектующих для его создания и описать экономический эффект от его внедрения.

При анализе целесообразности данную разработку следует, рассматривать как некоммерческий продукт в том смысле, что она не предназначена для широкого тиражирования и продажи с целью получения прибыли.

6.1 Возможный рынок применения электроракетного двигателя для межпланетного перелета

Главный заказчик: Федеральное Космическое Агентство (Российская Федерация), Европейское Космическое Агентство (Европейский союз).

Возможное использование: использование в составе космического аппарата для межпланетных перелетов к планетам и их спутникам солнечной системы, а также использование в качестве двигателей разгонных блоков, космических аппаратов различного класса.

Жизненным циклом электроракетного двигателя считается весь цикл от принятия решения о проведении разработок до полного отказа конечного пользователя. План проведения работ представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – План проведения работ

Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, часы
Разработка и утверждение технического задания изделия	Инженер	16

Продолжение таблицы 6.1

Консультация с руководителем	Руководитель (старший преподаватель)	24
Расчет основных проектных параметров изделия	Инженер	56
Расчет на прочность основных элементов изделия	Инженер	56
Разработка сборочного чертежа изделия	Инженер	56
Разработка технологической схемы членения изделия	Инженер	8
Разработка сборочных чертежей дополнительных агрегатов изделия.	Инженер	24
Разработка маршрутной и операционной технологии изготовления изделия	Инженер	24
Написание документации по безопасности жизнедеятельности при работе с изделием	Инженер	16
Экономическое обоснование изделия	Инженер	16
Подготовка технической документации изделия	Инженер	8
Сдача результатов проектирования	Инженер	3
Всего		307

6.2 Оценка конкурентоспособности электроракетного двигателя для межпланетного перелета

Двигателя подобного принципа действия за рубежом не существует. Применение дешевых конструкционных материалов, простота конструкции и применение более дешевого рабочего тела двигателя даёт более дешёвый способ изучения планет солнечной системы. При таких возможностях двигателя может возникнуть заинтересованность использования такого двигателя в иностранных, отечественных космических аппаратах для межпланетных перелетов.

6.3 Себестоимость электроракетного двигателя для межпланетного перелета

В качестве конечного результата дипломного проектирования может рассматриваться прототип интеллектуальной системы, демонстрирующей возможности применения теоретических разработок и не предполагающей выход на рынок научно–технической продукции. Следовательно, основными источниками затрат являются капитальные производственные затраты, которые в свою очередь могут быть учтены и минимизированы.

В себестоимость работы включаются все затраты, связанные с ее выполнением вне зависимости от источника ее финансирования. Калькуляция себестоимости составляется по следующим пунктам:

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

В таблице 6.2 представлены затраты на расходные материалы.

Таблица 6.2 – Затраты на расходные материалы

Наименование материала	Кол–во	Цена, руб.	Сумма затрат, в руб.
Калькулятор инженерный	1	700	700
Канцелярские товары	–	–	400
Копировальная бумага	1	150	150
Ватман А1	10	100	1000

Продолжение таблица 6.2

Тонер для принтера Canon BLP–6000	1	350	350
MS Office 2019	1	5379	5379
AutoCAD 2020	1	82774	82774
Итого:			90753

В таблице 6.3 представлена основная заработная плата разработчиков.

Таблица 6.3 – Основная заработная плата разработчиков

Наименование этапов	Исполнители	Трудоем– кость, человек/ча– сов	Заработная плата, руб.	Затраты по за– работной плате, руб.
Разработка и утверждение тех– нического задания изделия	Инженер	1/16	20500	700
Консультация с руководителем	Руководитель (старший препода– ватель)	1/24	30890	4621
Расчет основных проектных па– раметров изделия	Инженер	1/56	20500	7000
Расчет на прочность основных элементов	Инженер	1/56	20500	7000
Разработка сборочного чертежа изделия	Инженер	1/56	20500	7000
Разработка технологической схемы членения изделия	Инженер	1/8	20500	1000
Разработка сборочных чертежей дополнительных аг– регатов изделия.	Инженер	1/24	20500	3000

Продолжение таблицы 6.3

Разработка маршрутной и операционной технологии изготовления изделия	Инженер	1/24	20500	3000
Написание документации по безопасности жизнедеятельности при работе с изделием	Инженер	1/16	20500	2000
Экономическое обоснование изделия	Инженер	1/16	20500	2000
Подготовка технической документации изделия	Инженер	1/8	20500	1000
Сдача результатов проектирования	Инженер	1/3	20500	375
Всего:				38696

Оклад руководителя проекта (старший преподаватель): 30 890 рублей;

Оклад инженера: 20 500 рублей.

Определяем стоимость одного часа от суммы оклада за месяц по формуле 6.1:

$$C_p = \frac{C}{N \cdot T}, \quad (6.1)$$

где C – оклад зарплаты;

N – число рабочих дней в месяце ($N = 22$ дня);

T – число часов в одном рабочем дне ($T = 8$ часов).

1) для руководителя проекта:

$$C_p = \frac{30890}{22 \cdot 8} = 175,51 \text{ рублей};$$

2) для инженера:

$$C_p = \frac{20500}{22 \cdot 8} = 116,48 \text{ рублей.}$$

Дополнительной заработной платой составляет 20 % от основной заработной платы, рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_d = 20/100 \cdot \Phi_{oc}, \quad (6.2)$$

где Φ_d – дополнительная заработная плата разработчиков, рублей;

Φ_{oc} – фонд основной заработной платы разработчиков, рублей.

$$\Phi_d = 0,2 \cdot 38696 = 7739 \text{ рублей.}$$

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

$$CB = 30,2/100 \cdot (\Phi_{oc} + \Phi_d), \quad (6.3)$$

где CB – страховые взносы пенсионный фонд и фонды социального страхования;

$$CB = (38696 + 7739) \cdot 0,302 = 14023,37 \text{ рублей.}$$

Накладные расходы составляют 180 – 250 % от величины основной заработной платы. В данном случае берется значение 215 %. Таким образом, расчет накладных расходов осуществляется по формуле:

$$H_p = 215/100 \cdot \Phi_{oc}, \quad (6.4)$$

где H_p – накладные расходы;

$$H_p = 2,15 \cdot 38696 = 83196,4 \text{ рублей;}$$

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

$$Z_{пр} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (6.5)$$

$$Z_{пр} = 264 \cdot 50 \cdot 0,9 = 11880 \text{ рублей,}$$

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

$$N = (56+56+56+8+24+24+16+16+8) = 264 \text{ часов.}$$

$C_{мч}$ – стоимость машино–часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 50 рублей,

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

В таблице 6.4 представлена себестоимость проектирования двигателя.

Таблица 6.4 – Себестоимость проектирования двигателя

Наименование статей расходов	Затраты, руб.
Расходные материалы	90753
Основная заработная плата разработчиков	38696
Дополнительная заработная плата разработчиков	7739
Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	14023,37
Накладные расходы	83196,4
Прочие расходы	11880
Итого:	329484,17

Для создания опытного образца необходимы комплектующие изделия, стоимость которых приведена в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Расходные материалы на создание комплектующих

Наименование изделия	Единицы измер.	Кол–во	Цена, руб.	Сумма, руб.
Сталь марки 10830	кг	7	318,74	2231,18
Высокотемпературный провод марки ПОЖ–700М	м	2000	156	312000

Продолжение таблицы 6.5

Сталь марки 12X18H10T	кг	7	349	2443
Молибден	кг	7	2750	19250
Керамический материал АБН	кг	7	900	6300
Итого:				342224,18

Для внедрения данной разработки необходимо следующее оборудование, стоимость которого приведена в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Стоимость необходимого оборудования

Наименование оборудования	Ед. измер.	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
Вакуумная установка с соответствующим оборудованием	штук	1	10000000	10000000
Рабочий газ двигателя (аргон*)	штук	600	1652	991200
Итого:				10991200

*Аргон используется при испытаниях в баллонах.

6.4 Оценка косвенного экономического эффекта

Исследование солнечной системы с данным двигателем для перемещения в космическом пространстве имеет преимущества по сравнению с химическими двигателями, которые также применяются в межпланетных космических аппаратах, но более дорогостоящие в производстве и проектировании:

- применение дешевых конструкционных материалов,
- простота конструкции и применение более дешевого рабочего тела двигателя.

Все эти преимущества дают более дешевый способ изучения планет солнечной системы по сравнению с химическими двигателями. При таких

возможностях может возникнуть заинтересованность использования такого двигателя в иностранных, отечественных космических аппаратах для межпланетных перелетов.

Применение такого двигателя только для межпланетных перелетов нецелесообразно, так как изучение планет имеет научный характер и не имеет прибыли. Целесообразно его использовать в качестве маршевых двигателей разгонных блоков космических аппаратах. Это даёт возможность более дешево вывести на околоземную орбиту спутники связи, зондирования и навигации.

С внедрением данного двигателя можно получить следующие выгоды:

- дешевый способ изучения планет солнечной системы;
- универсальность (применение на межпланетных аппаратах и на разгонных блоках для выведения различных аппаратов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был осуществлен расчет основных геометрических и энергетических параметров СПД двигателя. Получены следующие энергетические параметры:

- Удельный импульс: $J_{уд} = 30000 \text{ м/с}$;
- Время работоспособности двигателя: $\tau = 24902,3612 \text{ часов}$;
- Ток разряда двигателя: $I_p = 0,12489 \text{ А}$;
- Напряжение разряда: $U_p = 270739 \text{ В}$;
- Мощность разряда двигателя: $N_{p(дв)} = 33812,60343 \text{ Вт}$;
- Тяговой эффективностью (к.п.д.) двигателя: $\eta = 0,73285$.

Геометрические параметры, представленные в таблице 2.2 были рассчитаны таким образом, чтобы СПД поддерживал необходимые характеристики, а в частности имел повышенное значение удельного импульса.

Особенность данной конструкции ДУ заключается в магнитной системе с увеличенным количеством ампер – витков и выбранной схемой катушек намагничивания. Количество составляет – 984 витка. Схема включает 2 внутренние катушки по 296 витков и четыре наружные катушки по 98 витков. Такая модель магнитной схемы обеспечит эффективную работу СПД при повышенных значениях разрядного напряжения.

При расчете параметров катода–компенсатора были выявлены соответствующие ниже следующие признаки:

Уменьшение давления в полости катода с внутренним разрядом от 1 до 10–2 мм рт. ст. приводит к увеличению газовой эффективности. При уменьшении давления в полости катода цена электрона увеличивается. Увеличение мощности, потребляемой внутренним разрядом, при уменьшении давления в полости катода несущественно.

Получены следующие параметры катода:

- Ток разряда двигателя: $I_p = 0,0012489 \text{ А}$;
- Напряжение разряда: $U_p = 2,142846 \text{ В}$;
- Мощность разряда катода: $N_p = 0,02676 \text{ Вт}$.

Также была рассчитана система хранения и подачи рабочего тела в СПД и определены следующие конструктивные параметры:

- Сферическая форма бака;
- Масса бака: $M_{кб} = 606,78427 \text{ кг}$;
- Масса заправленного бака: $M_{зб} = 5985,69427 \text{ кг}$;
- Коэффициент складирования: $\gamma = 1,11$;
- Рабочее тело хранится в газообразном состоянии.

Для системы питания СПД двигателя был выбран изотопный генератор. В топливном блоке барабанного типа изотопного генератора нужно разместить шесть ампул длиной 22,5 см.

Так же был произведен расчет прочности анода в СПД. Так как одной из наиболее напряженных деталей плазменного двигателя является его анод.

Определены напряжение и запаса прочности цилиндрического анода по длине анода получены следующие данные:

- Температурное напряжение: $\sigma_{В,t}^{(t)} = 30 \text{ МПа}$;
- Определены напряжения:
 $\sigma_{\phi} = 0,025 \text{ МПа}$;
 $\sigma_x = 0,0092 \text{ МПа}$;
 $\sigma_{\phi}(M) = 0,0027 \text{ МПа}$.
- Обобщенное напряжения в оболочке: $\sigma_i = 0,007989 \text{ МПа}$.

Определены напряжения в оболочке при наличии перепада по толщине анода получены следующие даны:

- Определяем изгибающий момент: $M_R^* = 41,195535 \text{ МПа}$;
- Напряжение $\sigma_{\phi} = 2983,9779 \text{ МПа}$;

– Прогиб $\omega(0) = 0,46447$ мм.

По полученным результатам можно судить, что анод воспринимает большие нагрузки, что требует усиления конструкции, а также проведения дополнительных испытаний двигателя, то есть проведения ресурсных испытаний.

В связи с увеличенным значением тяги в 1,5 Н и суммарным массовым расходом в $0,05 \cdot 10^{-3}$ килограмм в секунду происходит увеличение разрядного напряжения и скорости ионов, что приводит к повышению значения разрядной мощности. Для оптимальной работы ДУ и достижения большего ресурса, необходимо обеспечить умеренный уровень мощности с помощью уменьшения расхода рабочего газа через ускорительный канал, но это приводит к снижению тяговой эффективности. В результате проведенных ранее исследований было определено, что одной из причин приводящих к ухудшению КПД является увеличение потерь ионов на стенках, которые в свою очередь приводят к расширению зоны износа и увеличению скорости распыления стенок разрядной камеры. Для решения данной проблемы предлагается использовать магнитный экран, что обеспечивает расширение возможностей управления положением зоны ускорения ионов и зон эрозии стенок разрядной камеры.

В разделе БЖД были рассмотрены правила безопасности при испытание СПД двигателя. Для проверки правильности работы двигателя проводятся испытания в вакуумной камере. Воздействия плазмы на человека невозможно, так как образование плазмы происходит в вакуумной камере без участия персонала, но так имеется работа с вакуумом и электричеством необходимо соблюдать правила безопасности. Так как в качестве рабочего тела используется инертный газ аргон, в разделе рекомендованы меры предосторожности при работе с газом. В этом разделе рассмотрены следующие пункты: безопасность персонала при подаче электропитания на электроракетный двигатель на испытательном стенде; безопасность труд персонала при работе с вакуумной камерой при испытания электроракетного двигателя.

В экономическом разделе рассмотрены вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на разработку электроракетного

двигателя для межпланетного перелета.

В результате расчета были определена себестоимость проектирования двигателя: 62340,66 рублей; расходные материалы на создание комплектующих: 342224,18 рублей; стоимость необходимого оборудования для внедрения в производство: 10991200 рублей. Следовательно общая сумма затрат составляет 11662908,35 рублей.

Стоимость двигателя подобного класса не высока при условии производства и испытания в научно–производственных объединениях, где исследовательская, производственная и испытательная база располагается вместе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Ким В. П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики, 2015, том 85 – 45–59 с

2 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.

3 Хартов С.А. Расчет элементов двигательной установки со стационарным плазменным двигателем: Учеб. пособие. – М.: Изд–во МАИ–ПРИНТ, 2009. – 84с.: ил.

4 Белан Н.В. Стационарные плазменные двигатели: Учебное пособие / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1989. – 320 с.

5 Горшков О. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А Шагайда. – М.: Машиностроение, 2008. – 280 с.

6 Гришин С.Д. Электрические ракетные двигатели / С.Д.Гришин, Л.В.Лесков, Н.П.Козлов – М.: Машиностроение 1975 – 272 с.

7 Демидов А.С. Конструкция электроракетных двигателей / А.С. Демидов, С.А. Хартов – М.: Изд–во МАИ 2018 44 с.

8 Фаворский О.Н. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок / О.Н. Фаворский, В.В Фишгойт, Е.И. Янтовский – М.:Высш. школа 1978 – 384 с.

9 Ким В. П. Стационарные плазменные двигатели в России: проблемы и перспективы //Труды МАИ. 2013. № 60 – 1 – 12 с.

10 Полубелов Н. А. Особенности нового поколения плазменных двигателей СПД–140. / Н. А. Полубелов, Е. П. Олейников – М.: Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2018. № 1. – 162 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет проектных параметров термодросселя

Термодроссель используется для регулирования требуемого расхода рабочего вещества. Расход газа зависит от температуры при заданном перепаде давления и геометрических параметров капиллярной трубки, а сама температура газа, зависит от значения тока, пропускаемого через трубку.

Секундный расход рабочего тела через термодроссель на анод определяется по формуле:

$$\dot{m} = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{P \cdot d_{\text{тд}}^2}{\mu \cdot R \cdot l \cdot T}, \quad (1)$$

где P – усредненное давление ($P = \frac{P_{\text{вх}} + P_{\text{вых}}}{2}$);

$P_{\text{вх}}$ – давление на входе в термодроссель;

$P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из термодросселя;

$d_{\text{тд}}$ – внутренний диаметр термодросселя;

ΔP – разность давлений на входе и выходе из термодросселя;

T – температура рабочего вещества в термодросселе ($T = 400$ К);

μ – коэффициент вязкости (для аргона $\mu = 309,96 \cdot 10^{-7}$ Н·с/м²);

l – длина термодросселя (примем $l = 1$ м);

R – газовая постоянная для аргона ($R = 208$ Дж/кг·К).

Давление на входе в термодроссель равно давлению в ресивере $P_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^5$ Па. Для достижения необходимого давления на выходе из термодросселя заданном соотношением: $\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = 1000$. Отсюда давление на выходе из термодросселя

равно $P_{\text{вых}} = 2 \cdot 10^2$ Па.

Усредненное давление P равно:

$$P = \frac{P_{\text{ВХ}} + P_{\text{ВЫХ}}}{2}, \quad (2)$$

$$P = \frac{2 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^2}{2} = 1,001 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Изменение давления определяется как разность давления на входе и выходе:

$$\Delta P = 2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^2 = 199800 \text{ Па.}$$

Из формулы (14) определим внутренний диаметр термодросселя:

$$d_{\text{тд}} = \sqrt[4]{\frac{128 \cdot 309,963 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 1,001 \cdot 10^5 \cdot 1,998 \cdot 10^5}} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Расчет проектных параметров жиклера

Дальнейшее снижение давления в системе подачи происходит в жиклере, который представляет собой пластинчатую шайбу с отверстием.

Секундный расход рабочего тела через жиклер определяется по формуле:

$$m' = \sqrt{\frac{k}{RT_{0\text{ж}}}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot P_{0\text{ж}} \cdot S_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{жс}}$ – площадь поперечного сечения жиклера, приведенная площадь;

$P_{0\text{жс}}$ – давление в жиклере (принимается давление на входе в жиклер $P_{0\text{жс}}$ равным давлению на выходе из ресивера и равным $P_{0\text{ж}} = 2 \cdot 10^5$ Па);

k – коэффициент адиабаты (для аргона $k = 1,6677$);

$T_{0\text{жс}}$ – температура в жиклере ($T_{0\text{жс}} = 293$ К);

R – газовая постоянная для аргона ($R = 208$ Дж/кг·К).

С учетом того, что 90 % рабочего вещества поступает в ГРК, а остальные 10 % – на катод, имеем:

$$\dot{m}'_1 = 0,9 \cdot \dot{m} = 0,9 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$$

Приведенная площадь жиклера находится по формуле:

$$S_{\text{ж}} = \frac{\dot{m}'}{P_{0\text{ж}} \sqrt{\frac{k}{RT_{0\text{ж}}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}, \quad (4)$$

$$S_{\text{ж}1} = \frac{4,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{1,667}{293 \cdot 208} \cdot \left(\frac{2}{1,667+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2.$$

Определим диаметр жиклера:

$$d_{\text{ж}1} = \sqrt{\frac{4S_{\text{ж}1}}{\pi}}, \quad (5)$$

$$d_{\text{ж}1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{3,14}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$