Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Любинская Наталия Валентиновна

# АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук, академик РАН Попов Гарри Алексеевич

Москва – 2020 г.

# Оглавление

Введение	5
Глава 1 Современное состояние исследований и разработок	
двигателей, пригодных для малоразмерных КА	11
1.1 Особенности малоразмерных КА и характеристики двигательных	
установок, необходимых для управления их движением	11
1.2 Анализ современного состояния развития микродвигателей	18
1.3 Выбор принципиальной схемы АИПД и основных параметров для	
решения задач управления движением МКА	39
Глава 2 Исследование характеристик микро-АИПД	44
2.1 Экспериментальный стенд и методики определения интегральных	
характеристик двигателя и параметров плазмы 4	44
2.1.1 Спектроскопический метод измерения концентрации электронов 4	48
2.1.2 Интерферометрический метод измерения концентрации электронов	50
2.1.3 Измерение магнитных полей в плазме АИПД	54
2.1.4 Методика измерения температурных режимов работы АИПД	57
2.1.5 Погрешности измерения	50
2.2 Экспериментальные исследования рабочих процессов в лабораторных	
моделях с энергией до 10 Дж 6	51
2.2.1 Базовая лабораторная модель микро АИПД с энергией	
разряда до 10 Дж	51
2.2.2 Определение характеристик, режимов работы и условий сохранения	
работоспособности модели микро-АИПД с энергией разряда	
менее 10 Дж	65
2.3 Экспериментальные исследования рабочих процессов в	
лабораторной модели диапазона энергии от 10 до 20 Дж 8	84
2.3.1 Лабораторная модель АИПД с диапазоном энергии	
от 10 до 20 Дж 8	84

в микро-АИПД.       8         2.3.3 Результаты магнитозондовых измерений в канале АИПД-4к.       9         Глава 3 Квазиодномерная физико-математическая модель процесса ускорения, ориентированная на многопериодный характер разряда в абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии.       9         3.1 Обзор существующих физико-математических моделей.       9         3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели, ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД       1         3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения.       1         3.5 Уравнения зволюции плазменных сгустков в процессе ускорения.       1         3.4 Основные допущения.       1         3.5 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустков.       1         3.10 Сновные уравнения физико-математической модели процесса ускорения.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1	2.3.2 Результаты определения концентрации электронов	
2.3.3 Результаты магнитозондовых измерений в канале АИПД-4к	в микро-АИПД	87
Глава 3 Квазиодномерная физико-математическая модель процесса         ускорения, ориентированная на многопериодный характер разряда в         абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии	2.3.3 Результаты магнитозондовых измерений в канале АИПД-4к	90
ускорения, ориентированная на многопериодный характер разряда в абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии	Глава 3 Квазиодномерная физико-математическая модель процесса	
абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии.       9         3.1 Обзор существующих физико-математических моделей.       9         3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели,       9         ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД       1         3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и       9         ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения.       1         3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения.       1         3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка.       1         3.7 Уравнение состояния и температура плазмы.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков.       1         3.10 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1         4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-	ускорения, ориентированная на многопериодный характер разряда в	
3.1 Обзор существующих физико-математических моделей.       9         3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели,       9         ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД       1         3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и       9         ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения.       1         3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения.       1         3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка.       1         3.7 Уравнение состояния и температура плазмы.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустков.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса       1         ускорения плазмы в АИПД.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1         3.14 Соновные уравнения физико-математической модели.       1         3.15 Гоновные уравнения физико-математической модели.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.	абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии	96
3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели,       ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД       1         3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и       ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения	3.1 Обзор существующих физико-математических моделей	96
ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД 1 3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде 1 3.4 Основные допущения	3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели,	
3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения	ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД	10
ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде       1         3.4 Основные допущения	3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и	
3.4 Основные допущения.       1         3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения.       1         3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка.       1         3.7 Уравнение состояния и температура плазмы.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса       1         ускорения плазмы в АИПД.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1 <b>Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности</b> 1 <b>разрядного контура на характеристики микро-АИПД</b> .       1         4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования       1         начальной индуктивности разрядного контура.       1	ускорения плазмы в импульсных двигателях с малой энергией в разряде	10
3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения	3.4 Основные допущения	10
3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка.       1         3.7 Уравнение состояния и температура плазмы.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса       1         ускорения плазмы в АИПД.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1 <b>Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности</b> 1         4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования       1         начальной индуктивности разрядного контура.       1	3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения	10
3.7 Уравнение состояния и температура плазмы.       1         3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков.       1         3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса       1         ускорения плазмы в АИПД.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1 <b>Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности</b> 1         4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования       1         начальной индуктивности разрядного контура.       1	3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка	11
3.8 Формирование плазменных сгустков.       1         3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция.       1         3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков.       1         3.8.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи       1         в плазменных сгустках.       1         3.10 Уравнения внешнего разрядного контура.       1         3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса       1         ускорения плазмы в АИПД.       1         3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.       1         3.13 Результаты численного математического моделирования.       1 <b>Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности</b> 1         4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования       1         начальной индуктивности разрядного контура.       1	3.7 Уравнение состояния и температура плазмы	11
3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция	3.8 Формирование плазменных сгустков	11
3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков	3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция	11
<ul> <li>3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи</li> <li>в плазменных сгустках</li></ul>	3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков	12
в плазменных сгустках	3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи	
<ul> <li>3.10 Уравнения внешнего разрядного контура</li></ul>	в плазменных сгустках	12
<ul> <li>3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса</li> <li>ускорения плазмы в АИПД</li></ul>	3.10 Уравнения внешнего разрядного контура	12
ускорения плазмы в АИПД.13.12 Компьютерная реализация физико-математической модели.13.13 Результаты численного математического моделирования.1 <b>Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности</b> 1разрядного контура на характеристики микро-АИПД.14.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования1начальной индуктивности разрядного контура.1	3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса	
<ul> <li>3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели</li></ul>	ускорения плазмы в АИПД	12
<ul> <li>3.13 Результаты численного математического моделирования</li></ul>	3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели	13
Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности разрядного контура на характеристики микро-АИПД 1 4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования начальной индуктивности разрядного контура 1	3.13 Результаты численного математического моделирования	13
разрядного контура на характеристики микро-АИПД 1 4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования начальной индуктивности разрядного контура 1	Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности	
<ul><li>4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования</li><li>начальной индуктивности разрядного контура</li></ul>	разрядного контура на характеристики микро-АИПД	13
начальной индуктивности разрядного контура 1	4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования	
	начальной индуктивности разрядного контура	13

4.2 Экспериментальное исследование влияния начальной	
индуктивности разрядного контура на характеристики лабораторной	
модели АИПД-ИТ	138
4.3 Изменение индуктивности за счёт изменения формы разрядного	
канала	142
4.4 Экспериментальный образец ДУ ИПД-120	145
4.5 Улучшение характеристик ДУ ИПД-120 путём изменения	
начальной индуктивности разрядного контура	149
Заключение	154
Список сокращений и условных обозначений	156
Список литературы	157

### Введение

#### Актуальность избранной темы

В настоящее время наблюдается неуклонный рост числа малоразмерных космических аппаратов (МКА) с массой от единиц до нескольких десятков килограммов.

В различных странах, включая Россию, рассматривается использование МКА в орбитальных группировках, содержащих от нескольких единиц до нескольких сотен аппаратов. Количество космических аппаратов (КА) в группировках определяется как поставленной задачей, так и стоимостью самого КА, затратами на выведениеего на орбиту и эксплуатацию. Анализ как реализованных, так и перспективных проектов космических систем на базе МКА в области связи, дистанционного зондирования Земли и ряда других направлений показывает, что они позволяют решить весьма широкий спектр задач по указанным направлениям. С помощью малоразмерных спутников можно решать различные задачи в научных и прикладных областях, а также для отработки и демонстрации новых технологий.

МКА особенно привлекательны для так называемых космических развивающихся стран, то есть государств, обладающих необходимыми научнотехническими знаниями и некоторым опытом космических исследований и стремящихся активно участвовать в процессе исследования и использования космоса.

Малоразмерные КА не являются средством решения всех возможных задач, но они дают возможность осуществления значительных научных и прикладных проектов в качестве дополнения к масштабным задачам исследования и использования космоса. Возможности МКА значительно возрастают по мере совершенствования служебной и целевой аппаратуры. МКА, концентрирующие в себе новейшие технологии, могут в ряде случаев иметь более высокое отношение массы целевой аппаратуры к массе всего КА, чем традиционные «тяжелые» спутники.

Подавляющее большинство МКА используется на орбитах до 700 км, то есть на высотах, где действие остаточной атмосферыи других факторовна аппарат ещё заметно, вследствие чего аппарат (тем более система аппаратов) нуждается в средствах поддержания его орбитального положения.

Для решения такого рода задач управления движением МКА существует необходимость в разработке высокоэффективного малогабаритного двигателя коррекции и поддержания орбит. В этом качестве, среди широкого спектра двигателей космических аппаратов, перспективным к применению является абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД), который обладает такими достоинствами как возможность точной дозировки импульса, достаточно высокий ресурс, постоянная готовность к работе, низкая инерционность.

#### <u>Цель работы</u>

Целью работы является разработка научных основ создания микро-АИПД малой массы с энергией разряда до 20 Дж с высокими, для малых энергий и мощностей, удельными параметрами.

#### Задачи исследования

В соответствии с целью диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка физико-математической модели течения плазмы для случая АИПД с низким уровнем энергии разряда;

2. Экспериментальное исследование тягово-энергетических характеристик и рабочих процессов АИПД малой энергии при различных значениях индуктивности, ёмкости и сопротивления разрядной цепи; выбор схемно-конструкторского решения исполнения двигателя малой массы с высокими удельными параметрами;

3. Теоретический анализ влияния параметров разрядной цепи АИПД малой энергии на его характеристики и экспериментальное подтверждение полученных результатов.

6

#### Научная новизна

1. Разработана физико-математическая модель течения плазмы в АИПД рельсовой геометрии с низким уровнем энергии, позволяющая на стадии проектирования оценить влияние геометрических параметров и параметров разрядной цепи двигателя на его удельные характеристики.

2. Экспериментально подтверждена предсказанная методом математического моделирования возможность повышения параметров двигателя путём настройки индуктивности разрядной цепи.

3. Разработана и реализована конструкция АИПД малой энергии с высокими удельными параметрами.

#### <u>Теоретическая и практическая значимость работы</u>

1. Разработана физико-математическая модель течения плазмы для АИПД малой энергии (микро-АИПД) удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными.

2. Экспериментально определены параметры разрядного канала и электроцепи, а также режимы работы АИПД малой энергии, при которых возможно устранить факторы, негативно влияющие на работоспособность двигателя в течение длительного времени.

3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что увеличение начальной индуктивности электроцепи АИПД малой энергии может приводить к повышению его эффективности.

#### Методы диссертационного исследования

В диссертации применялись экспериментальный метод И метод моделирования. Экспериментально математического определялись характеристики лабораторных моделей АИПД, и проводился их сравнительный анализ. Полученные экспериментальные данные являлись основой лля построения физико-математической модели процессов, проходящих в АИПД. Физико-математическая модель реализована в виде компьютерной программы в среде аналитических вычислений MAPLE 12.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель течения плазмы для случая АИПД с низким уровнем энергии (менее 20 Дж) и результаты расчётов.

2. Результаты экспериментальных исследований АИПД малой энергии и их сравнение с результатами математического моделирования.

3. Рекомендации по повышению характеристик АИПД с энергией от 3 до 20 Дж.

#### <u>Достоверность полученных результатов</u>

Достоверность полученных результатов, научных положений и сделанных выводов достигается выбором апробированных методик измерений и диагностики, соответствием измеренных характеристик расчётным значениям, а также непротиворечивостью полученных результатов с опубликованными и признанными данными других авторов.

### Апробация результатов

Основные результаты работы обсуждались на семинарах НИИ ПМЭ МАИ, а также докладывались на российских и международных конференциях: 1) IV Научно-практическая конференция "Микротехнологии в авиации и космонавтике" 2006 г., Разработка микро-АИПД для микро-КА); 2) 2<sup>nd</sup> (Москва, Россия, European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS) (Brussels, Belgium, 2007 г., Micro APPT of rail geometry); 3) XXXII Академические чтения по космонавтике (Москва, Россия, 29 января - 1 февраля 2008г., Экспериментальные исследования микро АИПД для микро КА); 4) XXXIII Академические чтения по космонавтике (Москва, Россия, январь 2009г, Микро абляционный импульсный плазменный 5) XIV двигатель для микрокосмического летательного аппарата); Международный конгресс двигателестроителей (п. Рыбачье, Украина, 14-19 сентября 2009 г., Экспериментальные исследования моделей АИПД малой мощности); 6) VII Научно-практическая конференция «Микротехнологии в авиации и космонавтике» (Москва, Россия, 16-17 сентября 2009., Разработка абляционного ИПД малой мощности в НИИ ПМЭ); 7) XXXIV академические чтения по космонавтике (Москва, Россия, 25-29 января 2010 г., Разработка и

экспериментальные исследования абляционного импульсного плазменного двигателя малой мощности); 8) Вторая международная конференция «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках» (Самара, Россия, 27-30 июня 2011., Experimental Studies for Micro-APPT at RIAME, авторы: N.V. Lyubinskaya, G.A. Diakonov, S.A. Semenikhin); 9) 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2013» (Москва, Россия, 12-15 ноября 2013 г., Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных КА); 10) Space Propulsion-2012 (Bordeaux, France 7-10 мая 2012 г, Ablative Pulsed Plasma Thruster for the small Satellite «Soyuz-Sat-O»), 11) N.N Antropov, A.V. Bogatyy, V.N Boykachev, G.A. Dyakonov, N.V. Lyubinskaya, G.A. Popov, S.A. Semenikhin, V.K. Tyutin, V.N. Yakovlev. Development of Russian Next-Generation Ablative Pulsed Plasma Thrusters // 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application / Procedia Engeneering – 2016, 12) 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, Россия, 18-22 ноября 2019 г., Исследование влияния индуктивности разрядной цепи на характеристики абляционного импульсного плазменного двигателя).

#### Личный вклад соискателя

Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями. В процессе выполнения диссертации соискатель самостоятельно выполнил следующие виды научно-исследовательских работ:

- выполнен анализ современного состояния исследований и разработок электроракетных двигателей, пригодных для малоразмерных космических аппаратов;

- разработаны и исследованы лабораторные модели АИПД с энергией менее 20 Дж различными параметрами разрядной с цепи, проведены спектроскопические И интерферометрические исследования плазмы И магнитозондовые измерения.

- доработана физико-математическая модель процесса ускорения плазмы в АИПД, учитывающая характерную для микро-АИПД периодическую осциллограмму разрядного тока, что приводит к волнообразной генерации плазмы;

- проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами эксперимента;

- доработан экспериментальный образец двигателя АИПД-120 с целью повышения его характеристик.

#### Объём и структура работы

Работа представляет собой рукопись объёмом 164 страницы печатного текста, включая 90 рисунков, 23 таблицы, а также 78 библиографических ссылок. Она включает в себя введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список литературы.

Глава 1 Современное состояние исследований и разработок двигателей, пригодных для малоразмерных КА

## 1.1 Особенности малоразмерных КА и характеристики двигательных установок, необходимых для управления их движением

Согласно принятой классификации МКА делятся на микро – с массой 10...100 кг, нано – с массой от 1 до 10 кг и пико – с массой менее килограмма [1]. Аппараты с массой менее 1 кг, для управления которыми требуются сверхминиатюрные двигатели, в данной работе не рассматриваются.

Тенденция всё более широкого использования МКА объясняется целым рядом следующих факторов:

- сокращение сроков создания космических аппаратов, возможность более простого их серийного производства;

 многократное снижение стоимости КА, в силу чего становится возможным их коммерческое использование и самостоятельное участие в космической деятельности малых государств и даже отдельных фирм;

- существенное снижение затрат на выведение КА за счет использования технологий попутного выведения;

- значительно меньшие финансовые потери в случае отказа МКА;

- функциональные возможности, недоступные даже для крупногабаритных одиночных КА, при использовании орбитальных группировок МКА.

Коммерциализация космической деятельности и образование мирового космического рынка существенно способствуют созданию космических систем на основе МКА, обладающих коммерчески значимыми достоинствами и возможностями, такими как:

 использование мобильных стартовых комплексов для запуска МКА на орбиту;

• высокая оперативность развертывания группировок МКА за счет широкой номенклатуры средств выведения (от авиационно-космических средств

до средних и даже тяжелых ракет-носителей с использованием технологии попутных пусков);

 высокая готовность к модернизации проекта в целом или его составляющих под специфические задачи или при изменении объективных обстоятельств;

• относительно быстрое внедрение в проекты передовых технологий;

• оптимизация орбитальных параметров МКА под конкретную задачу;

• относительная простота и легкость для повторения, развития или продолжения проекта в будущем;

• использование наземной портативной и относительно дешевой терминальной (управленческой и пользовательской) аппаратуры.

Перечисленные преимущества космических систем с использованием МКА позволяют создавать высокотехнологичные, относительно дешевые, быстрореализуемые и легко модернизируемые проекты космических систем, максимально учитывающие требования потенциальных потребителей (заказчиков).

Анализ перспектив развития космических систем различного назначения на основе МКА показывает, что при современной конъюнктуре они пользуются повышенным вниманием космических агентств, ученых и специалистов, а также спросом среди инвесторов мирового космического рынка. В соответствии с этим космическая промышленность формирует рыночные предложения в виде большого количества разнообразных проектов [1].

Использование космических систем на основе малоразмерных КА является новым, перспективным, объективно необходимым направлением развития космической техники [2]. Создание МКА и космических систем на их основе возможно только с использованием новейших технологий по всему спектру проектной, производственной, эксплуатационной деятельности, связанной с космическими системами. При этом средства выведения фактически будут выводить относительно близкую массу, что и ранее, но это будет масса не отдельного КА, а орбитальной группировки и эта масса будет распределена по орбитам.

Космические системы на основе малых и сверхмалых КА будут, как правило, низкоорбитальными, где присутствует фактор торможения аппарата в остаточной атмосфере. Большинство МКА используется на орбитах до 700 км [3]. Это приводит к необходимости регулярной коррекции орбиты КА в течение срока его активного существования.

Серьезную проблему также представляет увод отработавших МКА с рабочих орбит. С учетом того, что МКА, во многих случаях, будут использоваться в группировках, а концепция построения космических систем подразумевает относительно невысокие надежность и стоимость отдельного аппарата, а также удельную стоимость вывода его на орбиту и, следовательно, более высокую интенсивность замены аппаратов орбитальной группировки, данная проблема увода МКА с рабочих орбит становится особенно актуальной.

Условия функционирования большинства подобных аппаратов требуют регулярной коррекции их орбит, что делает необходимым использование малогабаритных двигательных установок, способных эффективно работать в условиях ограниченного потребления электроэнергии. Растущие требования к точности поддержания орбитальных параметров МКА, а также к их ресурсу диктуют необходимость размещения на таких аппаратах корректирующих двигательных установок (КДУ), использующих электроракетные двигатели (ЭРД). Ограниченность массы МКА и мощности их бортовых энергоустановок, а также ограничения накладываемые на стоимость их создания и эксплуатации требуют разработки малогабаритных, легких и дешевых КДУ, обладающих высокой эффективностью в области потребляемой мощности до ~20 Вт.

Одной из основных задач электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) малой мощности является поддержание низкой круговой околоземной орбиты малого космического аппарата. Подобные задачи удобны для анализа и, применительно к АИПД, решались в ряде работ, например в [4]. Сила аэродинамического сопротивления F<sub>a</sub>, действующая на космический аппарат, движущийся по орбите со скоростью V, равна

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho V^2 \cdot S_m,$$

где ρ– плотность атмосферы, в первом приближении, если не учитывать ее флуктуации от солнечного излучения, зависящая только от высоты орбиты h над уровнем Земли и регламентируемая ГОСТ 4401-81 на Международную стандартную атмосферу [5];

С<sub>d</sub> – коэффициент аэродинамического сопротивления (для свободно молекулярного течения газа, имеющего место при плотностях, соответствующих верхним слоям атмосферы (h> 200 км), С<sub>d</sub>≈ 2,3);

S<sub>m</sub> – площадь миделевого сечения космического аппарата.

Скорость космического аппарата, в простейшем случае круговой орбиты высотой h, определяется формулой

$$\mathbf{V}^2 = \mathbf{G} \cdot \mathbf{M} / (\mathbf{R}_3 + \mathbf{h}),$$

где G- гравитационная постоянная; М- масса Земли; R<sub>3</sub> - средний радиус Земли.

Характеристическая скорость V<sub>x</sub>, необходимая для поддержания условной круговой орбиты высотой h в течение времени T, равна:

$$V_x = F_a \cdot T/m$$
,

где т- масса космического аппарата.

На рисунке 1 представлены расчетные зависимости характеристической скорости  $V_x$ , необходимой для поддержания круговой орбиты условных малоразмерных спутников различной массы от высоты орбиты h в течение одного года (T $\approx$ 3,16·10<sup>7</sup> c). В расчете принят коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_d = 2,3$ .



Рисунок 1 – Расчетные зависимости характеристической скорости $V_x$ , необходимой для поддержания круговой орбиты условного МКА (m = 20 кг,  $S_m$ = 0,09 м<sup>2</sup> и m = 50 кг,  $S_m$ = 0,25 м<sup>2</sup>) от высоты орбиты h, в течение одного года

Характеристическая скорость связана с параметрами двигательной установки формулой Циолковского:

$$V_{\rm x} = J_{\rm sp} \cdot \ln[m/(m-m_{\rm pt})],$$

где J<sub>sp</sub> – удельный импульс тяги (среднемассовая скорость истечения) двигательной установки; m – полная масса МКА (с запасом рабочего тела); m<sub>pr</sub> – запас рабочего тела ЭРДУ.

Учитывая, что суммарный импульс тяги ЭРДУ Р $_{\Sigma}$  определяется соотношением

$$\mathbf{P}_{\Sigma} = \mathbf{J}_{\mathrm{sp}} \cdot \mathbf{m}_{\mathrm{pt}},$$

формулу Циолковского удобно представить в виде, наглядно показывающем возможности и, соответственно, область применения той или иной двигательной установки:

$$\mathbf{V}_{\mathrm{x}} = \mathbf{J}_{\mathrm{sp}} \cdot \ln[\mathbf{m}/(\mathbf{m} - \mathbf{P}_{\Sigma}/\mathbf{J}_{\mathrm{sp}})].$$

Для электроракетных двигательных установок, как правило, m<sub>рт</sub> << m, поэтому без ущерба для точности последнюю формулу можно заменить более простым соотношением, воспользовавшись разложением формулы Циолковского в ряд Тейлора:

$$V_x = J_{sp} \cdot m_{pT}/m$$
или  $V_x = P_{\Sigma}/m$ .

На рисунке 2 показаны расчетные зависимости суммарного импульса тяги от времени поддержания низкой круговой орбиты условного МКА массой 20 кг с АИПД для разных высот. Аналогичные расчётные зависимости для МКА массой 50 кг приведены на рисунке 3.



Рисунок 2 – Расчетные зависимости суммарного импульса тяги ЭРДУ от времени поддержания низкой круговой орбиты условного МКА (m = 20 кг) для различной высоты орбиты h



 $P_{\Sigma}, H \cdot c$ 

Рисунок 3 – Расчетные зависимости суммарного импульса тяги ЭРДУ от времени поддержания низкой круговой орбиты условного МКА (m = 50 кг) для различной высоты орбиты h

Из графиков, представленных на рисунках 2 и 3, видно, что необходимый суммарный импульс для поддержания орбиты МКА колеблется в диапазоне от сотен до десятков тысяч Н·с. В то же время габариты двухканального микро-АИПД с энергией до 20 Дж позволяют иметь запас рабочего тела для обеспечения суммарного импульса тяги порядка 3500 H·c. Исходя из этого, можно определить преимущественную область применения ЭРДУ на базе микро АИПД – поддержание малоразмерных космических аппаратов со сроком активного существования от 1 года до 10 лет на низких орбитах высотой от 400 до 600 км (700 км).

#### 1.2 Анализ современного состояния развития микродвигателей

Начало интенсивных разработок двигательных установок малой и сверхмалой тяги приходится на 50-е годы 20-го века сначала в России и США, а затем в Западной Европе, Японии. В первую очередь это было обусловлено необходимостью повышения точности поддержания пространственных параметров космических летательных аппаратов (КЛА) и увеличения срока их активного существования (САС).

Характерными чертами подобных двигательных установок КЛА являютя микроуровень тяговых усилий (10<sup>-3</sup>.. 10 Н), большой ресурс по суммарному времени огневой наработки (порядка 10<sup>4</sup> час) и по числу включений (10<sup>5</sup>.. 10<sup>7</sup>). Первоначально это были системы, работающие на сжатых холодных и горячих газах. Принцип действия двигателей на холодном газе основывается на испускании газа без химической реакции. Такие двигатели называются газореактивными (ГРД) и состоят из клапана и сопла. Используемое топливо хранится в баке под давлением от 1 до 200 атм. В качестве примера, технические характеристики ГРД И эксплуатационные малой тяги разработки НИИМаш (г. Нижняя Салда Свердловской области) приведены в таблице1, а их фотографии – на рисунке 4 [6].

Таблица 1 – Технические и эксплуатационные характеристики газовых ракетных двигателей малой тяги

Характеристики, размерность	Газовые ракетные двигатели малой тяги		
Рабочее тело	азот / гелий		
Тяга, Н	0,8		
Удельный импульс тяги в непрерывном режиме, м/с	700		
Время работы, с	104		
Масса, кг	0,1		
Время набора тяги (до 0,9 от номинального значения), с	0,01		

Продолжение таблицы 1

Характеристики, размерность	Газовые ракетные двигатели малой тяги	
Время спада тяги (до 0,1 от номинального значения), с	0,008	
Энергопотребление, Вт	2,7	
Частота работы в импульсном режиме, Гц	≥25	
Количество запусков	$8 \cdot 10^4$	



Рисунок 4 – Газовый ракетный двигатель малой тяги РДМТ-0.8

Преимуществом данных двигателей является миниатюрность и простота конструкции. К недостаткам следует отнести малый удельный импульс тяги, создаваемый этими двигателями, который, как правило, колеблется от 300 до 1000 м/с.

Дальнейшее совершенствование двигательных установок малых и микротяг осуществлялось в направлении улучшения их энергетических и массовых характеристик, что привело к созданию монотопливных каталитических двигателей малых тяг. Однако в связи с нестабильностью перекиси водорода при хранении и недостаточном удельном импульсе (~ 1600 м/с), эти двигатели не нашли широкого применения были И заменены на гидразиновые однокомпонентные термокаталитические двигатели [7, 8, 9].

В однокомпонентных каталитических жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) в качестве топлива используется жидкость, которая при взаимодействии с катализатором разлагается с образованием горячего газа. Например, гидразин,

который разлагается на аммиак и азот, или концентрированная перекись водорода, при разложении образующая перегретый водяной пар и кислород. Топливо через клапан подаётся в камеру сгорания, в которой катализатор В однокомпонентных каталитических ЖРД вызывает его разложение. используется вытеснительная система подачи топлива. В системе охлаждения они чаще всего не нуждаются. Для своей работы однокомпонентные каталитические ЖРД требуют предварительного нагрева катализатора подведением малой электрической мощности. Двигатели этого типа допускают стационарную работу и работу импульсами различной длительности, за счет чего среднее значение тяги может варьироваться. Удельный импульс тяги этих двигателей пропорционален

величине  $\sqrt{\frac{T_e}{M}}$ , поэтому в качестве рабочего тела выгодно использовать газ с низкой молекулярной массой M при возможно более высокой температуре  $T_e$ . Но при анализе эффективности ДУ в целом, кроме массы рабочего тела, следует учитывать также массу шаробаллона, которая обратно пропорциональна молекулярной массе газа. Кроме того, могут быть существенными в данных двигателях потери в эффективности вследствие миниатюризации.

Основные технические и эксплуатационные характеристики однокомпонентных каталитических ЖРД малой тяги разработки ФГУП «КБ Химмаш» им. А.М. Исаева (КБХМ, г. Королев Московской области) и ОКБ «Факел» (г. Калининград), а также подобного двигателя разрабатываемого в Китае приведены в таблице 2 [10, 11, 12]. Внешний вид двигателя разработки ОКБ «Факел» представлен на рисунке 5.

Таблица 2 Технические и эксплуатационные характеристики однокомпонентных ЖРД малой тяги

Характеристики, размерность	Однокомпонентные ЖРД малой тяги			
	Россия (К10)	Россия (К50-10.1)	Китай	
Рабочее тело	гидразин	гидразин	N <sub>2</sub> O	
Тяга, Н	0,1	0,53 ÷ 0,096	0,3-1,4	
Удельный импульс тяги, м/с				
• в непрерывном режиме	$(2 \div 2, 2) \cdot 10^3$	$(2,06 \div 2,16) \cdot 10^3$	$(1,5 \div 1,7) \ 10^3$	

Продолжение таблицы 2

Характеристики, размерность	Однокомпонентные ЖРД малой тяги			
	Россия (К10)	Китай		
• в импульсном режиме	$(1,76 \div 2) \cdot 10^3$	$(1,76 \div 2) \cdot 10^3$	-	
Энергопотребление, Вт				
• в режиме подготовки	3,3 ÷ 3,9	3,3 ÷ 4,5		
• форсированная подготовка	$24 \div 29,4$	27 ÷ 37	<35	
Давление топлива на входе, кПа	172	853÷206	Не изв.	
Ресурс по количеству включений	$\sim 7 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$	Не изв.	
Масса, кг	не изв.	0,46	_	



Рисунок 5 – Однокомпонентный каталитический ЖРД малой тяги К50-10.1

Преимуществом этих двигателей является простота конструкции. К недостаткам же можно отнести небольшой удельный импульс тяги (в диапазоне от 1500 до 2550 м/с), который хоть и имеет большие значения, чем у двигателей на холодном газе, но всё-таки недостаточен по величине для решения целого круга задач требующих большого суммарного импульса тяги.

Существенно большим удельным и суммарным импульсом тяги, по сравнению с предыдущими типами двигателей, обладают электроракетные двигатели, такие как стационарные плазменные двигатели (СПД), ионные (ИД) и коллоидные (КД), а также абляционные импульсные плазменные двигатели [13, 14, 15, 16, 17]. Вместе с тем, вследствие значительного по сравнению с химическими двигателями энергопотребления, требующегося для создания

тяги, возможности практического использования ЭРД ограничены существующими возможностями бортовой энергетики КЛА.

Принцип работы СПД основан на ускорении ионной составляющей плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях (в канале создаётся квазирадиальное магнитное поле, а между анодом и катодом – продольное электрическое Е-поле). Вместе с ионами из плазменного двигателя уходит равный им по величине заряда поток электронов из катода-компенсатора. Технические характеристики маломощных СПД (разработки ОКБ «Факел») приведены в таблице 3 [18].

Таблица 3 – Технические и эксплуатационные характеристики маломощных СПД

Характеристики, размерность	СПД-25	СПД-30
Тяга, мН	5	7
Удельный импульс тяги, м/с	8700	12500
Мощность, Вт	100	150
Ресурс, час	600	600
Суммарный импульс тяги, Н с	10 <sup>4</sup>	$1,5.10^{4}$
КПД	0,25	0,3
Масса, кг	0,3	0,4
Состояние	Лаб.	Лаб.
	модель	модель

Успешная работа этих двигателей на аппаратах больших и средних масс привлекает внимание разработчиков к варианту их использования и на МКА. Однако, уменьшение размеров СПД приводит к снижению его характеристик. Так уменьшение размеров канала обусловливает необходимость увеличения внешнего магнитного поля, как следствие растут потери на его создание. Кроме того увеличение соотношения объема канала к его поверхности приводит к росту потерь плазмы на стенках, а снижение мощности двигателя увеличивает стоимость ионного пучка. Также следует добавить, что необходимость в нейтрализации ионного пучка приводит к сложности системы и трудности миниатюризации. Принцип работы ионного двигателя заключается в ионизации газа и разгоне ионов электростатическим полем. Нейтральные частицы ионизируются в разрядной камере, затем ионы ускоряются под действием разности потенциалов. На выходе из двигателя пучок ионов нейтрализуется выходящими из нейтрализатора электронами. При этом благодаря высокому отношению заряда к массе, становится возможным разогнать ионы до очень высоких скоростей, что позволяет значительно уменьшить расход реактивной массы ионизированного газа по сравнению с расходом реактивной массы в химических ракетах, но требует больших затрат энергии. В таблице 4. приведены технические характеристики ионных двигателей разработанных в Германии (RIT) и России (ВЧИД) [19, 20, 21].

Параметры	RIT-1	RIT-2	RIT-3	RIT-4	ВЧИД-8	RIT-10
						(летный
						образец)
Диаметр разрядной камеры	1	2	3	4	8	10 (9)
(≈ионного пучка), см						
Мощность, Вт	4,4	14	36	82	300	720
Тяга, мН	0,1	0,35	1	2,5	8,8	15
Удельный импульс тяги, м/с	18600	25700	29700	31900	37150	33000
Энергия ионов, эВ	1000-	1000-	1000-	1000-	2000	1000-
_	1500	1500	1500	1500		1500
Ресурс, час	-	-	-	-	_	20000
Масса ДУ, кг	-	-	-	-	-	15

Таблица 4 – Размерный ряд ионных двигателей семейства RIT (ВЧИД)

Однако, как и в случае СПД, данные двигатели обладают высокой технологической и конструкционной сложностью и связанной с этим достаточно высокой стоимостью.

Коллоидные двигатели имеют аналогичный ионному двигателю механизм ускорения рабочего тела [22]. Принцип действия коллоидных двигателей основан на электростатическом ускорении маленьких капель, которые образуются на выходе из тонкой (капиллярной) трубки, путём подачи проводящей жидкости через неё и приложения большой разности потенциалов между трубкой и ускоряющим электродом (рисунок 6). В качестве топлива обычно используется глицерин.



Рисунок 6 – Принципиальная схема коллоидных двигателей

Технические характеристики коллоидных двигателей, которые в перспективе могли бы быть применены на малоразмерных космических аппаратах, приведены в таблице5 [23].

Коллоидный Коллоидный Параметры двигатель, Россия двигатель, Россия (лаб. образец) (лаб. образец) 15000-20000 Скорость истечения рабочего 5000-15000 тела, м/с (предполагаемая) 10-100 Мощность, Вт 1-10 1000-3000 5000-10000 Ресурс, ч Тяговая эффективность 0,33-0,5 0.67 Энергетическая цена тяги, 4,2-12,5 Вт/мН Масса ДУ, кг --

Таблица 5 – Характеристики коллоидных двигателей

Коллоидные двигатели имеют достаточно высокий удельный импульс тяги (500-1500 с) и высокое значение тяги, отнесенной к единице мощности (200 мкH/Вт), используют доступное и дешевое рабочее тело. По сравнению с ионными двигателями у коллоидных можно достичь меньших значений цены тяги. В последнее время за рубежом ведутся разработки по технологии MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems / Микроэлектромеханические системы) коллоидных двигателей малой тяги. В данной работе они не рассматриваются, так как в перспективе предполагается их применение только на спутниках нано и пико масштаба или на спутниках специального научного назначения, требующих точного управления положением.

Среди всех типов ЭРД, рассматривающихся для решения задачи управления движением микро КА, одним из перспективных является импульсный плазменный двигатель (ИПД).

Основными элементами любого импульсного плазменного двигателя являются накопитель электрической энергии, блок коммутации или система инициирования разряда, система хранения и подачи рабочего вещества и электроды. Принципиальная схема импульсного плазменного двигателя представлена на рисунке 7.



свеча-игнайтер инициирования разряда; 2 – шашки рабочего тела; 3 – электроды; 4 – конденсаторный накопитель энергии; 5 – блок инициирования разряда; 6 – система питания и управления (СПУ).

Рисунок 7 – Принципиальная схема импульсного плазменного двигателя

В рассматриваемой схеме разрядный канал в АИПД состоит из двух электродов и расположенных между ними,как правило, фторопластовых блоков (шашек) (рисунок 8). Канал, образованный стенками шашек рабочего тела и электродами, может иметь как цилиндрическую или коническую, так и форму параллелепипеда, в случае плоских электродов, расположенных параллельно друг к другу. Импульсный плазменный поток (плазменный сгусток) формируется в канале АИПД после инициирования электрического разряда при высоковольтном пробое межэлектродного промежутка и в процессе движения разряда по направлению к выходному сечению двигателя. Абляция фторопласта происходит вследствие его нагрева под действием излучения плазмы и непосредственного контакта с плазменным потоком.

Принцип действия импульсного плазменного двигателя основан на электромагнитными и газодинамическими ускорении силами плазменного сгустка, образующегося в результате частичной ионизации рабочего вещества в электрическом разряде. От формы канала зависит режим работы двигателя, то есть либо основанный преимущественно на тепловом ускорении плазмы, либо на электромагнитном. Электромагнитная сила  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  возникает в разрядном канале при взаимодействии протекающего в плазме разрядного тока плотностью J с собственным магнитным полем В (рисунок 8). Осевое газовое давление плазмы на стенку в начале канала, в соответствии с рассматриваемым рисунком, создает газодинамическую компоненту тяги. При этом разрядный ток подается импульсами, а процесс образования и ускорения плазмы носит дискретный характер.



Рисунок 8– Принципиальная схема разрядного канала импульсного плазменного двигателя [23, 24]

Импульсные плазменные двигатели обладают рядом важных преимуществ, к ним относятся: постоянная готовность к работе, предельно малая инерционность и практически полное отсутствие импульса последействия, возможность точной дозировки импульса, достаточно высокий ресурс, а также линейный ход тяговой регулировочной характеристики.

Первый в мире электрический ракетный двигатель импульсного действия был разработан и исследован В.П. Глушко в Газодинамической лаборатории в 1929-1931гг. [25]. В 1957 году Л.А. Арцимовичем с сотрудниками был впервые исследован электродинамический импульсный ускоритель плазмы, образованной взрывом проволочки. Одновременно Бостиком был предложен импульсный ускоритель эрозионной плазмы [26].

Эрозионные ИПД особенно привлекательны к использованию на малоразмерных спутниках [27, 28, 29], поскольку в них отсутствует газовый клапан и сравнительно просто обеспечивается подача рабочего вещества в разрядную камеру. Кроме того ИПД позволяют работать при малой потребляемой мощности, так как мощность в момент разряда чрезвычайно высока.

14 декабря 1964 г. на автоматической межпланетной станции "Зонд-2" в качестве исполнительных органов систем ориентации впервые были применены абляционные электрические ракетные двигатели, a именно импульсные плазменные двигатели с электротермическим ускорением плазмы, созданные в ИАЭ им. И.В.Курчатова [25] (главные исполнители:И.В. Курчатов, С.П. Королев, Л.А. Арцимович, А.П. Александров, Б.В. Раушенбах, Б.Е. Черток, А.М. Андрианов и другие участники). В 1968 г. на борту американского спутника LES-6 успешно работал созданный в США АИПД с электродинамическим ускорением плазмы [30]. В обоих случаях в качестве плазмообразующего вещества использовался фторопласт-4 (тефлон). Успешные летные испытания первых АИПД способствовали дальнейшему развитию работ в этой области. Были проведены исследования и получены результаты, свидетельствовавшие о целесообразности практического применения двигательных установок данного типа. Значительно повысилась активность исследований импульсных ЭРД в Европе и США. Однако до начала 90-х годов применение АИПД в космосе сдерживалось ограниченным кругом задач, для решения которых они могут быть использованы.

Второй этап развития АИПД начинается с 90-х годов и связан с появлением нового направления космической техники – малых космических аппаратов [31].

В таблице 6 представлена история применения АИПД в составе КА и их основные характеристики [32, 33, 34]. На рисунке 9 показан внешний вид космических аппаратов, на которых были установлены АИПД. На МКА ФКИ ПН-2, предназначенном для изучения высотных электрических разрядов и атмосферных явления, был установлен двигатель АИПД-45-2, разработанный и изготовленный в НИИ ПМЭ МАИ [35, 36, 37, 38].

Зависимость суммарного импульса тяги от энергии в АИПД представлена на рисунке 10 [39].

Год	Название КА	Удельный импульс, с	Энергия разряда, Дж	Страна, миссия		
1964	Зонд-2	410	50	СССР		
1968	LES6	312	1,85	CIIIA		
1974	SMS	505	8,4	CIIIA		
1970-ые	LES 8/9	1000	20	CIIIA		
1981	TIP/NOVA	543	20	CIIIA		
2001	Компас	836	18	АИПД на базе LES 8/9 (США)		
2002	EO-1	1040	56	CIIIA		
2007	FalconSat-3	827	-	CIIIA		
2012	PROITERES	600	31,6	Япония		
2012	STRaND-1	1340	6	Англия		
2013	CUSat	-	-	CIIIA		
2014	МКА ФКИ ПН2	1100	55	Россия		
2016	AOBA- VELOX 3	-	-	Япония		

Таблица 6 – История применения АИПД в составе КА





Рисунок 9 – Космические аппараты с 1964 по 2014 года, на борту которых были размещены АИПД



Рисунок 10 – Зависимость суммарного импульса тяги от энергии АИПД

На протяжении всего периода развития АИПД во всём мире были исследованы различные конфигурации разрядного канала, принципиальные схемы, был осуществлён подбор конденсаторов, рассмотрены варианты использования различных рабочих тел. Рассмотрим те варианты АИПД, которые могли бы претендовать на малоразмерный двигатель коррекции и поддержания орбиты МКА.

В работе [40] описывается конструкция и результаты исследования разработанного в СССР коаксиального АИПД с электротермическим ускорением рабочего тела. Схема двигателя изображена на рисунке 11. Запасенная электрическая энергия этого АИПД составляла около 30 Дж. В качестве рабочих тел использовались фторопласт-4 или поперечно сшитый полиуретан с каломелью. Двигатель прошел наземные испытания, а также был испытан в космических условиях на вертикально стартующих ракетах-зондах. В

лабораторных условиях средняя тяга на фторопласте-4 при частоте 2,7 Гц составила 3,7·10<sup>-3</sup> H, средняя эффективная скорость истечения около 3 км/с.



1-катод, 2 – анод, 3 – рабочее вещество, 4 – конденсатор.

Рисунок 11 – Схема коаксиального АИПД с преимущественно электротермическим ускорением рабочего тела [40].

Коаксиальные микро АИПД разрабатывались также в Air Force Research Laboratory (США) в 2000-х годах [41]. На рисунке 12 показана принципиальная схема такого двигателя. Рабочее вещество (тефлон) располагается между двумя электродами (центральным катодом и внешним анодом). Пробой разрядного промежутка осуществлялся высоким напряжением на накопительном конденсаторе (~ 40 кВ).



Рисунок 12 – Принципиальная схема микро АИПД, разрабатывавщегося в Air Force Research Laboratory (США) в 2000-х годах [41]

Основная проблема, с которой столкнулись исследователи с данной моделью – это поддержание длительной работы двигателя, чему препятствует науглероживание поверхности шашки. Эксперименты показали, что недостаточная энергия разряда приводит к накоплению слоя углерода на рабочей поверхности. Этот слой в конечном итоге вызывает отказ двигателя путём замыкания электродов.

Анализ показал, что карбонизацию поверхности вызывают нейтралы, осаждающиеся на тефлоне вследствии снижения температуры поверхностного слоя шашек рабочего вещества. Предполагаемая причина возникновения нейтралов – это запаздывающее испарение рабочего вещества по отношению к процессу прохождения основного тока разряда, то есть несогласованность во времени ввода энергии и массы в канал. Следует отметить, что проблема науглероживания шашек рабочего тела присуща всем АИПД, работающим на фторопласте.

Для её решения в Air Force Research Laboratory была предложена трёхэлектродная схема коаксиального АИПД, представленная на рисунке 13 [41].



Рисунок 13 – Принципиальная схема трехэлектродного коаксиального АИПД

Она обладает следующими основными преимуществами. Во-первых, энергия основного разряда теперь имеет минимальную степень разброса от импульса к импульсу, что понижает вероятность наугероживания рабочей величина Собственно стабилизируется поверхности топлива. единичного импульса тяги, что важно, если предполагается использование микро АИПД в миссиях, требующих работу с одним импульсом (в режиме единичных импульсов). Во-вторых, ионизация от разряда триггера значительно снижает напряжение, требующееся для пробоя основного разряда. Например, для типичной исследовавшейся двух электродной конструкции, требовалось до 40 кВ для надёжного запуска. В трехэлектродной конструкции это напряжение обычно κВ. 3 Подобное не превышало значительное уменьшение напряжения существенно снижает требования к конструкции электроизоляции АИПД.

На рисунке 14 приведены результаты измерения величины расхода рабочего тела трехэлектродного АИПД с энергией 2,25 Дж в зависимости от длительности работы [41]. Причем, вследствие сложности отделения тефлона от конструкции модели, измерения расхода производилось путём взвешивания всего разрядного канала, то есть учитывался и расход электродов.



Рисунок14 – Зависимость расхода рабочего тела трехэлектродного АИПД с энергией 2,25 Дж в зависимости от длительности работы

Также, с помощью интерферометра, на АИПД энергией 6,6 Дж было исследовано распределение концентрации электронов по времени, которое, наряду с данными моделирования представлено на рисунке 15 [41]. Видно, что экспериментальные и расчетные результаты хорошо согласуются и качественно и количественно.





К недостаткам коаксиальных микро-АИПД следует отнести сложность их использования в миссиях, которые требуют достаточно больших суммарных импульсов тяги, поскольку для этого необходимо создание эффективной системы подачи рабочего тела. До сегодняшнего дня эта проблема для микро-АИПД коаксиального типа не решена. Также данная проблема имеет место в двигателях рельсового типа с торцевой подачей рабочего тела, примером которого является АИПД, установленный на КА ЕО-1. Его внешний вид изображен на рисунке 16, а рабочие параметры приведены в таблице 7.


Рисунок 16– Внешний вид АИПД, установленного на космическом аппарате EO-1 [42]

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	АИПД (ЕО-1)
Энергия разряда, Дж	56
Частота импульсов, Гц	1
Потребляемая мощность, Вт	60
Ресурс по числу импульсов	$5,3 \cdot 10^5$
Тяговая эффективность, %	8,0
Удельный импульс тяги, с (км/с)	1040 (10,2)
Единичный импульс тяги, мH·с	0,86
Средняя тяга, мН	0,86
Суммарный импульс, кН с	0,46
Масса ЭРДУ с рабочим телом, кг	4,95

Таблица 7 – Характеристики АИПД (ЕО-1)

В то же время, данная задача имеет достаточно простое решение при использовании микро-АИПД рельсовой геометрии с боковой подачей шашек. Примером является ДУ разработки ЦНИИмаш [17, 40]. Она представляет собой два ускорителя рельсового типа и способна создавать импульс тяги в двух противоположных направлениях (рисунок 17).



Рисунок 17 – Внешний вид АИПД с боковой подачей рабочего тела [17, 40]

В качестве рабочего накопителя энергии использовался высокочастотный импульсный конденсатор с малым эквивалентным сопротивлением. Рабочее вещество, расположенное на рельсовых дугах, частей остояло ИЗ четырех кольца прямоугольного сечения. Для инициирования разряда использовались плёночные фторопластовые свечи поверхностного пробоя.

Для лётных испытаний данной ДУ в качестве источника энергии использовалась солнечная батарея, состоящая из двух модулей «Фотовольт 1000», соединённых последовательно и обеспечивающих номинальное рабочее напряжение около 2 кВ при зарядном токе 1,4 мА. Также использовались отражатели из алюминиевого сплава для увеличения потока энергии. Была произведена непосредственная стыковка высоковольтной солнечной батареи с АИПД.

В ходе лётных испытаний с помощью телеметрической системы контролировались следующие параметры ДУ: напряжение накопительного конденсатора, работа системы инициирования, разрядный ток в ускорительном канале и фиксировалось излучение истекающей плазмы. Всё это позволило получить достаточный объем информации о функционировании блоков. Основные характеристики ДУ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнение характеристик АИПД с боковой подачей рабочего тела и коаксиального µ-РРТ

	АИПД	μ-ΡΡΤ	
Название характеристики, размерность	с боковой	(лабораторная	
	подачей р.т.	модель)	
Ёмкость конденсаторной батареи, мкФ	4	-	
Номинальное рабочее напряжение, кВ	2	-	
Энергия разряда, Дж	8	1	
Удельная масса конденсатора, г/Дж	100	-	
Масса ЭРДУ с рабочим телом, кг	-	0,5	
Средняя тяга, Н	$3 \cdot 10^{-4}$	3.10-4	
Единичный импульс тяги, мH·с	-	0,002	
Частота, Гц	1/6	1	
Средняя потребляемая мощность, Вт	1,4	20	
Удельный импульс, м/с	$\approx 5500$	-	
Подтверждённый ресурс, кол-во разрядов	$3 \cdot 10^{5}$	-	

Наиболее близким зарубежным аналогом по характеристикам является: коаксиальный µ-PPT [43, 44], параметры которого также представлены в таблице 8. Однако, как уже говорилось ранее, он не может претендовать на двигатель коррекции МКА в связи невозможностью обеспечить необходимый для этого суммарный импульс тяги.

## 1.3 Выбор принципиальной схемы АИПД и основных параметров для решения задач управления движением МКА

Таким образом, для решения задач управления МКА существует необходимость в разработке высокоэффективного малогабаритного двигателя

коррекции и поддержания орбит. Для этого необходимо выбрать схему АИПД способную обеспечить достаточный суммарный импульс тяги, высокий удельный импульс тяги, а также определить диапазон энергии данного двигателя.

Схемы исполнения разрядного канала АИПД различаются механизмом ускорения плазменного сгустка, а также возможностями запасать предельно допустимое количество рабочего тела для обеспечения необходимого суммарного импульса тяги. Как упоминалось ранее, в ИПД имеют место две составляющие тяги: электромагнитная и газодинамическая. Разрядный канал с преимущественно электротермическим ускорением рабочего тела имеет некоторый закрытый объем, В который со стенок этого канала испаряется фторопласт, при такой конфигурации плотность плазмы и расход обычно на порядок выше, чем в разрядных каналах, не имеющих такого закрытого объема. На рисунке 18 (a) ИПД представлен коаксиальный разрядный канал с преимущественно электротермическим ускорением. Этот вариант канала затрудняет возможность иметь достаточно большой запас рабочего тела. На рисунке 18 (б) коаксиальный канал раскрыт, что способствует быстрому разлету испарившегося вещества из объема канала, а, следовательно, и более низкой плотности плазмы. В таком канале реализуется преимущественно электромагнитное ускорение рабочего тела.



Рисунок 18 – Коаксиальный разрядный канал ИПД с а) преимущественно электротермическим ускорением и б) преимущественно электромагнитным ускорением

В разрядных каналах с плоскими электродами (рисунок 19) также присутствуют две составляющие тяги. Рельсотрон с торцевой подачей (рисунок 19 а) имеет наиболее открытый канал из всех представленных схем и, как следствие, низкую плотность плазмы, а также наиболее выгодно расположенные векторы плотности тока и магнитной индукции, поэтому такому каналу свойственно иметь более высокий удельный импульс тяги, но при этом слишком низкую тягу. Рельсотрон с боковой подачей (рисунок 19 б) сохраняет высокие значения электромагнитной составляющей ускорения рабочего тела, при этом тяга у такого двигателя обычно несколько выше, чем у рельсотрона с торцевой подачей.



Рисунок 19 – Разрядный канал с а) торцевой подачей рабочего тела и б) боковой подачей рабочего тела

Как уже говорилось, интересующие нас малоразмерные космические аппараты не превышают по своей массе десятков килограмм. В этом случае важной характеристикой двигателя является его масса, наибольший вклад в которую вносит конденсаторная батарея, определяющая энергию АИПД. Также надо учитывать, что масса блока СПУ пропорциональна его потребляемой мощности [45].

Воспользовавшись двумя эмпирическими формулами из работы [45] можно показать взаимосвязь полной массы ЭРДУ и энергии разряда

приразличных суммарных импульсах тяги. Так зависимость J<sub>уд</sub>(W) для летных образцов АИПД и их прототипов вполне удовлетворительно интерполируется эмпирической формулой:

 $J_{y_{\pi}}[M/c] = 3000 \cdot \sqrt[3]{W[Дж]}$ 

Полную массу ЭРДУ можно представить в виде:

 $M_{\text{ЭРДУ}} \approx M_{\text{констр}} + 2 \cdot W/\omega_{\text{C}} + 2 \cdot P_{\Sigma}/J_{\text{уд}}$ 

где М<sub>констр</sub>≈ 0,25·М<sub>ЭРДУ</sub>, (здесь в М<sub>констр</sub> входят СПУ, БИР и другие элементы) [39].

На рисунке 20 представлены результаты оценочных расчетов полной массы ЭРДУ в зависимости от энергии разряда при заданных суммарном импульсе тяги $P_{\Sigma} = 1$  кH·c; 3,5 кH·c и удельной энергоемкости конденсаторов  $\omega_{C}=28$  Дж/кг, по методике описанной в [45]. Для примера приведены также кривые для суммарных импульсов тяги 10 кH·c, 30 кH·c, 50 кH·c. Из графика на рисунке 20 видно, что для спутника массой 50 кг (ЭРДУ сориентировочным суммарным импульсом 3500 H·c) и для спутника массой 20 кг (ЭРДУ с суммарным импульсом 1000 H·c), если ограничить полную массу двигательной установки тремя килограммами, максимальная энергия конденсаторной батареи не может превышать 20 Дж.



Рисунок 20 – Расчётная зависимость массы ЭРДУ на базе АИПД от энергии разряда

Исходя из проведенного анализа, для дальнейших экспериментальных исследований в данной работе выбрана схема лабораторных моделей рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего вещества, с энергией разряда до 20 Дж.

Данные параметры лабораторных моделей отвечают требуемым условиям по обеспечению суммарного импульса, удельного импульса тяги, полной массы ЭРДУ и средней тяги. Это позволяет их рассматривать как прототипы лётных образцов АИПД для задач коррекции и поддержания орбиты МКА.

### Глава 2 Исследование характеристик микро-АИПД

### 2.1 Экспериментальный стенд и методики определения интегральных характеристик двигателя и параметров плазмы

Испытания лабораторных образцов двигателя (микро-АИПД) проводились в МАИ на экспериментальном стенде ИУ-1. Этот стенд оборудован вакуумной камерой объемом 2,5м<sup>3</sup>, в которой, при помощи системы откачки (форвакуумного насоса и диффузионного паромасляного агрегата), в процессе работы двигателя поддерживалось давление паров остаточного газа на уровне ~ 2,66·10<sup>-2</sup> Па. Кроме того в состав стенда входят системы электропитания, контроля и управления, параметров двигателя, инициирования разряда, измерения a также дополнительное И вспомогательное оборудование. Функциональная электрическая схема стенда приведена на рисунке 21.





Рисунок 21 – Функциональная электрическая схема стенда ИУ-1

Для заряда конденсаторного накопителя энергии моделей использовался регулируемый высоковольтный выпрямитель с рабочим напряжением до 2,5 кВ при токе до 300 мА. Питание блока инициирования разряда осуществлялось от стабилизированного источника постоянного тока типа TB-2 с напряжением на выходе до 1,5 кВ. В качестве аппаратуры запуска применялся многоканальный генератор импульсов ГИ-1.

В процессе испытаний регистрировались начальное напряжение U<sub>0</sub> на конденсаторной батарее, осциллограммы разрядного тока двигателя, периодически определялась его средняя тяга и фиксировалось число разрядных импульсов N. Для измерения напряжения U<sub>0</sub> использовался электростатический киловольтметр типа C510 (класса точности 0,5). Регистрация разрядного тока и тяги осуществлялась с помощью двухканального цифрового запоминающего РС осциллографа PCS500, на один вход которого через RC-интегратор подавался сигнал с пояса Роговского, расположенного на катодной шине модели (под катодом понимается электрод, который выполняет функцию катода в первом а на другой – полупериоде разряда), сигнал с индуктивного датчика тягоизмерительного устройства (ТИУ). Пояс **RC**-интегратором с имел чувствительность 17кА/В.

Для измерения средней тяги АИПД использовалось струнное маятниковое тягоизмерительное устройство прямого действия с индуктивным датчиком перемещений и системой калибровки с незначительной величиной трения в узлах. Его схема приведена на рисунке 22.



### Рисунок 22 – Схема тягоизмерительного устройства [40]

Собственная частота колебаний данного ТИУ находится на уровне 1 Гц. Поэтому, для исключения возникновения резонансных явлений, частота работы двигателя при измерениях тяги была не менее 1,5 Гц. Процесс измерения средней тяги АИПД состоял из следующих операций. После установки двигателя на платформу тягомера и откачки вакуумной камеры проводилась предварительная приработка модели в течение нескольких тысяч разрядных импульсов с целью ее выхода на установившийся рабочий режим. Затем, двигатель выключался и осуществлялась калибровка ТИУ с помощью грузиков известной массы. При этом особое внимание уделялось линейности тарировочной характеристики. В качестве чувствительного элемента использовался индуктивный датчик перемещений «TURCK» Bi2-M12-LIU со стабилизированным источником питания. Величина ТИУ АИПД смещения платформы В направлении С тягового усилия фиксировалась по изменению зазора между индуктивным датчиком и пластиной из магнитомягкого материала, закрепленной на платформе. Далее двигатель включался в частотный режим работы и проводился замер тяги АИПД. Затем

двигатель выключался и проводилась повторная калибровка ТИУ. Средняя величина тяги АИПД вычислялась по осредненной калибровочной характеристике ТИУ. Выполненная оценка погрешности измерения тяги двигателя показала, что она не превышает ±5%.

Измерения расхода рабочего вещества за период работы АИПД проводилось путем взвешивания шашек рабочего тела на высокочувствительных аналитических весах GR-200 до и после серии из  $(3...8)\cdot10^3$  импульсов, по результатам которых определялся и его расход за один импульс. При суммарном количестве импульсов ~5·10<sup>3</sup> относительная погрешность измерения расхода составляла не более ±2%.

На основе измеренных при испытаниях начального напряжения накопителя энергии, силы тяги АИПД и среднего расхода рабочего вещества за один импульс определялись интегральные характеристики испытуемого образца АИПД:

энергия разряда

$$W = \frac{CU_0^2}{2}$$
, (2.1)

потребляемая мощность

$$\mathbf{N} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{f} \,, \tag{2.2}$$

единичный импульс тяги

$$P_{e,\pi} = \frac{F}{f} , \qquad (2.3)$$

тяговая эффективность (тяговый КПД)

$$\eta_t = \frac{P_{e_{\mathcal{I}}}^2}{2mW},$$
(2.4)

среднемассовая скорость истечения плазмы (удельный импульс тяги)

$$\langle \mathbf{V} \rangle = \frac{\mathbf{P}_{ea}}{m},$$
 (2.5)

цена тяги

$$C_{t} = \frac{W}{P_{eg}} . \qquad (2.6)$$

Здесь С – ёмкость конденсаторного накопителя энергии, U<sub>0</sub> – начальное напряжение накопителя энергии, F – сила тяги АИПД, f – частота следования разрядных импульсов, m – средний расход рабочего вещества за импульс.

Наряду параметрическими испытаниями моделей микро-АИПД С проводились также диагностические исследования параметров плазмы двигателя. При исследовании импульсных потоков плазмы, генерируемых абляционными импульсными плазменными двигателями, необходима информация 0 концентрации частиц, скорости компонент плазмы, распределении магнитных полей и электрического тока в плазме в ускорительном канале и на выходе из него. Одним ИЗ основных параметров потока плазмы АИПД является концентрация электронов. От величины И распределения концентрации электронов зависит характер физических процессов в АИПД, распределение эффективность ускорения плазменного потока. электрического тока, Для измерения концентрации электронов в данной работе использовались метод интерферометрии плазмы и спектроскопический метод.

Распределение токов в двигателе определялось по результатам магнитозондовых измерений.

При параметрических испытаниях микро-АИПД фиксировалась динамика изменения температуры критичных к нагреву элементов двигателя.

### 2.1.1 Спектроскопический метод измерения концентрации электронов

Оптическая схема спектроскопического метода измерения концентрации электронов на основе регистрации штарковского уширения спектральных линий плазмы измерений приведена на рисунке 23. При спектроскопических экспериментах использовались монохроматор МДР-23, фотоумножитель ФЭУ-62, цифровые осциллографы (C9-8 и GDS-830), синхронизирующие устройства (GFG-8210, ГИ-1) и вспомогательная оптика. Юстировка оптической схемы и измерение аппаратной функции осуществлялись с помощью гелий-неонового лазера ЛГН-207Б. Типичный внешний вид аппаратной функции приведен на рисунке 24.

48



вакуумная камера, 2 – объектив с фокусным расстоянием 15 см,
 диафрагма, 4 – монохроматор МДР-23, 5 – фотоумножитель,
 АИПД, 7 – гелий-неоновый лазер







Из анализа спектра излучения разряда устанавливалось присутствие в рассматриваемом спектре водородных линий наряду с линиями фтора и углерода (продуктов абляции рабочего вещества – фторопласта), а также меди (продукта эрозии электродов игнайтера и основных электродов АИПД). Водород в плазме

присутствовал вследствие наличия в вакуумной камере остаточных газов (паров воды и вакуумного масла), его количество было незначительное. Для проведения спектроскопических измерений выбиралась линия водорода H<sub>β</sub>.

Измерения контура спектральной линии  $H_{\beta}$  выполнялись на оси канала АИПД при регистрации спектра излучения плазмы вдоль луча, перпендикулярного к оси АИПД. Сканирование по спектру осуществлялось с шагом 0,25Å.

Электронная концентрация N<sub>e</sub> при штарковском механизме уширения линии Н<sub>β</sub> связана с полушириной контура этой линии соотношением [41]

$$N_{e} = C(N_{e}, T) \cdot \Delta \lambda_{s}^{3/2}, \qquad (2.7)$$

где  $C(N_e, T)$  – штарковская константа,  $\Delta \lambda_s$  – полуширина контура линии.

Анализ контура спектральной линии водорода  $H_{\beta}$  и измерение полуширины этой линии  $\Delta\lambda_{_{H3M}}$ с учетом полуширины аппаратной функции  $\Delta\lambda_{_{in}}$  позволяют определить значение  $\Delta\lambda_{_{s}}$  по формуле  $\Delta\lambda_{_{s}} = \sqrt{\Delta\lambda_{_{H3M}}^2 - \lambda_{_{in}}^2}$  и в итоге рассчитать концентрацию электронов  $N_{_{e}}$  в плазме АИПД.

# 2.1.2 Интерферометрический метод измерения концентрации электронов

Для измерений концентрации электронов в АИПД интерферометрическим способом была выбрана схема трехзеркального лазерного интерферометра с фотоэлектрической регистрацией сигнала [48, 49].

Оптическая схема проводившихся интерферометрических измерений приведена на рисунке 25. Интерферометр представляет собой один из вариантов классического трехзеркального интерферометра [50]. Активным резонатором интерферометра является одномодовый гелий-неоновый лазер 1 мощностью 15 мВт. Пассивный резонатор, в котором размещается исследуемая плазма АИПД, образован выходным зеркалом лазера и сферическим зеркалом 5. Зеркало 5 этого резонатора с фокусным расстоянием ~1 м имеет коэффициент отражения ~95 % для длины волны  $\lambda$ =632,8 нм. Для создания периодических колебаний оптической

длины пассивного резонатора выходное зеркало закреплено на пьезоэлектрическом керамическом цилиндре, который подается на модулирующее напряжение 10 В с частотой 50 Гц. Для ввода и вывода лазерного излучения через вакуумную камеру используются кварцевые окна диаметром 5 CM.



1 – гелий-неоновый лазер; 2 – диафрагма; 3 – вакуумная камера; 4 – лабораторная модель АИПД; 5 – зеркало; 6 – диафрагма; 7 – фильтр; 8 – фотоумножитель.

Рисунок 25 – Оптическая схема интерферометрических измерений

Регистрация оптического сигнала осуществляется фотоумножителем 8 и цифровым запоминающим двухлучевым осциллографом. Наибольшая спектральная чувствительность фотоумножителя соответствует длине волны  $\lambda$ ~600 нм, что достаточно близко к длине волны лазера ( $\lambda = 632,8$  нм).

При проведении экспериментов оптическая схема настраивается таким образом, чтобы амплитуда измеряемых на фотоумножителе сигналов не превышала 500 мВ, что соответствует границе линейности этого прибора. Число проходов лазерного излучения в пассивном резонаторе оценивается величиной ~10...12 пар.

Питание фотоумножителя обеспечивает высоковольтный стабилизированный источник напряжения. Номинальное значение напряжения

равно 1050 В. Разрешение фотоумножителя составляет по оценкам величину ~1 мкс, чтоможно считать удовлетворительным, поскольку с одной стороны, эта величина существенно превышает времена релаксации физических процессов в резонаторах схемы, а с другой, она значительно меньше длительности процесса разряда в ИПД (~15...20 мкс).

Помехозащищенность электрической схемы обеспечивалась заземлением аппаратуры, участвующей в эксперименте в одной точке. Кроме того, все высоковольтные и часть низковольтных цепей пропущены через ферритовые элементы, что позволяет снизить уровень электрических помех до приемлемого уровня.

Для защиты приемной части фотоумножителя от световых помех, сопровождающих работу АИПД, были предприняты следующие меры: на выходе из вакуумной камеры установлен светозащитный экран с отверстием диаметром 10 мм для прохождения луча, а также нейтральные светофильтры и подвижная диафрагма диаметром 0,7 мм. Кроме того, фотоумножитель был отнесен от разрядной камеры на расстояние ~1 м и помещен в светонепроницаемый экран с входным отверстием ~2 мм для ввода лазерного излучения. Все измерения проводились при внешнем затемнении.

Для снижения уровня механических колебаний оптической системы все элементы лазерного интерферометра (гелий-неоновый лазер, зеркала, диафрагмы, фильтры, фотоумножитель) размещены на металлической плите массой более 100 кг, подвешенной с помощью четырех резиновых жгутов к металлической раме. Эта рама, охватывающая вакуумную камеру стенда, жёстко закреплена на металлической массой ~200 кг. станине установленной на полу экспериментального стенда на многослойных амортизирующих прокладках из эластичных материалов. После каждого цикла измерений плита арретировалась при помощи специального приспособления, что позволяло снять нагрузку с резиновых жгутов подвески. В целом вся эта конструкция обеспечила снижение в 15...20 раз уровня механических колебаний системы.

Таким образом, при проведении экспериментов была обеспечена защита электрической цепи интерферометра и измерительного оборудования от различных помех. Амплитуда помех в измерительной схеме (механических, электромагнитных, тепловых) составляла менее 10 % от амплитуды основного сигнала.

Синхронизация измерений осуществлялась от многоканального генератора импульсов, позволявшего производить настройку процесса во времени с точностью 0,1 мкс. Вся поступающая информация регистрировалась на двух цифровых запоминающих осциллографах. На одном из осциллографов регистрировалась интерферограмма процесса и синхронизированный с ней импульс тока АИПД, а на другом фиксировалась аппаратная функция интерферометра в момент включения АИПД. Все измерения концентрации электронов Ne в заданной пространственной точке дублировались по 6...10 раз, а затем результаты измерений усреднялись.

Для нахождения усредненного вдоль лазерного луча распределения концентрации электронов необходимо определить протяженность плазменного потока АИПД в исследуемых точках. Для этого используются плоские экраны, устанавливаемые на различных расстояниях от среза электродов АИПД. На при работе АИПД в частотном режиме осаждается экраны углерод, присутствующий в плазме продуктов абляции фторопласта. Углеродная пленка занимает на экране некоторую область, границы которой достаточно хорошо соответствуют границам плазменного сгустка. В каждом из экранов просверлено отверстие диаметром 3 мм, центр которого совмещается с продольной осью ускорительного канала АИПД с помощью юстировочного лазера, размещенного с задней стороны модели вне вакуумной камеры. Луч лазера проходит точно по оси канала через отверстие в торцевом изоляторе АИПД.

Перед началом каждой серии измерений АИПД должен устанавливаться образом, чтобы лазерный луч проходил через заданную таким точку пространства, a затем необходимо выполнить настройку лазерного интерферометра и измерить помехи в измерительной цепи.

Разработанная система измерений на основе трехзеркального лазерного интерферометра обеспечивает измерение концентрации электронов в импульсном потоке плазмы в диапазоне  $3 \cdot 10^{14} \dots 1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> с пространственным разрешением 2 мм и разрешением во времени ~1 мкс.

### 2.1.3 Измерение магнитных полей в плазме АИПД

Для определения характера распределения линейной плотности тока в микро-АИПД проводились магнитозондовые измерения [51, 52], схема которых показана на рисунке 26. Магнитный зонд индуктивного типа, помещался в керамическую трубку с внешним диаметром 2,5 мм. Чувствительность зонда составляла 64T/B. В процессе измерений зонд перемещался вдоль средней линии канала, на равном расстоянии от обоих электродов и шашек рабочего тела. На этой линии присутствует преимущественно компонента индукции магнитного поля  $B_z(x)$ , что значительно облегчает обработку результатов магнитозондовых измерений.

Для перемещения зонда использовалось дистанционно управляемое координатное устройство с двумя степенями свободы. Шаг перемещения вдоль оси X составлял 5 мм. В процессе эксперимента измерялся также разрядный ток J(t), для чего использовался пояс Роговского.



1 – магнитный зонд; 2 – электроды ИПД; 3 – RC-интегратор; 4осциллограф

Рисунок 26 - Схема магнитозондовых измерений в ускорительном канале абляционного ИПД

54

Осциллограммы разрядного тока и сигнала с магнитного зонда регистрировались двухлучевым запоминающим осциллографом. Магнитный зонд и пояс Роговского были связаны с осциллографом коаксиальными кабельными линиями с RC-интеграторами.

Магнитный зонд с диаметром внешнего корпуса 2,5 мм, помещенный в разрядный канал с межэлектродным зазором размером ~20 мм, вносит в разряд достаточно сильное возмущение, которое может повлиять на распределение разрядного тока. Однако эксперименты показали, что если координатное устройство электрически изолировано от вакуумной камеры, то осциллограмма разрядного тока при введении зонда в канал не изменяется. Это позволяет полагать, что магнитный зонд не вносит качественных искажений в распределение разрядного тока.

Для выяснения распределения токов по результатам магнитозондовых измерений использовалась упрощенная расчетная схема, представленная на рисунке 27.



Рисунок 27 – Расчетная схема разрядных токов

На рисунке 27 величина J соответствует полному разрядному току, h – расстоянию между электродами двигателя, x<sub>o</sub> – расстоянию от обратного токоподвода до обращенной к разряду поверхности торцевого изолятора, x – расстоянию, на котором чувствительность магнитного зонда еще позволяет уверенно регистрировать сигнал. Расчетная задача сводится к поиску такой

функции линейной плотности разрядного тока  $J_y(x)$ , магнитное поле которой  $B_z(x)$  наилучшим образом соответствовало бы экспериментально измеренному  $B_z(x)_{exp}$ .

Магнитная индукция  $B_{zj}$  в каждой точке  $x_j$  на оси ускорительного канала рассчитывалась как сумма магнитных индукций  $B_{z\,i\,j}$  от каждого i-го элемента расчетной схемы разрядных токов  $J_{y\,i}$ :

$$B_{zj} = \sum_{i=1}^{-n} B_{zij}$$
, (2.8)

где в соответствии с уравнением Био-Савара-Лапласа

$$\mathbf{B}_{zij} = \frac{\mu_o j_{yi}}{4\pi} \cdot \left[ \frac{h}{x_j \sqrt{x_j^2} + (h/2)^2} + \frac{h}{(x_i - x_j \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h/2)^2}} + \frac{4x_j}{h \sqrt{x_j^2 + (h/2)^2}} + \frac{4x_j}{h \sqrt$$

$$+\frac{4(x_i - x_j)}{h - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h/2)^2}}$$
(2.9)

Вектор  $j_{yi}$  представляет собой численный аналог функции  $j_y(x)$ . Расчет сводится к вариационной задаче нахождения вектора  $j_{yi}$ , доставляющего минимум функционалу

$$S(j_{yi}) = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left( \frac{2 \cdot (B_{zj} - B_{zj} \exp)}{B_{zj} + B_{zj} \exp} \right)^2,$$
 (2.10)

имеющему физический смысл среднеквадратичного отклонения расчетной индукции магнитного поля B<sub>zj</sub> от экспериментально измеренной B<sub>zjexp</sub> при следующем дополнительном условии:

$$\sum_{i=1}^{n} j_{yi} = J,$$
 (2.11)

где J – полный разрядный ток, измеренный поясом Роговского.

Математическая некорректность задачи нахождения функции распределения плотности тока  $J_y$  (x) по измеренным значениям индукции магнитного поля  $B_z$  (x)<sub>exp</sub> требует регуляризации численного решения, то есть включения в постановку задачи, кроме условия (2.11), еще и требования, чтобы искомая функция  $J_y$  (x) была достаточно гладкой [53]. Стандартный прием

состоит в добавлении к минимизируемому функционалу S (j<sub>yi</sub>) малой регуляризирующей добавки так, что решается задача нахождения минимума функционала F (j<sub>yi</sub>, α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>), равного

$$F(j_{yi}, \alpha_{1}, \alpha_{2}) = S(j_{yi}) + \alpha_{1} \cdot \int_{0}^{x} \left(\frac{dJ_{y}(x)}{dx}\right)^{2} dx + \alpha_{2} \cdot \int_{0}^{x} \left(\frac{d^{2}J_{y}(x)}{dx^{2}}\right)^{2} dx, \quad (2.12)$$

где  $\alpha_1 > 0$  и  $\alpha_2 > 0$  – параметры регуляризации. Такая замена приводит к тому, что среди множества функций  $J_y(x)$ , почти не отличающихся друг от друга по значениям S ( $j_{ji}$ ), предпочтение отдается более гладкой, имеющей меньшее значение F ( $j_{yi}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ).

Данная вариационная задача численно реализована при помощи метода вариаций [54]. Последний является разновидностью локальных метода покоординатного спуска, применим к широкому классу вариационных задач и ограничения, позволяет легко учитывать накладываемые на искомую функцию J<sub>v</sub>(x). Недостаток метода, заключающийся в том, что с его помощью можно найти лишь локальный и притом близкий к начальной функции минимум, здесь не играет роли, так как в качестве начального приближения при варьировании вектора  $j_{yi}$  принималось значение  $j_{yi}$ , найденное в предыдущий момент времени.

Параллельно с расчетом функции распределения линейной плотности тока J<sub>y</sub> (x) рассчитывалась также индуктивность разрядного канала L по формуле

$$\mathbf{L} = \Phi / \mathbf{J} \tag{2.13}$$

где  $\Phi = \int_{s} B_{z}(x) ds$ , и S = xh - площадь области, занятой расчетной схемой

разрядных токов.

### 2.1.4 Методика измерения температурных режимов работы АИПД

При исследовании параметров рабочих процессов микро-АИПД, возникла необходимость в определении температурных режимов работы двигателя. Для оценки тепловыделения в АИПД, при варьировании энергии разряда и мощности двигателя, изучалась динамика нагрева и остывания конденсатора, как элемента конструкции микро-АИПД с наиболее жесткими рабочими температурными ограничениями. Для этого использовались датчики температуры следующих типов:

• цилиндрический NTC (Negative Temperature Coefficient) термистор типа B57869S0302 с погрешностью измерения ~2% в диапазоне температур +20÷140<sup>0</sup>C и габаритными размерами Ø2,4×6,5мм – датчик T1;

 пленочный терморезистор марки ИС544 с размером активной части 20×20мм – датчик Т2.

Их тарировочные характеристики приведены на рисунках 28, 29. Для обеспечения плотности теплового контакта между датчиками и контролируемым элементом применялась теплопроводная паста типа АлСил-3, основные электрофизические характеристики которой приведены в Таблице 9. Регистрация сигналов с датчиков проводилась путем их последовательной коммутации с цифровым мультиметром M3860D.

Таблица 9– Основные электрофизические характеристики термопасты АлСил-3

Теплопроводность, Вт/м*К	1,8-2,0
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 МГц,	18
не более	4,0
Удельное объемное электрическое сопротивление, не	10 <sup>13</sup>
менее, Ом*см	10
Электрическая прочность, кВ/мм	10-15
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10	0.000
МГц, не более	0,009



Рисунок 28 – Тарировочная характеристика датчика В57869



Рисунок 29– Тарировочная характеристики терморезистора ИС-544 Датчик Т1 располагался на минусовом выводе конденсатора, а Т2 – на боковой его поверхности. Поскольку датчик Т1 был расположен на элементе

конденсатора находящегося под значительным потенциалом, то измерения температуры проводились при кратковременном выключении двигателя и снятом напряжении с накопителя энергии.

#### 2.1.5 Погрешности измерения

Для всех проведенных измерений и полученных результатов, которые в свою очередь можно разделить на прямые и косвенные, необходимо оценить погрешность измерения.[55]. В настоящее время не существует универсального способа оценки границ доверительного интервала, при заданной надежности, для результата косвенных измерений [56]. Поэтому, в данной работе, ограничимся статистической обработкой лишь результатов прямых измерений, к которым относятся: измерения тяги двигателя, напряжения разряда, расхода рабочего тела, индукции собственного магнитного поля.

Для уменьшения влияния на степень достоверности получаемых результатов случайных ошибок, обработка определяемых величин проводилась не менее чем по пяти измерениям.

Для закона нормального распределения случайных величин, для всех наших измерений, доверительная вероятность составляет α=0,95, а доверительный интервал можно представить в виде [56]:

$$\bar{a} - t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{a}} \le a \le \bar{a} + t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{a}},$$

где: а – истинное значение измеряемой величины;

 $\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{n}$  – среднеарифметическое значение измеряемой величины;

t<sub>α</sub> – коэффициент Стъюдента, который при числе измерений n=5 и вышеуказанной доверительной вероятности равен 2,78 [56];

 $\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{a} - a_i)^2}{n(n-1)}}$ - среднеквадратичная погрешность результата серии

измерений случайной величины a<sub>i</sub>.

То есть, истинное значение измеряемой величины с вероятностью 95% должно находиться в указанном интервале.

Для оценки точности измерений использовалось понятие относительной погрешности є равной [56]:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{a}}}{\bar{a}} \cdot 100\%.$$

Определенные таким образом погрешности составили: для тяги не более  $\pm 2\%$ , для напряжения разряда не более  $\pm 1\%$ , для расхода рабочего тела менее  $\pm 0,5\%$ , для индукции собственного магнитного поля  $\pm 5\%$ .

2.2 Экспериментальные исследования рабочих процессов в лабораторных моделях с энергией до 10 Дж

### 2.2.1 Базовая лабораторная модель микро-АИПД с энергией разряда до 10 Дж

Все исследовавшиеся в данной работе лабораторные образцы микро-АИПД имели одно схемное решение и различались только номиналом, типом и количеством конденсаторов в блоке накопителя энергии, а также размерами канала. На рисунке 30 представлена конструктивная разрядного схема лабораторного образца микро-АИПД номинальной энергией 8,44 Дж (АИПД-8) [57, 58, 59, 60]. Его основными элементами являются блок разрядного канала 1 с элементами крепления, конденсаторный накопитель энергии 2 и система подачи рабочего вещества 3. Внешний вид двигателя представлен на рисунке 31. Собственно разрядный канал модели (рисунок 30) образован двумя плоскими медными электродами толщиной 2 мм (катодом 4 и анодом 5), установленными между ними двумя фторопластовыми шашками рабочего тела 6 и торцевым изолятором, изготовленным из тугоплавкой керамики типа нитрида бора (BN). В отверстие в катодном электроде вставлена одноэлектродная свеча инициирования электрического разряда 7 (игнайтер). Она представляет из себя керамическую трубочку наружным диаметром 3 мм в которую вставлен вольфрамовыйэлектрод поджига. Высоковольтный пробой (15-20 кВ) между этим электродом и катодом инициирует возникновение основного разряда между катодом и анодом. В специальной петле катодной шины устанавливается датчик разрядного тока, представляющий собой охватывающую шину катушку тороидальной формы (пояс Роговского). Катодный и анодный электроды разделены изолирующей пластиной из стеклотекстолита толщиной 2 мм и соединены с конденсатором таким образом, чтобы обеспечить минимальную начальную индуктивность разрядной цепи.

Величина начальной индуктивности двигателя  $(L_0)$  складывается из индуктивности конденсаторного накопителя энергии, коммутационных шин и электродов токопровода. Она определялась экспериментально при механическом замыкании цепи в месте предполагаемого пробоя разрядного промежутка, то есть у поверхности торцевого изолятора.



1 – разрядный канал, 2 – накопитель энергии (конденсатор); 3 – система подачи рабочего вещества; 4 – катод, 5 – анод; 6 – шашки рабочего вещества; 7 – свеча поджига.

Рисунок 30 – Конструктивная схема микро-АИПД



Рисунок 31 – Внешний вид лабораторной модели АИПД-8

Шашки рабочего тела устанавливаются между электродами вплотную к торцевому изолятору. Между шашками, в поверхности торцевого изолятора, имеется углубление, играющее роль форкамеры. Электроды за срезом шашек имеют треугольную в плане форму и наклонены под некоторым углом относительно продольной оси двигателя, при этом расстояние между ними увеличивается по линейному закону. Полный угол раскрытия составляет ~ 20<sup>0</sup>. Как показали экспериментальные исследования АИПД, проводившиеся в НИИ ПМЭ МАИ, такая конфигурация электродной системы, обеспечивает наибольшую эффективность ускорения плазмы. Исходя из анализа данных исследования АИПД различных энергий проводившихся в НИИ ПМЭ МАИ, для разработанной модели микро АИПД были выбраны следующие геометрическое параметры разрядного канала и шашек рабочего тела:

- высота канала h и шашек рабочего тела 15 мм
- длина шашек в направлении канала 1 20 мм
- длина электродов от поверхности форкамеры 50 мм
- двойной угол раскрытия электродов 20<sup>0</sup>
- полный угол раскрытия шашек  $0^0$
- расстояние между шашками 7-8 мм

Начальная индуктивность модели L<sub>0</sub> составила 40 нГн.

Система подачи рабочего тела служит для перемещения шашек в межэлектродное пространство по мере их выработки. Она состоит из двух пружин, толкателей и элементов крепления. Усилие, развиваемое пружинами, посредством толкателей передается на шашки и вызывает их перемещение навстречу друг другу. При этом стабильный гарантированный зазор между шашками обеспечивается специальным упором клиновидной формы. Изменяя его ширину можно регулировать расстояние между шашками.

Блок накопителя энергии АИПД-8 состоит из одного сильноточного конденсатора с металлизированными обкладками типа МКV серии B25855 фирмы EPCOS (Германия) емкостью 7,5 мкФ. Его параметры лучше, чем у конденсаторов серии КВИК разработки ЗАО «Элкод» (г. Санкт-Петербург) использовавшиеся ранее в конструкциях АИПД разработки НИИ ПМЭ МАИ. Сравнительные характеристики отдельных образцов конденсаторов КВИК и B25855 приведены в таблице 10.

Конденсатор	КВИК-6	B25855
Рабочее напряжение U <sub>0</sub> , В	1200	1300*
Емкость С, мкФ	14,2	7,5
Энергоемкость W <sub>0</sub> , Дж	10	8,5
Индуктивность Lc, нГн	12	30
Омическое сопротивление Rc, мОм	10	1,4
Тангенс угла потерь, tgб	$40.10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Масса, г	550	600
Удельная энергоемкость ү, Дж/кг	18	
Ресурс, кол-во импульсов	$10^{7}$	10 <sup>10</sup>
Максимальная амплитуда разрядного	_	7500 (при уменьшении
тока I <sub>0</sub> , А		ресурса в 10 раз) 3000 (без уменьшения
		pecypca)
(* - попускается повышение)	рабочего наг	пажения по 1500 Р

Таблица 10 – Характеристики конденсаторов

(\* – допускается повышение рабочего напряжения до 1500 В при соответствующем снижении ресурса).

2.2.2 Определение характеристик, режимов работы и условий сохранения работоспособности модели микро-АИПД с энергией разряда менее 10 Дж

Целью первых экспериментов на лабораторной модели микро АИПД-8 было определение негативных факторов, влияющих на работоспособность двигателя и выработка технических решений, позволяющих их устранить. То есть, необходимо было добиться отсутствия науглероженных участков на рабочей поверхности шашек фторопласта, не допустить перегрева и перегрузки по току конденсаторов в блоке накопителя энергии. Также необходимо было оценить, способна ли ДУ на базе микро-АИПД обеспечить величину суммарного импульса тяги, требующегося для выполнения рассматриваемых задач ее перспективного применения. Для этого необходимо было получить достаточно высокий удельный импульс тяги, либо наметить пути его достижения.

Результаты исследования характеристик АИПД-8 приведены в таблице 11.

Напряжение, В	Частота, Гц	Энергия, Дж	Мощность, Вт	Ед. импульс тяги, мН*с	Удельный импульс тяги, м/с
1500	5	8,44	42	0,14	4154
1400	5	7,35	37	0,11	3767
1300	5	6,34	32	0,10	3027
1200	5	5,40	27	0,09	3185

Таблица 11 – Результаты испытаний АИПД-8

На рисунке 32 представлена зависимость единичного импульса тяги модели от энергии разряда. Согласно графику, большей энергии разряда соответствует больший единичный импульс тяги и зависимость эта линейная, что типично для АИПД [23].



Рисунок 32 – Зависимость единичного импульса тяги модели АИПД-8 от энергии разряда

Осциллограмма разрядного тока двигателя для случая начального напряжения 1500 В изображена на рисунке 33. Она представляет из себя периодическую затухающую кривую с большим числом полупериодов характерную для АИПД энергией менее 20 Дж. Максимальная величина разрядного тока составляет порядка 12 кА, при этом чувствительность пояса Роговского, как говорилось выше, равнялась 17 кА/В.



Рисунок 33 – Осциллограмма разрядного тока АИПД-8

На начальном этапе исследования модели АИПД-8 на всех режимах работы присутствовала науглероженность шашек рабочего тела, которая, в

зависимости от энергии двигателя, охватывала разные площади их рабочих поверхностей. Так, при энергии 8,44 Дж (напряжение 1500 В) была зафиксирована лишь незначительная науглероженность краев шашки вблизи электродов (рисунок 34), которую удалось устранить, исключив тепловой контакт шашек с электродами (установив между шашками И поверхностями электродов гарантированный зазор). При снижении энергии (напряжение 1400 В и менее) наблюдается уже существенное зачернение углеродом углов рабочей поверхности шашек, которое принятые меры не позволяют устранить. Таким образом, только при энергии 8,44 Дж и более модель АИПД-8 можно было признать работоспособной.



Рисунок 34 – Внешний вид рабочих поверхностей шашек рабочего тела модели АИПД-8 после эксперимента с напряжением разряда 1500 В

Подобные эксперименты были проведены также на лабораторной модели номинальной энергией 4,5 Дж (АИПД-5, рисунок 35 и 36) основное отличие которой от АИПД-8 заключалось в том, что в накопителе энергии вместо конденсатора емкостью 7,5 мкФ был установлен конденсаторемкостью 4 мкФ [57, 58, 59, 60]. Полученные данные качественным образом совпадают с результатами исследований АИПД-8.



Рисунок 35 – Внешний вид лабораторной модели АИПД-5



Рисунок 36 – Модель АИПД-5 во время работы в вакуумной камере На модели АИПД-5 была проведена оценка пределов работоспособности микро-АИПД данного типа по тепловому критерию [59]. В процессе этих исследований, путем варьирования энергии разряда и мощности двигателя, изучалась динамика нагрева и остывания конденсатора, как элемента конструкции АИПД с наиболее жесткими температурными ограничениями. На рисунке 37 представлены графики нагрева минусового вывода (токоподвода) и боковой поверхности конденсатора в зависимости от длительности работы модели при энергии 4,5 Дж и частоте 5 Гц. Видно, что температура вывода  $T_{\rm в}$  конденсатора отличается от температуры его боковой поверхности  $T_{\rm k}$  не только существенно более резким характером своего роста, но и уровнем величины, которая превышает верхний предел рабочего интервала температур конденсатора ( $T_{\rm макс}$ = +85<sup>0</sup>C). То есть величина температуры выводов конденсаторов является важным показателем, определяющим возможность длительной работы двигателя.



Рисунок 37 – Динамика изменения температур вывода конденсатора и боковой поверхности конденсатора в зависимости от длительности работы двигателя

Прогрев массива конденсатора до установившейся температуры происходит медленными темпами, поскольку он сам по себе имеет достаточно

большую массу и кроме того закреплен на алюминиевой платформе, образующей с конденсатором тепловую пару.

Нагрев токоподводов конденсатора микро-АИПД зависит не столько от тепла, выделяющегося в его массиве и на контактном сопротивлении соединения собственно токоподвода с электродной шиной, но поступающим преимущественно определяется теплом посредством теплопроводности от электродов (катода и анода) работающего двигателя. При увеличении мощности АИПД-5 величина тепловыделения на токоподводе начинает иметь все большее значение. На рисунке 38 отображена динамика изменения температуры минусового вывода конденсатора в зависимости от длительности работы двигателя при различной энергии и частоте. Видно, что с увеличением мощности модели наблюдается существенный рост температуры вывода.



Рисунок 38 – Динамика изменения температуры вывода конденсатора в зависимости от длительности работы АИПД-5 при различной энергии и частоте

Согласно паспортным данным, допустимая максимальная рабочая температура используемых конденсаторов составляет +85<sup>0</sup>C. Эта величина соответствует равновесной температуре массива конденсатора Т<sub>макс.</sub> и в

70

основном определяется характеристиками применяемой пленки. При наличии существенного градиента температур и выполнении неравенств T<sub>в</sub>>T<sub>макс</sub>, T<sub>корп</sub><T<sub>макс</sub>, в общем случае требуется проведение расчета поля температур конденсатора. Из данного расчета подбирается такой режим работы конденсатора, при котором ни одно значение его температуры в области расположения пленки и электродов не превышает допустимой рабочей. При этом максимальная допустимая рабочая температура выводов определяется исходя из их конструкции.

Наряду с изучением динамики процесса нагрева элементов конденсатора модели АИПД-5 изучалась также динамика их охлаждения. Этот вопрос является важным при выборе циклограммы работы двигателя, определении скважности его включения. На рисунке 39 представлены графики остывания вывода конденсатора после работы модели на различных режимах. Во всех случаях момент отключения двигателя соответствовал достижению температуры вывода масштаба +130<sup>o</sup>C.





Полученные графики нагрева и остывания конденсатора позволяют определить режим работы двигателя и не допустить перегрева его блока накопителя энергии.

Графики нагрева, приведенные на рисунках 37, 38 показывают, что длительная работа модели без перегрева конденсатора (в предположении допустимости его работы при  $T_{\rm B} \leq 130^{0}$ C) возможна только при уровне мощности не более 25 Вт.

Исследования моделей АИПД-8 и АИПД-5 показали, что на большинстве режимов работы на шашках рабочего тела присутствуют области со следами науглероживания, особенно заметные при снижении энергии. Это говорит о низком энерговыделении разрядной энергии непосредственно в рабочем канале и больших ее потерях в цепи. Кроме этого, конденсаторы моделей АИПД-8 и АИПД-5 значительно перегружены по току. Их максимальная рабочая амплитуда тока превышает максимальную допустимую (согласно паспортным данным) в 1,68 и 2,76 раза, соответственно (таблица 12) [51].

Таблица 12 – Максимальная допустимая и максимальная рабочая амплитуда тока конденсаторов моделей АИПД-8, АИПД-5, АИПД-5-36

Модель	Тип силового конденсатора	Емкость конденса- тора, мкФ	Количество конденса- торов, шт.	Максимальная амплитуда тока, согласно паспортным данным (1300В), А	Амплитуда тока при работе модели на номинальном режиме (1300B), А
АИПД-8	MKV серии B25855	7,5	1	7500	12580
АИПД-5	MKV серии B25855	4,0	1	4000	11050
АИПД- 5-3б	MKV серии B25855	1,5	3	3800	5000

С целью устранения указанных недостатков была разработана модель АИПД-5-36 с накопителем энергии, состоящем из трех параллельно
соединенных конденсаторов МКV серии B25855 емкостью 1,5 мкФ каждый и геометрическими параметрами разрядного канала подобными модели АИПД-5:

- высота канала h и шашек рабочего тела h<sub>1</sub> 15 мм;
- длина шашек в направлении канала l 14 мм;
- длина электродов от поверхности форкамеры- 50 мм;
- двойной угол раскрытия электродов  $\sim 20^{\circ}$ ;
- полный угол раскрытия шашек  $0^0$ ;
- расстояние между шашками 8мм.

Внешний вид лабораторной модели АИПД-5-36 во время работы представлен на рисунке 40.



Рисунок 40 – Внешний вид АИПД-5-3б во время работы (начало разряда)

Данный вариант исполнения двигателя позволил практически вдвое снизить начальную индуктивность электрической цепи, которая составила 22·10<sup>-9</sup> Гн по сравнению с 45·10<sup>-9</sup> Гн у модели АИПД-5. В результате уменьшились потери энергии в электрической цепи и выросло значение

максимальной амплитуды разрядного тока до 19 кА. На модели АИПД-5-36 при частоте работы 5 Гц науглероживание шашек рабочего тела отсутствовало при снижении энергии вплоть до 2,25 Дж (напряжение 1000 В). Кроме этого, применение в конструкции модели трех конденсаторов вместо одного позволило несколько уменьшить их токовую перегрузку, которая не превышала 32% (таблица 12). Характеристики модели АИПД-5-36 приведены в таблице 13, а на рисунках 41, 42 представлены графики зависимости ее единичного импульса тяги и КПД от энергии разряда, соответственно.

	Напря-			Ед. импульс		
Емкость	жение	Частота	Расход за имп	ТЯГИ	Энергия	Мощность
С, мФ	U, B	f, Гц	m, г/имп	мН*с	W, Дж	<b>N</b> , Вт
4,5	1500	5	3,53E-05	0,1120	5,0625	25,3125
4,5	1400	5	3,09E-05	0,0932	4,41	22,05
4,5	1300	5	2,75E-05	0,0730	3,8025	19,0125
4,5	1200	5	2,47E-05	0,0620	3,24	16,2
4,5	1100	5	2,11E-05	0,0466	2,7225	13,6125
4,5	1000	5	1,92E-05	0,0426	2,25	11,25

Таблица 13 – Характеристики модели АИПД-5-36



Рисунок 41 - Зависимость единичного импульса тяги АИПД-5-36 от энергии разряда при частоте работы 5 Гц



Рисунок 42 - Зависимость КПД АИПД-5-3б от энергии разряда при частоте работы 5 Гц

Важным фактором, влияющим на эффективность протекания процессов абляции и ускорения рабочего тела в разрядном канале, являются его геометрические параметры. Так, например, с увеличением расстояния между шашками уменьшается их расход, растет удельный импульс, но при этом несколько падает тяга двигателя. Исследования показали, что чем больше это расстояние, тем выше КПД модели, однако при существенном увеличении данного промежутка происходит науглероживание шашек [57, 58, 59].

Сравнение параметров моделей микро-АИПД различного исполнения, сопоставимого уровня энергий (начиная с модели АИПД-5) проводилось при одинаковых размерах разрядного канала: высоте – 15 мм, длине – 14 мм и ширине – 8 мм. Данные размеры были выбраны экспериментально и соответствуют высоким характеристикам моделей при отсутствии науглероженности шашек рабочего тела.

В процессе работы АИПД, на этапе приработки шашек рабочего тела, геометрия его разрядного канала постоянно меняется, что в некоторых случаях, при отсутствии стабилизации формы канала, отражается на работоспособности двигателя. Длительные испытания модели АИПД-5-3б показали, что вначале ее работы выработка шашек рабочего тела принимает бочкообразную форму, которая затем стабилизируется и продолжает оставаться неизменной в течение всей последующей работы модели (рисунок 43).



Рисунок 43 – Внешний вид шашек рабочего тела модели АИПД-5-3б после приработки

Это говорит о равномерной выработке шашек после этапа их приработки. Подобная форма шашек свидетельствует о преимущественном горении разряда внутри канала в отличие от двигателей большей энергии с преобладающим горением разряда в области выходного сечения канала, что увеличивает их эффективность. Бочкообразная форма шашек наблюдалась также и модели АИПД-8.

Наряду с параметрическими испытаниями моделей микро-АИПД проводились также диагностические исследования параметров плазмы двигателей [60]. Так, на АИПД-8 были выполнены спектрометрические измерения концентрации электронов по методике, изложенной в разделе 2.1.1. Измерения контура спектральной линии водорода Н проводились на средней линии канала в точках указанных на рисунке 44 при энергии разряда 8 Дж.



1 – электроды; 2 – рабочее тело (фторопласт-4)

Рисунок 44 – Схема расположения линий просвечивания плазмы при измерениях концентрации электронов в модели АИПД-8

Полученные результаты приведены на рисунках 45 – 47. При этом измеренная полуширина аппаратной функции составила 1,36 Å.



I – интенсивность

Рисунок 45 – Контур спектральной линии, измеренной в сечении соответствующем средней линии канала с координатой х=5 мм



Рисунок 46 – Контур спектральной линии, измеренной в сечении соответствующем средней линии канала с координатой х =12 мм



Рисунок 47 – Контур спектральной линии, измеренной в сечении соответствующем средней линии канала с координатой х=24 мм

Анализ контура спектральной линии Н и измерение полуширины этой линии Δλ, с учетом полуширины аппаратной функции Δλ позволили определить концентрацию электронов N<sub>e</sub> в плазме АИПД-8, усредненное по времени распределение которой по длине канала двигателя приведено на рисунке 48.



Рисунок 48 – Распределение максимальной концентрации электронов по длине импульсного плазменного двигателя при движении плазменного сгустка в канале АИПД-8 Полученные данные по распределению концентрации электронов по длине канала подтверждают установленный ранее факт, что ток в модели АИПД-8 локализуется в пространстве между шашками. Это обусловливает повышенный их расход и, соответственно, низкую эффективность двигателя. Аналогичным образом ведут себя распределения концентрации электронов по длине канала у моделей больших энергий (50 Дж и более) с малым соотношением C/L<sub>0</sub> [31].

Другим направлением экспериментального исследования было решение задачи уменьшения массы двигательной установки на базе микро-АИПД, которая в основном определяется массой конденсаторной батареи [45]. Для снижения ее величины на основе модели АИПД-5-36 была разработана модель АИПД-ИТ (рисунок 49), накопитель энергии которой состоял из двух конденсаторов ICARMSR 25 (Италия) суммарной емкостью 9,2 мкФ с улучшенными весовыми характеристиками (таблица 14). Ее параметры, наряду с параметрами других испытывавшихся моделей, приведены в таблицах 15, 16 [57, 58, 59, 60].



Рисунок 49 – Внешний вид модели АИПД-ИТ

	Конденсатор				
Параметр	EPCOSB25855	ICARMSR 25			
	(Германия)	(Италия)			
С, мкФ	7,5	6,8			
Uo, B	1500	1200			
Io, A	3000	1360			
Iomax, A *	7500	3400			
Rc, мОм	1,7	3,89			
Lc, нГн	30	40			
Мс, г	600	175			
ү, Дж/кг	14,1	28,0			

Таблица 14 – Характеристики конденсаторов

Таблица 15 – Сравнение основных характеристик, полученных на различных моделях АИПД

Vanatanua	Лабораторная модель						
ларактеристики	АИПД-8	АИПД-5		АИПД-5-3б		АИПД-ИТ	
Энергия разряда, Дж	8,4	4,5	3,8	5,0	3,8	4,6	6,6
Потребляемая мощность, Вт	42,2	22,5	16,9	25	19	9,2	13,2
Единичный импульс тяги, мН·с	0,14	0,06	0,05	0,11	0,07	0,07	0,11
Расход рабочего вещества, мкг/импульс	33,7	_	12,7	35,3	21,0	15,7	21,4
Удельный импульс тяги, км/с	4,15	_	3,94	3,12	3,33	4,46	5,14
Тяговая эффективность, %	3,4	_	2,6	3,5	3,1	3,4	4,3

	АИПД - 8	АИПД - 5	АИПД – 5-3б	АИПД – ИТ
Емкость (С), мкФ	7,5	4	4,5	9,2
Разрядный ток, приходящийся на один конденсатор, экспериментальные данные, кА	15	- (17,5/3)=5,8		(11,7/2)=5,85
Масса конденсаторной батареи, г	600	400	750	<u>350</u>
Сопротивление конденсатора, мОм	1,7	2,8	1,8	3,6
Сопротивление батареи конденсаторов, мОм	1,7	2,8	0,6	1,8
Начальная индуктивность модели (L <sub>0</sub> ), нГн	40	40	20	32
С/L <sub>0</sub> ,мкФ/нГн	0,187	0,1	0,22	<u>0,33</u>
$\sqrt{L_0 \cdot C}$ , MKC	<u>0,54</u>	0,4	0,3	<u>0,59</u>

Таблица 16 – Сравнение характеристик разрядной цепи различных АИПД

Приведенные данные показывают, что модель АИПД–ИТ обладает не только лучшими массовыми характеристиками, но и лучшими значениями соотношений C/L<sub>0</sub>, определяющих эффективность двигателя, согласно [31], при почти неизменном значении  $\sqrt{L_0 \cdot C}$ , характеризующим длительность полупериода (см. раздел 3.1)

Выработка шашек образца АИПД-ИТ после 10<sup>4</sup> импульсов приведена на рисунке 50.



Рисунок 50 – Внешний вид выработки шашек в модели АИПД-ИТ

Из данной фотографии видно, форма выработки шашек перестала быть бочкообразной и приблизилась к форме характерной для моделей больших энергий (более 50 Дж), где основная доля энергии разряда выделяется за срезом шашек и эффективность ускорения плазмы электромагнитной силой выше. А это означает, что в АИПД-ИТ пик разряда сместился вдоль канала по направлению к выходу, результатом чего и стал рост характеристик двигателя.

Таким образом, использование конденсаторов ICAR MSR 25 позволило улучшить не только весовые характеристики двигателя, но и его удельные параметры. 2.3 Экспериментальные исследования рабочих процессов в лабораторной модели диапазона энергии от 10 до 20 Дж

2.3.1 Лабораторная модель АИПД с диапазоном энергии от 10 до 20 Дж

Конструктивно лабораторная модель АИПД-4к диапазона энергии от 10 до 20 Дж была изготовлена аналогично лабораторным моделям меньшей энергии, рассмотренным в предыдущих разделах этой главы. Ее накопитель энергии состоял из четырех конденсаторов марки EPCOS общей ёмкостью 16 мкФ. Размеры рабочей поверхности шашек имели значение: высота – 25 мм, ширина – 20 мм. Внешний вид модели изображен на рисунке 51.



1 – катод, 2 – анод, 3 – шашки рабочего вещества, 4 – торцевой изолятор, 5 – накладка, 6 – пластина, 7 – пружинная система подачи рабочего вещества,8 – конденсатор, 9 – токоподводящие шины, 10 – изоляционная втулка,11 – шпилька, 12 – игнайтер

Рисунок 51 – Конструктивная схема экспериментального образца двигателя АИПД-4к

Типичная осциллограмма разрядного тока модели представлена на рисунке 52.



Рисунок 52 – Осциллограмма разрядного тока образца двигателя АИПД-4к при энергии разряда 18 Дж.

Результаты исследования характеристик АИПД-4к приведены в таблице 17 и на рисунках 53-54. Из графика на рисунке 53 видна линейная зависимость единичного импульса тяги от энергии типичная для АИПД.

Энергия разряда, Дж	11,52	13,52	15,68	18
Потребляемая мощность, Вт	23,04	27,04	31,36	36
Единичный импульс тяги, мН·с	0,22	0,265 0,305		0,38
Расход рабочего вещества, мкг/импульс	40,0	47,5	47,0	56,0
Удельный импульс тяги, км/с	5500	5579	6489	6786
Тяговая эффективность, %	5,2	5,5	6,3	7,1

Таблица 17 –	Основные ха	пактепи	тики А	ИПЛ-4к
таолица т / –	Оспоблые ла	μακτοριά		инд-тк



Рисунок 53 – Зависимость единичного импульса тяги от запасаемой энергии в модели АИПД -4к



Рисунок 54 – Зависимость удельного импульса тяги от запасаемой энергии в модели АИПД -4к

АИПД-4к При характеристик отсутствовала исследовании науглероженность шашек рабочего тела, за исключением случая снижения 11,52 энергии Дж, соответствовало напряжению до что между электродами 1200 В. Таким образом, модель АИПД-4к является работоспособной в диапазоне энергии от 13 Дж и выше.

## 2.3.2 Результаты определения концентрации электронов в микро-АИПД

Результаты интерферометрических измерений концентрации электронов на лабораторной модели АИПД-4к при энергии разряда 18 Дж показаны на рисунке 55 [60]. Этот рисунок иллюстрирует изменение максимальной концентрации электронов N<sub>e</sub> в центральной части плазменного сгустка при движении плазмы вдоль оси канала АИПД-4к в зоне между шашками и в межэлектродном пространстве за срезом шашек. Моменты времени от начала разряда, соответствующие появлению слоя плазмы с максимальной N<sub>e</sub> в точках АИПД, находящихся в области канала между шашками, приведены рядом с измеренными значениями концентрации электронов.

В исследуемой модели АИПД-4к максимальное значение тока достигается в момент времени t ~1,5 мкс (рисунок 51), когда плазменный сгусток находится в зоне канала между фторопластовыми шашками и на этом же участке зарегистрированы наибольшие значения  $N_e$  (14,6·10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>). Затем при приближении плазмы к срезу шашек разрядный ток уменьшается и концентрация электронов снижается. На оси разрядного канала в точке с координатой x = 24 мм вблизи среза шашек величина концентрации электронов, измеренная методом лазерной интерферометрии, составила 6,3·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>.



Рисунок 55 – Пространственно-временное распределение концентрации электронов при движении плазменного сгустка вдоль оси лабораторной модели АИПД-4к

Для измерения концентрации электронов в лабораторной модели АИПД-4к спектроскопический основе применялся также метод на регистрации штарковского уширения спектральных линийплазмы АИПД (раздел 2.1.1). функция регистрирующего тракта показана на рисунке 24. Аппаратная Полуширина аппаратной функции Δλ<sub>in</sub> составила величину 0,2 Å. Все схемные элементы экспериментального оборудования, участвовавшие в измерении аппаратной функции оставались такими же, как и при проведении экспериментов на лабораторной модели АИПД-8.

Измерения контура спектральной линии Н<sub>β</sub> проводились на оси канала АИПД-4к при регистрации спектра излучения плазмы вдоль луча, перпендикулярного к оси АИПД, в сечении, соответствующем срезу шашек.

Сканирование по спектру осуществлялось с шагом 0,25Å. Полученный в экспериментах контур линии Н<sub>в</sub> приведен на рисунке 56.



Рисунок 56 – Зависимость относительной интенсивности  $\bar{J} = \frac{J}{J_{max}}$  спектральной линии  $H_{\beta}$ от длины волны  $\lambda$  в модели АИПД-4к на оси канала в сечении, расположенном на срезе шашек

Анализ контура спектральной линии водорода  $H_{\beta}$  и измерение полуширины этой линии  $\Delta\lambda_s$  с учетом полуширины аппаратной функции  $\Delta\lambda_{in}$  позволили определить концентрацию электронов  $N_e$  в плазме АИПД. В лабораторной модели АИПД-4к на оси канала в сечении, соответствующем срезу шашек, величина  $N_e$  составила 4,8·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>. Эта величина хорошо согласуется с величиной  $N_e$  (6,3·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>), измеренной в АИПД-4к методом лазерной интерферометрии.

### 2.3.3 Результаты магнитозондовых измерений в канале АИПД-4к

По методике описанной в разделе 2.1.2 были проведены магнитозондовые измерения на лабораторной модели АИПД-4к на энергии разряда 18 Дж [60].

Кривые распределения линейной плотности разрядного тока  $J_y(x)$  по длине разрядного канала модели АИПД-4к, рассчитанные по результатам магнитозондовых измерений, представлены на рисунках 57 и 58. На рисунке 57 приведены кривые  $J_y$  (x) в моменты времени t = 1,0 мкс; 1,5 мкс(J ~  $J_{max}$ ); 2,0 мкс; 2,5 мкс; 3,0мкс (J~ 0), соответствующие первому полупериоду разрядного тока (рисунок 51). Кривые  $J_y(x)$ , соответствующие второму полупериоду при t = 3,0 мкс(J~ 0); 4,0 мкс; 5,0 мкс; 6,0 мкс (J~ 0), приведены на рисунке 58.



Рисунок 57– Распределение линейной плотности разрядного тока на оси ускорительного канала лабораторной модели АИПД-4к (первый полупериод разрядного тока)



Рисунок 58 – Распределение линейной плотности разрядного тока на оси ускорительного канала лабораторной модели АИПД-4к (второй полупериод разрядного тока)

При t ~ 1 мкс разрядный ток полностью локализован в разрядном канале.По осциллограмме тока (рисунок 52) в момент t = 1,5 мкс ток принимает максимальное значение, а по рисунку 57 видно, что ток в разрядном канале в этот момент имеет свой пик в районе середины шашек рабочего тела и постепенно уменьшается по направлению к выходу из канала. При t> 1,5 мкс разряд распространяется вдоль поверхности электродов и заполняет весь разрядный канал. Далее, до окончания первого полупериода разрядного тока, наблюдается отсутствие токового фронта, что характерно для квазистационарного режима ускорения. В момент, когда направление тока меняется на противоположное (t ~ 3 мкс), в разрядном канале наблюдается вихрь тока. Динамическая картина распределения тока во втором полупериоде практически повторяет распределение тока в первом полупериоде при меньшей плотности тока.

На рисунках 59 и 60 приведены кривые усреднённой по времени линейной плотности тока <Jy(x)>за первый полупериод разряда (0..3 мкс) и за второй полупериод (3..6 мкс), соответственно, рассчитанные по формуле:

$$< J_{y}(x) >= \frac{1}{\tau_{1/2}} \int_{t_{1}}^{t_{2}} J_{y}(x) dt$$

где  $\tau_{1/2}$  – длительность полупериода, а  $t_1$ и  $t_2$  –время начала и конца полупериода,соответственно.

Красными линиями на графиках отмечены границы шашек рабочего тела.



Рисунок 59– Распределение усреднённой по времени линейной плотности тока в ускорительном канале АИПД-4к в течение первого полупериода разрядного тока (0..3 мкс)



Рисунок 60– Распределение усреднённой по времени линейной плотности тока в ускорительном канале АИПД-4к в течение второго полупериода разрядного тока (3..6 мкс)

Магнитозондовые измерения магнитных полей и полученные распределения линейной плотности тока в разрядном канале лабораторной модели АИПД-4к позволяют предположить, что второй полупериод вносит заметный вклад в единичный импульс тяги, создаваемый двигателем, что отличает модели малой энергии (микро-АИПД) от двигателей большей энергии.

Полученные данные магнитозондовых измерений согласуются с результатами интерферометрических измерений концентрации электронов, что продемонстрировано на рисунке 61.



Рисунок 61 – Сравнение интерферометрических и магнитозондовых измерений

На рисунке видно совпадение максимума кривой пространственновременного распределения концентрации электронов при движении плазменного АИПД-4к, полученного сгустка вдоль оси канала результате В интерферометрических измерений, И максимума кривой распределения

усреднённой по времени линейной плотности тока в ускорительном канале за первые два полупериода суммарно, рассчитанной по результатам магнитозондовых измерений. Оставшиеся полупериоды (третий и четвёртый) незначительны по сравнению с первыми двумя и не учитывались при расчёте средней плотности тока.

Таким образом, принципиально различные методики измерений, такие как спектроскопические, интерферометрические и магнитозондовые, показали согласующиеся между собой результаты. Магнитозондовые измерения позволили определить динамическую картину распределения тока в первом и втором полупериоде разряда. Показано, что распределение плотности тока во втором полупериоде совпадает по характеру с распределением плотности тока в первом полупериоде при меньшем ее значении. Это обуславливает необходимость учета второго полупериода в расчётной модели ускорения плазмы в микро-АИПД. Глава 3 Квазиодномерная физико-математическая модель процесса ускорения, ориентированная на многопериодный характер разряда в абляционном импульсном плазменном двигателе малой энергии

#### 3.1 Обзор существующих физико-математических моделей

Расчет импульсных плазменных двигателей позволяет выявить закономерности развития разряда, определить степень влияния различных факторов на эффективность процесса ускорения плазмы.

Строгое математическое описание течения плазмы может быть проведено с помощью кинетических уравнений Больцмана для каждой компоненты плазмы и электродинамических уравнений Максвелла. Однако в связи со значительными сложностями подобного подхода, для достаточно плотной плазмы чаще всего используется система уравнений в МГД приближении. Применительно к АИПД также используется электродинамическое приближение, в основе которого лежит упрощенный подход к двигателю, как к электромеханической системе с токовой перемычкой, ускоряемой силой Ампера. В последнем случае уравнения движения электронов и ионов в самосогласованном поле заменяются уравнением Ньютона для движения центра масс инерции сгустка, разгоняемого вдоль электродов силой Ампера. Вместо уравнений непрерывности записывается закон изменения масс центра инерции, а вместо уравнений Максвелла – уравнения Кирхгофа для электрической цепи. Несмотря на простоту модели у неё имеется важное достоинство – она отражает нестационарный характер процесса ускорения в АИПД. Таким образом, электродинамическое приближение является методом эквивалентного электрического контура, пригодным для качественной оценки параметров импульсного плазменного двигателя.

В простейшем варианте для модели, использующей электродинамическое приближение, предполагается масса сгустка постоянной, а исходная система уравнений выглядит так:

$$m \frac{d^{2}x}{dt^{2}} = \frac{1}{2}L'I^{2}$$

$$I = -C \frac{dU}{dt}$$

$$U = \frac{d}{dt}(LI)$$

$$L = L_{0} + L'x$$
(3.1)

где L, L<sub>0</sub>, и L' – полная, начальная и погонная индуктивности, соответственно.

При начальных условиях 
$$y(0)=0; \frac{dy}{d\tau}(0)=0; \varphi(0)=1; \frac{d\varphi}{d\tau}(0)=0.$$

Для расчёта ускорения плазмы в АИПД вдоль направления х эквивалентную электрическую схему для рельсотрона или коаксиального двигателя можно представить в виде, приведенном на рисунке 62.



Рисунок 62 – Принципиальная электрическая схема эквивалентной разрядной цепи АИПД

Конденсаторная батарея с ёмкостью C, изображенная на схеме, заряжается до напряжения U<sub>0</sub> от источника питания. В электродинамическом приближении плазменный сгусток заменяется эквивалентным подвижным участком цепи массой m, которая в общем случае может зависеть от времени. Индуктивность разрядного контура L =  $L_0+\Delta L$ , где  $L_0$  – начальная индуктивность, определяемая неподвижными участками цепи,  $\Delta L$  – переменная индуктивность, определяемая

подвижным участком. Под R понимают полное омическое сопротивление цепи, включающее сопротивление подводящих тоководов, конденсаторов и сопротивление плазменного сгустка. Основные закономерности электродинамического ускорения плазмы были теоретически и экспериментально исследованы еще в 1957 г. Л. А. Арцимовичем с сотрудниками [52].

Решение системы (3.1) определяется безразмерным параметром q, часто называемым параметром Арцимовича

$$q = \frac{b^2 \cdot C^2 \cdot U_o^2}{2 \cdot m \cdot L_o}$$

В работе [31] показано, что для АИПД, где разряд выполняет одновременно функцию дозирования плазмообразующего вещества и ускорения плазмы, параметр Арцимовича выражается формулой

$$q \sim \frac{b^2 \cdot C^2 \cdot U_o^2}{2 \cdot k \cdot \frac{C \cdot U_o^2}{2} L_o} = \frac{b^2}{k} \cdot \left(\frac{C}{L_o}\right), \text{ где } k - \text{ коэффициент пропорциональности,}$$

зависящий от конструкции двигателя и режима его работы.

Таким образом, электродинамический КПД АИПД в значительной степени определяется отношением емкости конденсаторной батареи к начальной индуктивности разрядной цепи (C/Lo).

Электродинамическое приближение можно считать пригодным для интегральных оценок параметров АИПД, однако оно не учитывает структуру сгустков. В АИПД сгусток плазмы, несущий в себе существенную часть тока, вылетает из канала достаточно быстро, тогда как основная масса испарившегося материала находится позади перемычки и не учитывается в данном типе физикоматематической модели. Поэтому для улучшения характеристик двигателя, необходимо добиться хорошего локально-временного согласования ввода энергии и массы в разрядный канал.

Ещё одна простейшая модель разгона плазмы в ускорительном канале, получившая название модели «снегоочистителя», была предложена Розенблютом [63]. Он предположил, что весь разрядный ток сосредоточен в идеально диамагнитном токовом слое, обладающем большой проводимостью и движущимся в направлении электромагнитной силы Ампера. Полностью ионизированная холодная плазма упруго отражается от этого слоя, который, ускоряясь, толкает перед собой плазму как поршень. Данная модель наиболее адекватно описывает процесс ускорения в импульсных плазменных двигателях на газообразном рабочем теле.

Другой метод расчёта параметров плазмы, который может быть применён в АИПД, основан на магнитогидродинамическом подходе, который позволяет рассчитать как одномерные, так и двумерные процессы. Модель, предложенная А.И. Морозовым [64], базируется на квазиодномерной (нульмерной) теории течения плазмы в узком канале под действием поперечного магнитного поля. В этом случае уравнения идеальной магнитной газодинамики сводятся к трём законам сохранения:

уравнение сохранения вещества вдоль канала

 $\rho v f = const$ ,

уравнение сохранения магнитного потока

$$\frac{B}{\mu\mu_0\rho} = const$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{v^2}{2} + i + \frac{B^2}{\mu\mu_0\rho} = U = const,$$

а также уравнение состояния

$$p = p(\rho)$$

где  $\rho$  – плотность, v – скорость, f(x) – площадь поперечного сечения канала, B – магнитная индукция,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная постоянная, i – энтальпия плазмы ( $i = \int \frac{dp}{dt}$ ), p –давление.

Наибольшее число расчётов по этой схеме выполнено в рамках одномерных моделей. Одной из первых работ такого рода был расчёт одномерного пинч-эффекта, сделанный С.И. Брагинским, И.М. Гельфандом и Р.П. Федоренко в 1958 году [65]. Расчёты в рамках двумерных уравнений магнитной газодинамики сложнее и были проведены впервые в 60-х годах К.В. Брушлинским, Н.И. Герлах, А.И. Морозовыми позднее Ю.А. Алексеевым и М.Н. Казеевым [66, 67].

Описанные выше варианты физико-математических моделей не учитывают всего комплекса явлений, особенно при формировании плазмы за счет абляции полимерного материала. Для описания процессов АИПД В быть магнитогидродинамические уравнения движения плазмы должны дополнены описанием процессов изменения электрических характеристик плазмы, степени ее ионизации, излучения энергии и ее поглощения рабочим веществом (фторопластом), а также процесса абляции и подхвата аблировавшего материала движущейся плазмой. Помимо этого ни одна из предыдущих моделей не учитывает влияния второго полупериода, который, как показали магнитозондовые измерения, рассмотренные во второй главе, вносит заметную долю вклада в ускорение плазмы в микро-АИПД.

# 3.2 Описание квазиодномерной физико-математической модели, ориентированной на многопериодный характер разряда в микро-АИПД

В НИИ ПМЭ МАИ была разработана достаточно простая квазиодномерная физико-математическая модель процесса ускорения плазмы в АИПД с емкостным накопителем энергии [68]. Рабочим веществом исследуемого АИПД является фторопласт, из которого изготовлены боковые стенки разрядного канала. Плазменный сгусток формируется за счет абляции этих боковых стенок. Данная модель достаточно подробно описана в работах [69, 70, 71].

Математическая модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений и одного интегрального уравнения, описывающих изменение во времени величин, характеризующих процессы, протекающие в АИПД:

- массы плазменного сгустка;

- положения и скорости центра масс сгустка;

 условного размера сгустка в направлении его движения, характеризующего "разлет" сгустка и его среднюю плотность;

средней температуры и, через уравнение состояния, давления плазмы в сгустке;

- тока во внешней цепи накопителя энергии;

 – распределения по длине канала аблировавшего со стенок канала рабочего вещества (интегральное уравнение).

Модель также содержит достаточно большое количество соотношений, описывающих физические процессы:

- излучения плазмы и переноса энергии излучения;

 поглощения энергии излучения фторопластовыми стенками канала и абляции вещества стенок под действием поглощенной энергии;

- ионизации плазмы и затраты энергии на ионизацию;

- разогрева плазмы за счет энергии электромагнитного поля;

 потерь энергии плазменного сгустка на разогрев аблирующего материала.

При описании движения центра масс сгустка в канале АИПД в основном под влиянием электромагнитных сил учитывается дополнительное ускорение за счет статического давления в канале АИПД. Учитывается увеличение массы ускоряемого плазменного сгустка за счет поступления аблирующей массы рабочего вещества.

Несмотря на то, что модель, в основном, описывает движение центра масс плазменного сгустка, используются двумерные пространственные модели излучения плазмы, переноса излучения и поглощения энергии стенками канала, что позволяет достаточно адекватно описать эти процессы в рамках предлагаемой упрощенной модели.

Анализ полученного уравнения "разлета" плазменного сгустка показывает, что силы статического давления способствуют расширению, а силы магнитного давления и силы, вызванные увеличением массы сгустка за счет абляции, напротив, способствуют сжатию плазменного сгустка. Эти факты согласуются с физическими представлениями о происходящих процессах и свидетельствуют о том, что модель правильно отражает происходящие процессы.

Сравнение результатов компьютерного моделирования с использованием такой модели с результатами экспериментов на лабораторном АИПД с апериодическим разрядом дало достаточно хорошее совпадение величин доступных измерению в эксперименте.

В микро-АИПД с энергией до 20 Дж имеет место колебательный разряд со значительным числом (4...6) полупериодов колебаний разрядного тока, приводящий к волнообразной генерации и ускорению плазмы. В данной работе предлагается вариант квазиодномерной физико-математической модели, который учитывает эти особенности процесса ускорения. Периодичность процесса генерации плазмымоделируется формированием нескольких плазменных сгустков, движущихся друг за другом в канале ускорения. Следует подчеркнуть, что аналогов подобного подхода, рассматривающего рабочий процесс в разрядном канале АИПД как ускорение нескольких следующих друг за другом плазменных сгустков, в литературе не обнаружено.

В предлагаемой квазиодномерной модели плазменный сгусток (ПС) с одной стороны рассматривается как материальная точка (имеет нулевую размерность), с другой стороны, ПС описывается как протяженный объект, изменяющий свою форму и характеристики. В рамках такой модели используются обыкновенные дифференциальные уравнения движения центра масс ПС и уравнения, описывающие эволюцию усредненных характеристик ПС, таких как, например, температуры.

Данная физико-математическая модель прежде всего актуальна для исследования процессов ускорения в АИПД с энергией в диапазоне до 20 Дж. Математическая модель реализована в виде компьютерной программы в системе математических вычислений MAPLE.

### 3.3 Особенности математического моделирования процессов генерации и ускорения плазмы в импульсных двигателяхс малой энергией в разряде

В квазиодномерной физико-математической модели ускорения плазменного сгустка (ПС), формируемого за счет абляции рабочего вещества, в импульсном режиме в абляционном разрядном канале двигателя [72] ПС моделировался геометрическим телом заданной конфигурации (параллелепипед, призма и т.д.), размеры которого могли изменяться в процессе ускорения. В модели описан процесс ускорения и изменения средних параметров состояния плазмы (температуры, давления, степени ионизации и т.д.) в виде достаточно простойсистемы интегродифференциальных уравнений.

Волнообразность процесса генерации плазмы моделируется несколькими последовательно возникающими плазменными сгустками, движущихся друг за другом в канале ускорения.

При численных расчетах, на данном этапе исследований, предполагается, что имеется не больше двух плазменных сгустков, которые формируются в первом и втором полупериодах разрядного тока.

Разрядный канал двигателя, изображенный на рисунке 63, сверху и снизу ограничен металлическими пластинами, играющими роль электродов, к которым подводится питающее напряжение от конденсаторного накопителя энергии. Электроды, находящиеся друг от друга на расстоянии d(x), имеют одинаковые размеры (ширину h(x), длину  $x_{3леk}$ ) и выполнены в форме, изображенной на рисунке 63. Часть боковых стенок канала закрыта фторопластовыми блоками, имеющими длину  $x_{reb}$  в направлении движения плазмы.



Рисунок 63 – Принципиальная схема разрядного канала АИПД

Процесс инициирования разряда и образования малого первичного сгустка плазмы на данном этапе исследований не рассматривается. Предполагается, что задана малая начальная масса первого сгустка. Плазменные сгустки ускоряются в канале в основном за счет электромагнитных сил, и их масса пополняется за счет абляции фторопластовых блоков в результате поглощения фторопластом энергии излучения плазмы. Алгоритм генерации новых плазменных сгустков приводится ниже.

Для простоты считается, что вся энергия излучения плазменных сгустков исходит из самого сгустка и падает на поверхности фторопластовых блоков, обращенных внутрь канала ускорения. За счет поглощения энергии блоками происходит абляция фторопласта, который поступает в канал.

Движущийся ПС, имеющий форму параллелепипеда, поглощает материал, аблировавший внутрь ПС, и «сгребает» аблировавший материал, находящийся в канале впереди ПС. Материал, поступивший в канал позади ПС, для данного ПС

теряется, но его может подобрать следующий за ним ПС. Материал, аблировавший позади последнего сгустка, теряется совсем. Его величина значительно меньше предыдущей массы испарившегося вещества, поэтому предполагается, чтопренебрежение этой частью массы не существенно для описания картины процесса.

Предложенная схема является упрощенной, но в то же время, отображает все основные процессы, происходящие в разрядном канале.

### 3.4 Основные допущения

При формировании модели приняты следующие основные допущения:

1) Плазма целиком состоит из ионизированного фторопласта. Наличием примесей (например, меди) пренебрегаем.

2) Считается, что перемешивание поступающего в движущийся плазменный сгусток фторопласта происходит мгновенно.

3) Характеристики плазмы, электромагнитного поля и других показателей в направлениях перпендикулярных направлению движения плазмы считаются постоянными. Движение плазмы происходит вдоль оси х. Это допущение означает, что рассматривается квазиодномерное течение плазмы.

 Каждый і-ый ПС имеет в направлении оси х длину δ<sub>i</sub>. Величина δ<sub>i</sub> является функцией времени. Плотность плазмы на единицу длины вдоль оси х считается постоянной внутри ПС и равной средней плотности.

5) Давление внутри каждого ПС изменяется по параболическому закону, а на переднем и заднем фронте ПС равно нулю, таким образом, отслеживается изменение лишь средних величин давления и температуры.

6) Скорость движения плазмы внутри каждого ПС изменяется по линейному закону.

7) Напряженность магнитного поля внутри каждого ПС изменяется по линейному закону.

8) Плазма находится в термодинамически равновесном состоянии.

9) Плазма квазинейтральна.

10) Используется магнитогидродинамическое приближение для описания деформации плазменного сгустка.

11) Током смещения при описании электромагнитного поля пренебрегаем.

12) Аблирующая поверхность фторопласта поглощает всю падающую на неё энергию излучения плазмы (отражения энергии не происходит).

13) Степень черноты плазмы мала и плазма излучает как объемный излучатель. При этом считается, что энергия, излучаемая ПС, пропорциональна четвертой степени температуры, как для абсолютно чёрного тела [72]. Некорректность этой части моделирования можно скорректировать за счёт изменения коэффициента излучения абсолютно чёрного тела.

14) Теплопроводностью плазмы пренебрегаем.

15) Поглощением энергии излучения плазмой пренебрегаем.

16) Кратность ионизации плазмы равна единице.

Некоторые дополнительные предположения будут сделаны ниже.

Сделанные предположения достаточно грубы, их введение диктуется стремлением получить простую физико-математическую модель для расчетов.

### 3.5 Уравнения эволюции плазменных сгустков в процессе ускорения

Плазменный сгусток в созданной модели рассматривается как протяженный объект заданной формы (параллелепипед, или усеченная пирамида), изменяющий свои размеры под действием действующих на него сил. Идея такой упрощенной конфигурации плазменного сгустка заимствована из работы [73], где такой подход был использован в существенно более простой задаче исследования процессов в коаксиальном импульсном плазменном ускорителе.

Ниже приводятся уравнения, описывающие эволюцию одного из ПС. При возникновении нового ПС, эти уравнения дублируются и далее интегрируются уравнения всех имеющихся ПС совместно. Индекс, указывающий на номер ПС в приведенных ниже уравнениях, опускается.

Движение ПС условно изображено на рисунке64.



Рисунок 64 – Схематичное изображение движения плазменного сгустка вдоль разрядного канала

Масса плазменного сгустка:

 $m_c = \rho_{cD}(x) \cdot d(x) \cdot h(x) \cdot \delta$ .

Здесь  $\rho_{cp}$  – средняя плотность плазмы в сечении  $x_c$ . Величины  $\rho_{cp}$ , d иh зависят от x, но в соответствии с предположением 4 (п.3.4) считается, что величина

$$\rho_{\rm cp}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{d}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \text{const}, \quad \mathbf{x}_{-} \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}_{+}. \tag{3.2}$$

Через  $V_c$  обозначена скорость движения центра масс ПС, а через  $x_c$  – положение центра масс в момент времени t. Масса ПС переменна

$$\frac{\mathrm{dm}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} = \Pi_{\mathrm{a}}^{\Sigma}$$

где  $\Pi_a^{\Sigma}$  – суммарный поток в единицу времени аблирующей массы, подхваченной ПС.

Уравнение изменения количества движения ПС имеет вид

$$\frac{d}{dt} \int_{x_{-}}^{x_{+}} \rho_{cp}(t, x) \cdot d(x) \cdot h(x) \cdot V(t, x) dx = \sum_{s} F^{s}$$
(3.3)

Здесь  $\sum_{s} F^{s}$  – сумма всех сил действующих вдоль оси х на объем  $d_{c} \cdot h_{c} \cdot \delta$ плазменного сгустка,  $h_{c} = h(x_{c})$ ,  $d_{c} = d(x_{c})$ ,  $x_{c} = \frac{1}{2}(x_{+} + x_{-})$  – координата центра масс

ПС.

Преобразуя левую часть уравнения (3.3), получим

$$\frac{d}{dt} \int_{x_{-}}^{x_{+}} \rho_{cp} \cdot d \cdot h \cdot V \, dx = \frac{d}{dt} \left[ V_{c}(t) \int_{x_{-}}^{x_{+}} \rho_{cp} \cdot d \cdot h \, dx \right] = \frac{d}{dt} \left[ V_{c}(t) \cdot m_{c}(t) \right] =$$
$$= m_{c} \frac{dV_{c}}{dt} + V_{c} \frac{dm_{c}}{dt} = m_{c} \frac{dV_{c}}{dt} + V_{c} \cdot \Pi_{a}^{\Sigma} \qquad (3.4)$$

На ПС действуют силы: статического давления, магнитного давления и сила трения плазмы о стенки канала. Рассмотрим последовательно эти силы.

Сила статического давления:

$$F_{p} = -\int_{x_{-}}^{x_{+}} d \cdot h \frac{\partial p}{\partial x} dx = -d \cdot h \cdot p\Big|_{x_{-}}^{x_{+}} + h \frac{dd}{dx} \int_{x_{-}}^{x_{+}} p(t,x) dx + d \frac{dh}{dx} \int_{x_{-}}^{x_{+}} p(t,x) dx . (3.5)$$

Первое слагаемое в (3.5) равно нулю в силу предположения 5 (п.3.4), в соответствии с которым

 $p(t, x_{-}) = p(t, x_{+}) = 0.$ 

И так как мы сделали предположение, что давление в пределах сгустка изменяется параболически (предположение 5), то  $\int_{x_{-}}^{x_{+}} p(t,x) dx = \frac{2}{3} p_c \delta$ , где  $p_c$ -давление в центре ПС.

В этом случае сила статического давления:

$$F_{p} = \frac{2}{3} p_{c} \delta \cdot \left(h_{c} d_{x} + d_{c} h_{x}\right), \qquad (3.6)$$

где  $d_x = \frac{dd}{dx} = \text{const}$ ,  $h_x = \frac{dh}{dx} = \text{const}$ и заданы в виде $h_x = 2 \cdot tg\beta$ , где  $\beta$  –

половина угла сужения электродов,  $d_x = 2 \cdot tg\gamma$ , .где  $\gamma$  – половина угла раствора электродов.

Сила магнитного давления на ПС определяется равенством

$$\mathbf{F}_{_{\mathrm{H}}} = \boldsymbol{\mu}_{0} \cdot \mathbf{h}_{c} \cdot \mathbf{d}_{c} \cdot \int_{\mathbf{x}_{-}}^{\mathbf{x}_{+}} \mathbf{j} \cdot \mathbf{H} \, d\mathbf{x} \, ,$$

где j – плотность тока в плазме, а  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

В соответствии с допущением 7 (п.3.4) изменение величины Н линейно внутри ПС:  $H(x_+)=0$ ,  $H(x_-)=H_-$ , H(x)=0 при  $x > x_+$  и  $H(x)=H_-$ =const при  $x < x_-$ . На рисунке 65 показано изменение напряженности магнитного поля Н внутри ПС.


Рисунок 65 – Изменение напряженности магнитного поля внутри ПС вдоль разрядного канала

Если принять плотность тока постоянной по длине сгустка, то

$$j = -\frac{\partial H}{\partial x} = \text{const}.$$

И тогда:

$$F_{H} = -\mu_{0} \cdot h_{c} \cdot d_{c} \cdot \int_{x_{-}}^{x_{+}} H \frac{\partial H}{\partial x} dx = \frac{1}{2} \mu_{0} \cdot h_{c} \cdot d_{c} \cdot H^{2}_{-}$$

$$H_{-} = j \cdot \delta$$
.

Тогда суммарный ток в цепи  $j_{\Sigma} = h_c \cdot \delta \cdot j$ , поэтому

$$H_{-} = \frac{1}{h_c} j_{\Sigma}.$$

В результате

$$F_{_{\rm H}} = \frac{\mu_0 \cdot d_{_{\rm C}}}{2h_{_{\rm C}}} j_{_{\Sigma}}^2 = \frac{1}{2} L' \cdot j_{_{\Sigma}}^2, \qquad (3.7)$$

где  $h_0$  – начальная ширина электродов, а  $L' = \mu_0 \frac{d}{h}$  – идеальная погонная индуктивность двухпроводной линии образованной тонкими шинами ширины h, расположенными на расстоянии d друг от друга.

Сила трения плазмы о стенки канала <sub>F<sub>rp</sub></sub> учитывается в виде зависимости [74]

$$F_{\rm rp} = -k_{\rm rp} \cdot V_{\rm c}^2 \,. \tag{3.8}$$

С использованием формул (3.4), (3.6) и (3.8) уравнение (3.3) запишется в виде:

$$m_{c} \frac{dV_{c}}{dt} = -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{c} + \frac{2}{3} p_{c} \delta \cdot (h_{c} d_{x} + d_{c} h_{x}) + \frac{1}{2} L' \cdot j_{\Sigma}^{2} - k_{\tau p} \cdot V_{c}^{2} . \qquad (3.9)$$

Таким образом, уравнения движения центра масс плазменного сгустка и изменения массы ПС имеют вид

$$\frac{\mathrm{dm}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} = \Pi_{\mathrm{a}}^{\Sigma} \,, \tag{3.10}$$

$$\frac{\mathrm{dx}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{V}_{\mathrm{c}}\,,\tag{3.11}$$

$$\frac{dV_{c}}{dt} = \frac{1}{m_{c}} \left[ -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{c} + \frac{2}{3} p_{c} \delta \cdot \left( h_{c} d_{x} + d_{c} h_{x} \right) + \frac{1}{2} L' \cdot j_{\Sigma}^{2} - k_{\tau p} \cdot V_{c}^{2} \right]$$
(3.12)

## 3.6 Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка

Вследствие изменения размеров плазменного сгустка по длине канала необходимо ввести уравнения его деформации.

Введем обозначения (рисунок 64)

$$x_{+} = x_{c} + \delta/2, \quad V_{+} = V_{c} + \delta'/2,$$
 (3.13)  
 $x_{-} = x_{c} - \delta/2, \quad V_{-} = V_{c} - \delta'/2,$ 

где  $\delta(t)$  – протяженность ПС вдоль оси х.

В соответствии с предположением 6 (п.3.4) скорость V внутри ПС линейно зависит от х. Тогда можно записать:

$$V = V_c + \frac{\delta'}{\delta} (x - x_c) . \qquad (3.14)$$

Из уравнения сохранения импульса можно записать одномерное магнитогидродинамическое уравнение движения ПС, вывод которого приводится в [63]

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x}\right) = -\frac{\prod_{a}}{h} V - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{0} \cdot j \cdot H - \frac{k_{rp} \cdot V^{2}}{d \cdot h \cdot \delta}$$
(3.15)

где П<sub>а</sub> – поток аблирующей массы, подхваченной ПС, отнесенный к единице поверхности плоскости х0у в единицу времени.

Учитывая (3.2), предположим также, что  $\Pi_a \cong \frac{\Pi_a^{\Sigma}}{d \cdot \delta}$  и  $j \cdot h(x) \cdot \delta \cong j \cdot h_c \cdot \delta = j_{\Sigma}$ .

Тогда, умножая левую и правую части уравнения (3.15) на d·h·\delta, получим

$$m_{c} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x}\right) = -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V - d \cdot \delta \cdot h \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{0} \cdot d \cdot j_{\Sigma} \cdot H - k_{TP} \cdot V^{2}.$$
(3.16)

Детализируем составляющие уравнения (3.16). В силу (3.13), (3.14)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{dV}{dt} = \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{\delta} \delta''(x - x_c),$$

$$\Pi_a^{\Sigma} \mathbf{V} = \Pi_a^{\Sigma} \mathbf{V}_c + \Pi_a^{\Sigma} \frac{\delta'}{\delta} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c) \,.$$

Учитывая, что

$$\mathbf{H} = -\mathbf{j} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{+}) = -\frac{1}{\mathbf{h}_{c} \cdot \delta} \mathbf{j}_{\Sigma} \cdot \left[ (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) - \frac{\delta}{2} \right],$$

третье слагаемое правой части из уравнения (3.16) будет выглядеть так:

$$\mu_0 \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{j}_{\Sigma} \cdot \mathbf{H} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{h}_c} \cdot \mathbf{j}_{\Sigma}^2 - \mu_0 \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{h}_c \cdot \delta} \cdot \mathbf{j}_{\Sigma}^2 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c).$$

Рассмотрим второе слагаемое уравнения (3.16). Исходя из предположения 5 (п.3.4), положим приближенно:

$$\mathbf{d} \cdot \mathbf{h} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} \cong (\mathbf{a}_{\mathbf{p}} + \frac{1}{\delta^2} \mathbf{b}_{\mathbf{p}} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\mathbf{c}}))$$
,где  $\mathbf{a}_{\mathbf{p}}, \mathbf{b}_{\mathbf{p}} > 0$  – постоянные.

Тогда,

$$F_{p} = -\int_{x_{-}}^{x_{+}} d \cdot h \cdot \frac{\partial p}{\partial x} dx \cong -\int_{x_{-}}^{x_{+}} (a_{p} + \frac{1}{\delta^{2}}b_{p} \cdot (x - x_{c})) dx = -a_{p}\delta$$

откуда

$$a_{p} = -\frac{1}{\delta} F_{p};$$
  
$$a_{p} = -\frac{1}{\delta} \cdot \frac{2}{3} p_{c} \delta \cdot (h_{c} d_{x} + d_{c} h_{x}).$$

С другой стороны можно записать (предположение 5 п.3.4):

$$p = p_c \cdot (1 - \frac{4}{\delta^2} (x - x_c)^2).$$
(3.17)

Тогда выполняются граничные условия  $p(x_{-}) = p(x_{+}) = 0$ , а  $\frac{\partial p}{\partial x}$  имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{8}{\delta^2} \cdot \mathbf{p}_c \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c) \,. \tag{3.18}$$

Используя это равенство и полагая  $h(x) \cong h_c d(x) \cong d_c$  внутри ПС, можно получить связь между  $b_p u p_c$ ,

 $\mathbf{b}_{\mathrm{p}} = -8 \cdot \mathbf{d}_{\mathrm{c}} \cdot \mathbf{h}_{\mathrm{c}} \cdot \mathbf{p}_{\mathrm{c}} \,.$ 

Итак, второе слагаемое в правой части уравнения (3.16) примет вид:

$$-d \cdot \delta \cdot h \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2}{3} p_c \delta \cdot (h_c d_x + d_c h_x) + \frac{b_p}{\delta} (x - x_c).$$
(3.19)

Четвёртое слагаемое уравнения (3.16) - сила трения, которую в линейном приближении можно записать следующим образом:

$$F_{\rm rp} = -k_{\rm rp} \cdot V^2 \approx -k_{\rm rp} \cdot V_{\rm c}^2 - 2 \cdot k_{\rm rp} \cdot V_{\rm c} \cdot \frac{\delta'}{\delta} \cdot (x - x_{\rm c}).$$

Собирая все элементы уравнения (3.16) и учитывая уравнение движения центра масс ПС (3.12), получим равенство:

$$\begin{split} \mathbf{m}_{c} \frac{1}{\delta} \delta'' \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) &= -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot \frac{\delta'}{\delta} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) + \frac{1}{\delta} \mathbf{b}_{p} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) - \\ &- \mu_{0} \frac{d}{\mathbf{h}_{c} \cdot \delta} \mathbf{j}_{\Sigma}^{2} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) - 2 \cdot \mathbf{k}_{\mathrm{T}p} \cdot \mathbf{V}_{c} \cdot \frac{\delta'}{\delta} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{c}) \ , \end{split}$$

из которого вытекает уравнение, описывающее процесс деформации ПС:

$$\mathbf{m}_{c} \cdot \delta'' = -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot \delta' + \mathbf{b}_{p} - \mu_{0} \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{h}_{c}} \mathbf{j}_{\Sigma}^{2} - 2 \cdot \mathbf{k}_{\tau p} \cdot \mathbf{V}_{c} \cdot \delta' .$$
(3.20)

 $\frac{d\delta}{dt} = V_{\delta}$ , где  $V_{\delta}$  - скорость деформации ПС, то уравнение деформации плазменного сгустка (3.20) можно записать в виде:

$$m_{c} \cdot \frac{dV_{\delta}}{dt} = -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{\delta} + b_{p} - L' \cdot j_{\Sigma}^{2} - 2 \cdot k_{rp} \cdot V_{c} \cdot V_{\delta}, \qquad (3.21)$$

где L' - введенная ранее погонная индуктивность.

## 3.7 Уравнение состояния и температура плазмы

Стандартное уравнение состояния имеет вид

$$p = \frac{k \cdot (1+\xi)}{m_a} \cdot \rho_{cp} \cdot T, \qquad (3.22)$$

где k – постоянная Больцмана, m<sub>a</sub> - средняя атомная масса, практически совпадающая с массой иона m<sub>i</sub>, T – температура плазмы, ρ<sub>ср</sub> – средняя плотность сгустка, ξ – степень ионизации плазмы.

Так как по предположению 5 (п.3.4) давление р имеет параболическую зависимость от x, а  $\rho \cong \rho_{cp} = \text{const}$  (в пределах сгустка в момент времени t), то и температура плазмы будет иметь тот же параболический характер зависимости внутри сгустка, что и р. Поэтому

$$T = T_{c} \cdot (1 - \frac{4}{\delta^{2}} (x - x_{c})^{2}).$$
(3.23)

Величины Т<sub>с</sub> и р<sub>с</sub> связаны в силу (3.22) соотношением

$$p_{c} = \frac{k \cdot (1+\xi)}{m_{a}} \rho_{cp} \cdot T_{c}.$$
(3.24)

Величина Т<sub>с</sub> представляет собой температуру в центре ПС.

Для упрощения модели будем отслеживать эволюцию лишь средней температуры плазмы. Усредняя параболическую зависимость (3.23), видно, что

$$T_{\rm cp} = \frac{2}{3} T_{\rm c} \,. \tag{3.25}$$

Максимальное давление в ПС в каждый момент времени вычисляется из уравнения состоянии газа по формуле

$$\mathbf{p}_{c} = \mathbf{k} \cdot \left(1 + \xi\right) \cdot \frac{\mathbf{m}_{c}}{\mathbf{m}_{a}} \cdot \frac{1}{\mathbf{d}_{c} \cdot \mathbf{h}_{c} \cdot \delta} \cdot \mathbf{T}_{c} \,.$$

С учетом потерь на ионизацию плазмы можно записать уравнение сохранения энергии в одномерной модели [75]

$$c_{v} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x}v\right) = \frac{1}{\sigma} \cdot j^{2} + \frac{1}{2}\frac{\Pi_{a}}{h}V^{2} - p\frac{\partial v}{\partial x} - c_{v}\frac{\Pi_{a}}{h}(T - T_{a\delta}) - q_{uoH} - q_{u3} + q_{nor} + q_{rp} \qquad (3.26)$$

Здесь с<sub>v</sub> – коэффициент теплоемкости плазмы при постоянном объеме, q<sub>из</sub> – потери энергии на излучение плазмы, q<sub>ион</sub> – потери энергии на ионизацию плазмы, q<sub>пог</sub> – энергия излучения, поглощаемая плазмой, q<sub>тр</sub> – выделение энергии за счет трения плазмы о стенки канала,  $T_{a6}$  – температура абляции.

В уравнении (3.26) не учитывается теплопроводность плазмы, которая считается малой (предположение 14 п.3.4). Будем также пренебрегать поглощением плазмой энергии излучения (предположение 15 п.3.4) и полагать q<sub>пог</sub> = 0.

Член с<sub>v</sub> · П<sub>a</sub> · (T – T<sub>aб</sub>)/h в уравнении (3.26) представляет собой энергию плазмы идущую на нагрев до температуры Т аблировавшей и поступившей в ПС массы, имевшей температуру T<sub>a6</sub>. Величина  $j^2/\sigma$  – отражает омический нагрев плазмы протекающим током. Слагаемое  $\frac{1}{2} \frac{\Pi_a}{h} v^2$  учитывает затраты энергии на ускорение поступающей аблировавшей массы в движущийся ПС до скорости ПС.

Выделение энергии за счет трения плазмы о стенки канала

$$q_{\rm TP} = k_{\rm TP} \cdot V_{\rm c}^3.$$

Как уже говорилось выше, будем прослеживать эволюцию во времени средней температуры  $T_{cp}$  плазменного сгустка. Но, так как  $T_{cp}$  и  $T_c$  связаны зависимостью (3.25), вместо  $T_{cp}$  будем использовать величину  $T_c$ . Умножая левую и правую части уравнения (3.26) на d·h· $\delta$ , учитывая равенство (3.24) и то, что внутри ПС  $\rho \cong \rho_{cp}$ , а также обозначение  $V_{\delta} = \delta'$ , получим следующее уравнение, описывающее изменение во времени температуры  $T_c$ :

$$\frac{dT_{c}}{dt} = \frac{1}{c_{v} \cdot m_{c}} \left[ R_{c} \cdot j_{\Sigma}^{2} + \frac{1}{2} \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{c}^{2} - \frac{k \cdot (1+\xi) \cdot m_{c} \cdot V_{\delta}}{m_{a} \cdot \delta} T_{c} - \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot (T_{cp} - T_{a6}) - q_{\mu_{0H}}^{c} - q_{\mu_{3}}^{c} + k_{\tau p} \cdot V_{c}^{3} \right]$$
(3.27)

Здесь  $q_{uoh}^c = q_{uoh} \cdot d_c \cdot h_c \cdot \delta$ ,  $q_{u_3}^c = q_{u_3} \cdot d_c \cdot h_c \cdot \delta$  - энергия ионизации и энергия излучения всего ПС, соответственно;  $R_c = \frac{d_c}{h_c \cdot \delta \cdot \sigma}$  – электрическое сопротивление плазмы.

Затраты энергии на ионизацию вычисляются по формуле

$$q_{\mu_{OH}}^{c} = \alpha \cdot J \cdot \frac{dN_{i}^{\Sigma}}{dt}, \qquad (3.28)$$

где  $\alpha \cong 2$  экспериментально установленный коэффициент [75], J – энергия ионизации атома, а  $N_i^{\Sigma} = N_i \cdot d_c \cdot h_c \cdot \delta$  – суммарное количество ионов в ПС.

Для дальнейшей конкретизации уравнения (3.27) нужно проанализировать процессы излучения плазмы и поглощения энергии излучения рабочим телом.

Считается, что плазма является квазинейтральной и термодинамически равновесной. В связи с этим для описания процесса ионизации используется модель Caxa [76],

$$\frac{N_i \cdot N_e}{N_a} = C_{caxa} \cdot T^{3/2} \cdot e^{-J/T}$$
(3.29)

Здесь Т – температура плазмы, J – энергия ионизации атома, N<sub>i</sub>, N<sub>e</sub>, N<sub>a</sub> – концентрации ионов, электронов и атомов вплазме, C<sub>caxa</sub> – постоянный коэффициент. Кратность ионизации плазмы предполагается равной 1.

В квазинейтральной плазме

$$N_e = N_i , \qquad (3.30)$$

Кроме того

$$N_i + N_a = \rho / m_a.$$
 (3.31)

Здесь р – плотность плазмы.

Из соотношений (3.29) – (3.31) определяются величины N<sub>i</sub>, N<sub>e</sub>, N<sub>a</sub>,

$$N_{e} = N_{i} = \frac{1}{2} \Gamma \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \rho_{cp}}{m_{a} \cdot \Gamma}} - 1 \right),$$

$$N_{a} = \frac{\rho_{cp}}{m_{a}} - N_{i},$$
(3.32)

где

$$\Gamma = C_{\text{caxa}} T^{3/2} e^{-\frac{J}{T}},$$

$$\rho_{\text{cp}} = \frac{m_{\text{c}}}{d_{\text{c}} \cdot h_{\text{c}} \cdot \delta}.$$
(3.33)

Возвращаясь к уравнению (3.28), теперь можно определить  $dN_i^{\Sigma/dt}$  с помощью формул (3.29), (3.32), (3.33) и равенства  $T_{cp} = 2/3 T_{c.}$  Тогда выражение для величины  $q_{\mu o \mu}^c$  примет вид

$$q_{\mu_{0H}}^{c} = \xi^{1} \cdot \frac{dT_{c}}{dt} \cdot m_{c} + q_{a\mu}^{c}, \qquad (3.34)$$

где

$$\begin{split} \xi^{1} &= \frac{3}{2} \cdot \xi \cdot \frac{N_{a} \cdot J}{(2 \cdot N_{a} + N_{i}) \cdot m_{a} \cdot T_{c}} \cdot \left(1 + \frac{J}{T_{c}}\right) \cdot \alpha, \\ q_{a\mu}^{c} &= \frac{N_{i} \cdot J \cdot \alpha}{(2 \cdot N_{a} + N_{i})} \cdot \left[\frac{\Pi_{a}^{\Sigma}}{m_{a}} + N_{a} \cdot d_{c} \cdot h_{c} \cdot \delta \cdot \left(\frac{V_{\delta}}{\delta} + \frac{h_{x}}{h_{c}} \cdot V_{c}\right)\right], \quad (3.35) \\ a &= \frac{N_{i}}{N_{i} + N_{a}} - \text{степень ионизации плазмы.} \end{split}$$

Так как в правую часть равенства (3.34) входит  ${}^{dT_c/dt}$ , то изменение степени ионизации влияет не только на правую часть уравнения (3.26), но и на левую в виде добавки к величине теплоемкости с<sub>v</sub>. В этом случае уравнение (3.27) будет таким:

$$\frac{dT_{c}}{dt} = \frac{1}{(c_{v} + \xi^{1}) \cdot m_{c}} \left[ R_{c} \cdot j_{\Sigma}^{2} + \frac{1}{2} \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{c}^{2} - \frac{k \cdot (1 + \xi) \cdot m_{c} \cdot V_{\delta}}{m_{a} \cdot \delta} T_{c} - \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot (T_{cp} - T_{a\delta}) - q_{a\mu}^{c} - q_{\mu_{3}}^{c} + k_{\tau p} \cdot V_{c}^{3} \right]$$
(3.36)

В соответствии с предположениями 8, 9, 13, 15 (п.3.4) плазма представляет собой однокомпонентный проводящий квазинейтральный газ, находящийся в каждый момент времени в термодинамически равновесном состоянии. Плазма считается оптически тонкой, степень её черноты мала. В связи с этим она излучает как объемный излучатель и поглощением излучаемой энергии плазмой можно пренебречь.

Приемлемая простая модель излучения предложена в работе [72], в которой энергия излучения выражена формулой:

$$q_{\mu_3}^0 = \frac{4 \cdot \sigma_{b1} \cdot T^4}{\lambda}, \qquad (3.37)$$

где λ- длина свободного пробега фотона, σ<sub>bl</sub>- постоянная Стефана-Больцмана.

$$\lambda \!=\! \frac{1}{\sqrt{2}N\sigma},$$
где N – сумма концентраций ионов и атомов

Запишем формулу для энергии излучения в следующем виде

$$q_{\rm \scriptscriptstyle H3}^0 = 4\sigma_{bl}\cdot N\cdot T^4\cdot \alpha_{\rm \scriptscriptstyle H3}\,,$$

где  $\alpha_{u_3}$ - коэффициент пропорциональности, который по оценкам прозрачности принимает значения  $10^{-20}$  -  $2 \cdot 10^{-20}$ . Конкретное значение  $\alpha_{u_3}$  подбирается экспериментально из сравнения результатов моделирования с экспериментом [72].

Так как  $N = \rho_{cp} / m_a$ , а  $q_{u_3}^c - излучение всего ПС, то, используя (3.33) получим$ 

$$q_{\mu_3}^c = 4\sigma_{bl} \cdot \alpha_{\mu_3} \cdot \frac{m_c}{m_a} \cdot T_{cp}^4 \quad , \tag{3.38}$$

Для вычисления проводимости плазмы  $\sigma$  и связанной с ней величины сопротивления плазмы, входящей в уравнение (3.36)

$$R_{c} = \frac{d_{c}}{h_{c} \cdot \delta \cdot \sigma}$$
(3.39)

используется простая формула Спитцера [72]

$$\sigma = k_{\sigma} \frac{T^{3/2}}{\Lambda}$$

где k<sub>σ</sub> = const, а Λ - кулоновский логарифм,

$$\Lambda = \ln \left( \frac{k_{\Lambda} \cdot T^{3/2}}{\sqrt{N_e}} \right),$$

 $k_{\Lambda} = const$ 

Предполагается, что проводимость плазмы сохраняется некоторое время после вылета ПС из канала  $x_c > x_{элек}$ , но сопротивление  $R_c$  значительно возрастает. Для учета этого в формуле (3.39) вместо величины  $d_c$  (расстояние между электродами) использовалась величина  $d_{kop}$  – длина дуги, соединяющая электроды с вынесенным центром, текущая координата которого по-прежнему  $x_c$ , но находящаяся уже за срезом канала (рисунок 66).



Рисунок 66 – Иллюстрация для вычисления d<sub>кор</sub>

Величина d<sub>кор</sub> в этом случае будет иметь значения:

$$d_{kop} = \begin{cases} d, & x_{c} \leq x_{ynek} \\ \sqrt{d^{2} + (2k_{R} \cdot (x_{c} - x_{ynek}))^{2}}, & x_{c} > x_{ynek} \end{cases},$$

где параметр k<sub>R</sub>>0 подбирался эмпирически в процессе математического моделирования.

Таким образом, мы определили все слагаемые в уравнении (3.36).

## 3.8 Формирование плазменных сгустков

#### 3.8.1 Поглощение излучения стенками канала и абляция

Использовалась следующая схема поглощения излучения стенками канала, абляции и аккумуляции аблировавшей массы плазменным сгустком.

В первом приближении предполагалось, что всё излучение плазмы, определяемое равенством (3.38), исходит из геометрического центра (центра масс) плазменного сгустка равномерно во всех направлениях, так что энергия излучения в единицу времени на 1 стерадиан определяется равенством

$$\eta_{\mu_3} = \frac{1}{4\pi} q^c_{\mu_3}. \tag{3.40}$$

Несмотря на то, что модель квазиодномерна, при рассмотрении процесса поглощения излучения учитывается пространственная конфигурация канала.

В силу предположения 15 (п. 3.4) поглощением излучаемой энергии плазмой пренебрегаем. Часть излучения, падающая на поверхности тефлоновых шашек, обращенные внутрь канала, поглощается полностью и инициирует процесс абляции тефлона. Количество аблировавшей массы пропорционально тефлона плотности падающей на поверхность энергии излучения. Предполагается, что аблировавшая масса остается вблизи точки абляции (имеет скорость). Движущийся плазменный сгусток нулевую подхватывает аблировавшую массу. Считается, что скорости имевшейся в ПС и вновы поступившей массы мгновенно усредняются. Масса аблировавшая позади ПС не участвует в процессе ускорения (теряется).

Предложенная схема является упрощенной, но отражает все основные механизмы формирования плазменного сгустка.

Телесный угол, под которым "видны" из центра ПС элементы рабочих поверхностей одного тефлонового блока, расположенного в слое между двумя перпендикулярными оси х плоскостями, проходящими через точки х и х + dx (рисунок 67), приближенно может быть вычислен по формуле:

$$d\theta = d\frac{\cos\alpha}{r^2} \cdot dx = \frac{d \cdot h_c}{2 \cdot r^3} dx$$
(3.41)

Где r – радиус-вектор из центра ПС до участка шашки рабочего тела dx; а угола α - угол между радиус-вектором r и нормалью к поверхности шашки (рисунок 67).



Рисунок 67 – Иллюстрация для вычисления телесного угла площадки dx из центра плазменного сгустка

При получении зависимости (3.41) не учитывается наклон луча относительно координатной плоскости xz. Это оправдано тем, что в действительности источник излучения не сосредоточен в центре ПС, а распределен вдоль оси у.

Используя (3.41), поток энергии, поглощаемой двумя тефлоновыми блоками, приходящийся на единицу длины оси х будет

$$W_a(t, x) = \eta_{\mu_3} \cdot \Omega(t, x),$$

где

$$\Omega(t,x) = \frac{d \cdot h_c}{r^3} = \frac{d \cdot h_c}{\left[(x - x_c)^2 + \frac{1}{4}(h_c + h_x(x - x_c))^2\right]^{3/2}},$$

а пиз задается равенством (3.40).

Интегральная энергия, поглощенная тефлоновыми блоками к моменту t, приходящаяся на единицу длины канала, определится выражением

$$Q(t,x) = \int_0^t W_a(\tau,x) d\tau$$
, где  $x \in [0, x_{\tau e \phi}]$ .

Соответственно, аблировавшая к моменту t масса, приходящаяся на единицу длины канала будет

$$M_{a}(t,x) = c_{a} \cdot Q(t,x),$$
 (3.42)

где c<sub>a</sub> – коэффициент абляции, который предполагается постоянным.

Процесс формирования плазменного сгустка задается следующими соотношениями.

Масса  $M_a^1$ , аблировавшая в единицу времени внутри ПС определяется равенством

$$M_a^1(t) = c_a \cdot \eta_{\rm H3} \cdot \Omega_1(t) \quad , \tag{3.43}$$

где

$$\Omega_{1}(t) = 8 \frac{d_{c}}{h_{c}} \frac{\delta_{z}}{\sqrt{\delta_{z}^{2} + h_{c}^{2}}} ,$$

$$\delta_{z} = \begin{cases} \delta_{z}, & x_{c} + \frac{\delta}{2} < x_{re\phi} \\ 0, & x_{c} - \frac{\delta}{2} > x_{re\phi} \\ x_{re\phi} - x_{c} + \frac{\delta}{2} , & x_{c} - \frac{\delta}{2} \le x_{re\phi} \le x_{c} + \frac{\delta}{2} \end{cases}$$

Подхватываемая плазменным сгустком в единицу времени масса

$$M_a^2(t) = M_a^z\left(t, x_c + \frac{\delta}{2}\right) \cdot \left(V_c + \frac{1}{2}V_\delta\right) , \qquad (3.44)$$

где

$$M_{a}^{z} = \begin{cases} M_{a} , & x_{c} + \frac{\delta}{2} < x_{re\phi} , \\ 0 , & x_{c} + \frac{\delta}{2} \ge x_{re\phi} . \end{cases}$$

Суммарная масса, поступающая в ПС в единицу времени будет  $\Pi_a^{\Sigma} = M_a^1 + M_a^2$  . (3.45)

#### 3.8.2 Алгоритм генерации плазменных сгустков

Первый ПС формируется в момент t=0 начала процесса. Задается малая начальная масса ПС m<sub>c</sub>(0) и малая начальная плотность  $\rho_{cp}$  (0). По этим величинам при известных d и h подсчитывается начальная длина ПС  $\delta(0)$ . Задаются также малые величины скорости центра масс ПС V<sub>c</sub>(0), скорости деформации сгустка V<sub> $\delta$ </sub>(0), температуры T<sub>c</sub>(0), тока в цепи j<sub> $\Sigma$ </sub>(0). Считается, что при t=0 сгусток примыкает к левой границе канала ускорения (x=0).

Следующий ПС формируется в момент  $t=t_2$ , когда ток в цепи  $j_{\Sigma}(t_2)=0$ . Подсчитывается масса аблировавшего материала, потерянного первым ПС, и распределенного по длине канала. Начальная масса второго сгустка равна этой потерянной массе. Считается, что внутри ПС масса распределена равномерно.

Как и для первого ПС задаются малые начальные значения  $Vc(t_2)$ ,  $V\delta(t_2)$ ,  $j_2(t_2)$ ,  $(j_2 - ток во втором ПС)$ .

Далее выполняется совместное интегрирование уравнений эволюции первого и второго ПС.

3.9 Уравнения электрической цепи, магнитное поле и токи в плазменных сгустках

В связи с тем, что плазменные сгустки взаимодействуют между собой посредством системы токов в них, токов в цепи накопителя энергии и магнитного поля, здесь приводятся уравнения для системы токов для случая произвольного количества сгустков N.

На рисунке 68 для N=2 показана схема расположения сгустков вдоль оси х канала ускорения и обозначены параметры, характеризующие электрические процессы в системе ПС.

На этом рисунке  $j^e = H^* = H \cdot h - ток$ , текущий по электродам,  $j^* = j \cdot h$ , где j - ток в сгустке;  $U^+ U^-$  - электрическое напряжение между электродами в соответствующей точке оси х.



Рисунок 68 – Схема расположения сгустков вдоль оси х канала ускорения.

Напряженность E=U/d, где d – расстояние между электродами. На участках между сгустками (для первого сгустка, между его левым краем и точкой x=0),  $x \in [x_i^-; x_i^+], \quad x_i^- = x_{c_{i+1}} + \frac{1}{2}\delta_{i+1}, \quad x_i^+ = x_{c_i} - \frac{1}{2}\delta_i$  (i изменяется от 1 до N) и  $x_{c_{N+1}} = \delta_{N+1} = 0$ , падение напряжения на электродах определяется индуктивностью канала ускорения. Поэтому можно записать уравнение:

$$\Delta L_{i}^{1} \frac{dj_{i}^{e}}{dt} = U_{i+1}^{+} - U_{i}^{-} , \qquad (3.46)$$

где і изменяется от 1 до N, где  $\Delta L_i^1 = L'(x_i^+ - x_i^-)$ .

При этом ток  $j_i^e$  не зависит от x на интервале  $[x_i^-; x_i^+]$ , а зависит лишь от времени t.

На участке электродов, где расположен сгусток, падение напряжения на электродах также определяется индуктивностью канала, но здесь происходит вытекание тока в плазменный сгусток, в результате ток j<sup>е</sup> линейно зависит от х.

$$j^{e}(t,x) = j^{e}_{i}(t) - \frac{1}{\delta_{i}(t)}(j^{e}_{i}(t) - j^{e}_{i-1}(t))(x - x^{-}_{i})$$
(3.47)

на интервале  $[x_i^-;x_i^+]$ , где  $x_i^- = x_{c_i} - \frac{1}{2}\delta_i$ ,  $x_i^+ = x_{c_i} + \frac{1}{2}\delta_i$ , i от 1 до N, при

этом  $j_o^l(t) \equiv 0$ .

В этом случае падение напряжения на электродах:

$$U_{i}^{-} - U_{i}^{+} = L' \int_{x_{i}^{-}}^{x_{i}^{+}} \frac{\partial}{\partial t} j^{e}(t, x) dx$$
(3.48)

Выполнив процедуру интегрирования, получим следующее уравнение для падения напряжения

$$L'\left[\frac{1}{2}\delta_{i}\left(\frac{dj_{i}^{e}}{dt} + \frac{dj_{i-1}^{e}}{dt}\right) + (j_{i}^{e} - j_{i-1}^{e})V_{c_{i}}\right] = U_{i}^{-} - U_{i}^{+}$$
(3.49)

где і изменяется от 1 до N,  $j_o^e \equiv 0$ 

Теперь применим закон Ома к току внутри ПС.

При 
$$x \in [x_i^-; x_i^+]$$
, где  $x_i^- = x_{c_i} - \frac{1}{2}\delta_i$ ,  $x_i^+ = x_{c_i} + \frac{1}{2}\delta_i$  имеет место закон Ома  
 $\frac{U}{d} = \frac{1}{\sigma_i} j_i + \mu_o VH$ , (3.50)

где U – напряжение на электродах, σ – проводимость плазмы, j- плотность тока в плазме, H – напряженность магнитного поля, V- скорость движения плазмы.

В рамках предлагаемой модели считается, что внутри i-го ПС ток  $j_i$  и проводимость  $\sigma_i$  не зависят от x, а переменные U, V, H изменяются линейно.

В связи с приближенностью таких предположений закон Ома используется в интегральной форме

$$\int_{x_{i}^{-}}^{x_{i}^{+}} \frac{U}{d} dx = \int_{x_{i}^{-}}^{x_{i}^{+}} \left( \frac{1}{\sigma_{i}} j_{i} + \mu_{o} V H \right) dx$$
(3.51)

Отсюда, учитывая соотношения

$$j_i h = j_i^*, \ j_i^e - j_{i-1}^e = j_i^* \delta_i, \ H = \frac{j^e}{h}$$
 и обозначение  $R_i = \frac{d_i^{\text{kop}}}{h\sigma_i \delta_i}$  для

активного сопротивления і- го ПС получаем уравнение

$$\frac{1}{2}(U_{i}^{+}+U_{i}^{-}) = R_{i}(j_{i}^{e}-j_{i-1}^{e}) + \frac{1}{2}L' \left[V_{c_{i}}(j_{i}^{e}+j_{i-1}^{e}) - \frac{1}{\sigma}V_{\sigma_{i}}(j_{i}^{e}-j_{i-1}^{e})\right], \quad (3.52)$$

где і изменяется от 1 до N.

## 3.10 Уравнения внешнего разрядного контура

Электрическая схема разрядного контура, использующего емкостной накопитель энергии, может быть представлена в виде, показанном на рисунке 69.



Рисунок 69 – Электрическая схема разрядного контура.

Здесь  $j_{\Sigma}$  – ток в цепи,  $U_{H}$  – напряжение на клеммах емкостного накопителя энергии,  $C_{0}$ – емкость накопителя,  $R_{0}$  – сопротивление электрической цепи (за исключением ПС)  $U_{\Pi\Pi}$  – падение напряжения на ПС,  $L_{0}$  – начальная индуктивность разрядного контура (за исключением ПС).

Основные уравнения разрядного контура АИПД имеют вид:

$$L_{o}\frac{dj_{\Sigma}}{dt} + R_{o}j_{\Sigma} + U_{\Pi\Pi} = U_{H} , \qquad (3.53)$$

$$C_{o} \frac{dU_{H}}{dt} = -j_{\Sigma}.$$
(3.54)

Так как  $j_{\Sigma} = j_{N}^{e}$ ,  $U_{nn} = U_{N+1}^{+}$ , то уравнения внешней цепи запишутся в виде

$$\frac{\mathrm{dU}_{\mathrm{H}}}{\mathrm{dt}} = -\frac{1}{\mathrm{C}_{\mathrm{o}}} \,\mathbf{j}_{\mathrm{N}}^{\mathrm{e}} \tag{3.55}$$

$$L_{o}\frac{dj_{N}^{e}}{dt} + R_{o}j_{N}^{e} + U_{N+1}^{+} = U_{H}$$
(3.56)

Соотношения (3.46, 3.49, 3.52, 3.55, 3.56) представляют собой систему 3N+2 уравнений для 3N+2 подлежащих определению функций времени t:

 $U_{i}^{-}$ ,  $j_{i}^{e}$ , (i изменяется от 1 до N),  $U_{k}^{+}$ , (k изменяется от 1 до N) и  $U_{H}$ .

При этом только токи  $j_i^e$ , и напряжения U<sub>H</sub> в указанных уравнениях входят вместе с производными. Поэтому, исключая остальные переменные, мы получим систему дифференциальных уравнений для токов  $j_i^e$ , и напряжения U<sub>H</sub>.

Данная система уравнений разрешима относительно производных  $\frac{dj_i^e}{dt}$  и  $\frac{dU_H}{dt}$ .

Интересующие нас токи в сгустках j<sub>i</sub> определяются равенствами:

$$j_i = \frac{1}{\delta_i h} (j_i^e - j_{i-1}^e)$$
, где і изменяется от 1 до N, при этом  $j_o^e = 0$ .

Магнитное поле определяется равенством:

$$H_i = \frac{1}{h} H_i^* = \frac{1}{h} j_i^e$$
,

где і изменяется от 1 до N,  $H_i$ - постоянная напряженность поля позади і-го ПС. Напряженность поля перед первым ПС  $H_0$ =0. Внутри ПС поле изменяется линейно (рисунок 65).

## 3.11 Основные уравнения физико-математической модели процесса ускорения плазмы в АИПД

Сводка основных уравнений, описывающих процесс ускорения плазмы в АИПД, полученных в предыдущих разделах выглядит следующим образом:

Уравнения движения центра масс ПС и изменения массы ПС имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{dm}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} &= \Pi_{\mathrm{a}}^{\Sigma} ,\\ \frac{\mathrm{dx}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} &= \mathrm{V}_{\mathrm{c}} ,\\ \frac{\mathrm{dV}_{\mathrm{c}}}{\mathrm{dt}} &= \frac{1}{\mathrm{m}_{\mathrm{c}}} \bigg[ -\Pi_{\mathrm{a}}^{\Sigma} \cdot \mathrm{V}_{\mathrm{c}} + \frac{2}{3} \mathrm{p}_{\mathrm{c}} \delta \cdot \big(\mathrm{h}_{\mathrm{c}} \mathrm{d}_{\mathrm{x}} + \mathrm{d}_{\mathrm{c}} \mathrm{h}_{\mathrm{x}} \big) + \frac{1}{2} \mathrm{L}' \cdot \mathrm{j}_{\Sigma}^{2} - \mathrm{k}_{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{V}_{\mathrm{c}}^{2} \bigg] . \end{aligned}$$

Здесь  $h_c = h_0 + h_x \cdot (x_c - x_0), h_x = 2 \cdot tg\beta, \beta$  — половина угла сужения электродов, и  $d_c = d_0 + d_x \cdot (x_c - x_0), d_x = 2 \cdot tg\gamma, \gamma$  — половина угла раствора электродов.

$$L' = \mu_0 \frac{d_c}{h_0} \cdot k_L,$$
  
$$F_p = \frac{2}{3} \cdot k \cdot (1 + \xi) \cdot \frac{h_x}{h_c} \cdot \frac{m_c}{m_a} \cdot T_c.$$

Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка имеют вид

$$\begin{split} \frac{d\delta}{dt} &= V_{\delta} ,\\ m_{c} \cdot \frac{dV_{\delta}}{dt} &= -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{\delta} + b_{p} - L' \cdot j_{\Sigma}^{2} - 2 \cdot k_{\tau p} \cdot V_{c} \cdot V_{\delta} \\ &\frac{dV_{\delta}}{dt} = \frac{1}{m_{c}} \bigg[ -\Pi_{a}^{\Sigma} \cdot V_{\delta} + b_{p} - L' \cdot \frac{h_{0}}{h_{c}} \cdot j_{\Sigma}^{2} - 2 \cdot k_{\tau p} V_{c} V_{\delta} \bigg] , \end{split}$$

где  $b_p = 8 \cdot k \cdot (1 + \xi) \cdot \frac{m_c}{m_a} \cdot \frac{1}{\delta}$ .

Температура ПС описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{T}_{c}}{dt} = & \frac{1}{\left(c_{v} + \xi^{1}\right) \cdot m_{c}} \left[ \mathbf{R}_{c} \cdot \mathbf{j}_{z}^{2} + \frac{1}{2} \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot \mathbf{V}_{c}^{2} - \frac{\mathbf{k} \cdot (1 + \xi) \cdot \mathbf{m}_{c} \cdot \mathbf{V}_{\delta}}{\mathbf{m}_{a} \cdot \delta} \mathbf{T}_{c} - \right. \\ & - \Pi_{a}^{\Sigma} \cdot (\mathbf{T}_{cp} - \mathbf{T}_{a\delta}) - \mathbf{q}_{au}^{c} - \mathbf{q}_{u3}^{c} + \mathbf{k}_{\tau p} \cdot \mathbf{V}_{c}^{3} \right], \end{aligned}$$

где  $T_{cp} = \frac{2}{3}T_c$ , а слагаемые, входящие в правую часть уравнения,

вычисляются следующим образом:

$$\xi^{1} = \frac{3}{2} \cdot \xi \cdot \frac{\mathbf{N}_{a} \cdot \mathbf{J}}{(2 \cdot \mathbf{N}_{a} + \mathbf{N}_{i}) \cdot \mathbf{m}_{a} \cdot \mathbf{T}_{c}} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{J}}{\mathbf{T}_{c}}\right) \cdot \alpha,$$

где 
$$\xi = \frac{N_i}{N_i + N_a}$$
,

При этом количество ионов и электронов в плазме подсчитываются по формулам:

$$\begin{split} \mathbf{N}_{e} &= \mathbf{N}_{i} = \frac{1}{2} \Gamma \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \rho_{cp}}{m_{a} \cdot \Gamma}} \ - \ 1 \right) \,, \\ \mathbf{N}_{a} &= \frac{\rho_{cp}}{m_{a}} - \mathbf{N}_{i} \ , \\ \Gamma &= \mathbf{C}_{caxa} \cdot \mathbf{T}_{cp}^{3/2} \cdot \mathbf{1}^{-\frac{J}{T_{cp}}} \,, \\ \rho_{cp} &= \frac{m_{c}}{d \cdot h_{c} \cdot \delta} \,, \end{split}$$

Электрическое сопротивление плазмы:

$$\begin{split} R_{c} &= \frac{d_{\kappa op}}{h_{c} \cdot \delta \cdot \sigma} , \\ \text{где} \quad d_{\kappa op} &= \left\{ \begin{array}{l} d \ , & \\ \sqrt{d^{2} + \left(2k_{R}\left(x_{c} - x_{_{3ЛеK}}\right)\right)^{2}} \end{array}, \begin{array}{l} x_{c} \leq x_{_{3ЛеK}} , \\ x_{c} > x_{_{3ЛеK}} , \\ \end{array} \right. \\ \sigma &= k_{\sigma} \frac{T_{cp}^{3/2}}{\Lambda} \ , \qquad N_{e} = N_{a} \ . \end{split}$$

Затраты энергии на ионизацию:

$$q_{a\mu}^{c} = \frac{N_{i} \cdot J \cdot \alpha}{(2 \cdot N_{a} + N_{i})} \cdot \left[ \frac{\Pi_{a}^{\Sigma}}{m_{a}} + N_{a} \cdot d_{c} \cdot h_{c} \cdot \delta \cdot \left( \frac{V_{\delta}}{\delta} + \frac{h_{x}}{h_{c}} \cdot V_{c} \right) \right],$$

Энергия излучаемая ПС:

$$\mathbf{q}_{\scriptscriptstyle H3}^{c} = 4 \sigma_{bl} \cdot \alpha_{\scriptscriptstyle H3} \cdot \frac{\mathbf{m}_{c}}{\mathbf{m}_{a}} \cdot \mathbf{T}_{cp}^{4} \quad . \label{eq:q_H3}$$

Максимальное давление в ПС в каждый момент времени вычисляется по формуле

$$p_{c} = k \cdot \left(1 + \xi\right) \cdot \frac{m_{c}}{m_{a}} \cdot \frac{1}{d_{c} \cdot h_{c} \cdot \delta} \cdot T_{c} \quad .$$

Аблировавшая к моменту времени t масса, приходящаяся на единицу длины канала

$$\begin{split} M_{a}(t,x) &= c_{a} \cdot Q(t,x) ,\\ \text{где } Q(t,x) &= \int_{0}^{t} W_{a}(\tau,x) d\tau , \quad x \in [x_{0}, x_{0} + L_{\text{tef}}],\\ W_{a}(t,x) &= \eta_{\text{H3}} \cdot \Omega(t,x) ,\\ \eta_{\text{H3}} &= \frac{1}{4\pi} \cdot q_{\text{H3}}^{c}.\\ \Omega(t,x) &= \frac{d_{c} \cdot h_{c}}{\left[\left(x - x_{c}\right)^{2} + \frac{1}{4}(h_{c} + h_{x}(x - x_{c}))^{2}\right]^{3/2}}, \end{split}$$

Процесс формирования плазменного сгустка задается следующими соотношениями.

Масса M<sub>a</sub><sup>1</sup>, аблировавшая в единицу времени внутри ПС определяется равенством

$$\mathbf{M}_{a}^{1}(t) = \mathbf{c}_{a} \cdot \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\mathcal{W}}3} \cdot \boldsymbol{\Omega}_{1}(t) \quad ,$$

где

$$\Omega_{1}(t) = 8 \frac{d_{c}}{h_{c}} \frac{\delta_{z}}{\sqrt{\delta_{z}^{2} + h_{c}^{2}}},$$

$$\delta_{z} = \begin{cases} \delta_{z}, & x_{c} + \frac{\delta}{2} < x_{re\phi} \\ 0_{z}, & x_{c} - \frac{\delta}{2} > x_{re\phi} \\ x_{re\phi} - x_{c} + \frac{\delta}{2}, & x_{c} - \frac{\delta}{2} \le x_{re\phi} \le x_{c} + \frac{\delta}{2} \end{cases}$$

Подхватываемая плазменным сгустком в единицу времени масса

$$M_a^2(t) = M_a^z(t, x_c + \frac{\delta}{2}) \cdot \left(V_c + \frac{1}{2}V_\delta\right),$$

где

$$M_{a}^{z} = \begin{cases} M_{a} , & x_{c} + \frac{\delta}{2} < x_{tef} , \\ 0 , & x_{c} + \frac{\delta}{2} \ge x_{tef} . \end{cases}$$

Суммарная масса, поступающая в ПС в единицу времени будет

129

 $\Pi_a^{\Sigma} = \mathbf{M}_a^1 + \mathbf{M}_a^2$ 

Система уравнения электрической цепи имеет вид:

$$\begin{split} \Delta L_{i}^{l} \frac{dj_{i}^{e}}{dt} &= U_{i+1}^{+} - U_{i}^{-} \\ L' \Bigg[ \frac{1}{2} \delta_{i} \Bigg( \frac{dj_{i}^{e}}{dt} + \frac{dj_{i-1}^{e}}{dt} \Bigg) + (j_{i}^{e} - j_{i-1}^{e}) V_{c_{i}} \Bigg] &= U_{i}^{-} - U_{i}^{+} \\ \frac{1}{2} (U_{i}^{+} + U_{i}^{-}) &= R_{i} (j_{i}^{e} - j_{i-1}^{e}) + \frac{1}{2} L' \Bigg[ V_{c_{i}} (j_{i}^{e} + j_{i-1}^{e}) - \frac{1}{\sigma} V_{\sigma_{i}} (j_{i}^{e} - j_{i-1}^{e}) \Bigg] \\ \frac{dU_{H}}{dt} &= -\frac{1}{C_{o}} j_{N}^{e} \\ L_{o} \frac{dj_{N}^{e}}{dt} + R_{o} j_{N}^{e} + U_{N+1}^{+} = U_{H} \,. \end{split}$$

Начальные условия  $m_c(t_o)$ ,  $x_c(t_o)$ ,  $x_c(t_o)$ ,  $V_c(t_o)$ ,  $\delta(t_o)$ ,  $V_{\delta}(t_o)$ ,  $T_c(t_o)$ ,  $U_{\rm H}(t_o)$ ,  $j_{\Sigma}(t_o)$ считаются заданными.

Величины  $h_o$ ,  $k_{Tp}$ ,  $\beta$ ,  $\mu_o$ , d, k,  $m_a$ ,  $c_v$ ,  $T_{a\delta}$ ,  $c_H$ ,  $L_o$ ,  $R_o$ ,  $L_{Te\varphi}$ ,  $L_e$ ,  $k_r$ ,  $k_\sigma$ ,  $k_\Lambda$ ,  $C_{caxa}$ , J,  $\alpha$ ,  $\sigma_{bl}$ ,  $c_a$ , постоянны и считаются заданными.

Величины α<sub>из</sub> и k<sub>L</sub> подбирались, исходя из условия наилучшего совпадения расчетной кривой тока с физическим экспериментом.

## 3.12 Компьютерная реализация физико-математической модели

Разработанная физико-математическая модель была реализована в виде компьютерной программы в среде аналитических вычислений MAPLE 12.

Компьютерная программа позволяет рассчитать для каждого ПС изменение во времени массы ПС, положения и скорости центра масс ПС, средней температуры в ПС, тока во внешней цепи накопителя энергии, распределения по длине канала аблировавшего со стенок канала рабочего вещества.

Программа рассчитывает характеристики процессов излучения плазмы и переноса энергии излучения, поглощения энергии излучения фторопластовыми стенками канала и абляции вещества стенок под действием поглощенной энергии, разогрева плазмы за счет энергии электромагнитного поля. Помимо электромагнитных сил учитывает дополнительное ускорение за счет газодинамического давления в расширяющемся в направлении движения канале ИПД. Она также учитывает увеличение массы ускоряемого сгустка и его торможение за счет поступления аблирующей массы рабочего вещества.

Созданная компьютерная программа позволяет получать интегральные характеристики процесса ускорения, характеризующие качество работы ИПД, такие как: суммарный расход массы за импульс, процент ускоренной массы (в модели считается, что часть аблировавшей массы теряется и не участвует в процессе ускорения), единичный импульс, удельный импульс, коэффициент полезного действия ИПД.

Алгоритм вычислений по программе имеет достаточно простую структуру. Его укрупненная блок-схема показана на рисунке 70. Решение интегродифференциальных уравнений процесса выполняется методом Рунге-Кутта второго порядка с расчетом на каждом шаге интегральных соотношений связанных с пространственным описанием процессов поглощения излучения плазмы фторопластовыми блоками и абляции.



Рисунок 70 – Блок-схема программы расчета процесса ускорения плазмы в микро-АИПД

## 3.13 Результаты численного математического моделирования

В качестве объекта моделирования был рассмотрен АИПД-ИТ с энергией в разряде 6,62 Дж.

Были выбраны следующие исходные данные для расчетов

L <sub>0</sub> =33 нГн,	d <sub>o</sub> = 0,016 м,
С₀=9,2 мкФ ,	h₀=0,008 м,
R <sub>o</sub> =0,021 Ом,	х <sub>теф</sub> =0,014 м,
$U_{H}(t=0)=1200B,$	х <sub>элек</sub> =0,029м,

Ширина электродов h(x) - постоянна на интервале  $0 \le x \le 0,014$  м, а затем электроды сужаются по линейному закону до h(0,029)=0,002 м. Расстояние между электродами d(x) постоянно на интервале  $0 \le x \le 0,014$  м, а затем увеличивается по линейному закону до d(0,029)=0,0333.

Учитывались две полуволны тока, генерирующие два плазменных сгустка.

Сравнение результатов моделирования С математического экспериментально полученными характеристиками лабораторных моделей микро-АИПД подтвердило адекватное отражение основных физических процессов в микро-АИПД, как на качественном, так и на количественном уровнях. В таблице 18 приведены результаты численных расчетов с использованием математической АИПД с модели и результаты эксперимента для указанными выше характеристиками [58, 59].

Таблица 18– Результаты численных расчетов и сравнение с экспериментальными данными

	Экспериментальные данные	Результаты моделирования
Начальная индуктивность, нГн	33	33
Энергия в импульсе, Дж	6,62	6,62
КПД, %	4,3	4,39
Расход за импульс, мкг/имп.	21,4	23,7
Единичный импульс тяги,мН·с	0,114	0,112
Удельный импульс тяги, м/с	4966	4741

На рисунках 71 – 74 для показаны положение центров масс ПС и их размер вдоль оси х в различные моменты времени (рисунок 71), зависимости от времени скоростей движения центров масс ПС (рисунок 72), токов в ПС и суммарного тока во внешней цепи (рисунок 73, масс ПС и суммарной массы плазмы (рисунок 74).



Рисунок 71 – Положение центров масс ПС и их размер вдоль оси х в различные моменты времени



Рисунок 72 – Зависимости от времени скоростей движения центров масс двух ПС



Рисунок 73 – Зависимости от времени токов в ПС и суммарного тока во внешней цепи



Рисунок 74 – Зависимости от времени масс ПС и суммарной массы плазмы

При расчетах варьировалась величина начальной индуктивности разрядного контура L<sub>o</sub>. Полученные результаты сведены в таблицу 19.

Таблица 19 – Расчётные данные АИПД-ИТ с энергией разряда 6,62 Дж, при различных значениях начальной индуктивности разрядного контура

Начальная индуктивность, нГн	33	40	46	50	52
Энергия в импульсе, Дж	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
Расход рабочего вещества, мкг/имп.	23,7	20,8	17,5	15,8	14,9
Единичный импульс тяги, мН·с	0,112	0,118	0,134	0,150	0,154
Удельный импульс тяги, м/с	4741	5648	7672	9436	10346

Для АИПД с большой энергией разряда (>50 Дж) с целью увеличения электродинамического КПД, который, в свою очередь, в значительной степени зависит от параметра Арцимовича и определяется отношением ёмкости конденсаторной батареи к начальной индуктивности разрядной цепи, стремятся к снижению начальной индуктивности L<sub>o</sub>. Считалось, что для микро-АИПД с небольшими энергиями разряда, необходим такой же подход, несмотря на то, что ёмкость конденсаторной батареи значительно ниже и оптимального соотношения С/Lo [77] для таких двигателей не добиться. Результаты расчёта, приведенные в данной таблице показывают, что для микро-АИПД увеличение начальной индуктивности разрядного контура, вопреки первоначальным предположениям, положительно влияет на характеристики АИПД, снижая расход рабочего тела и увеличивая, главным образом, удельный импульс тяги, за счет лучшего локальновременного согласования ввода энергии и массы в разрядный канал.

# Глава 4 Экспериментальные исследования влияния индуктивности разрядного контура на характеристики микро-АИПД

С целью подтверждения результатов расчёта физико-математической модели были проведены экспериментальные исследования влияния индуктивности разрядного контура на характеристики микро-АИПД. Для этого были использованы лабораторная модель АИПД-ИТ, описанная во второй главе, и экспериментальный образец ДУ ИПД-120 с энергией разряда 20 Дж.

# 4.1 Доработка лабораторной модели АИПД-ИТ с целью варьирования начальной индуктивности разрядного контура

Для того чтобы в модели АИПД-ИТ можно было варьировать индуктивность, между конденсаторным блоком и ускорительной частью разрядного канала были расположены дополнительные гибкие токопроводящие медные шины (рисунок 75) [59, 60]. Изменяя расстояние между этими шинами, можно было добиться различных значений начальной индуктивности разрядного контура.



Рисунок 75 – Изменение лабораторной модели АИПД-ИТ с целью увеличения начальной индуктивности разрядного контура: а) до изменения, б) с дополнительными токопроводящими шинами

Величина начальной индуктивности разрядного контура Lo рассчитывалась по формуле:

$$L_{o} = \frac{T^{2}}{\pi^{2} \cdot C}$$

где С – ёмкость конденсаторной батареи, Т – длительность полупериода, которая определялась по осциллограмме разрядного тока, снятой при коротком замыкании электродов в месте расположения свечи поджига.

На рисунке 76 представлены осциллограммы разрядного тока при различных значениях Lo.



Рисунок 76 – Осциллограммы тока при различных значениях индуктивности разрядной цепи микро-АИПД (от 33 до 450 нГн)

4.2 Экспериментальное исследование влияния начальной индуктивности разрядного контура на характеристики лабораторной модели АИПД-ИТ

Испытания лабораторной модели АИПД-ИТ с варьируемой индуктивностью проводились на экспериментальном стенде ИУ-1, описанном в разделе 2.1. В процессе испытаний, помимо измерения начальной индуктивности разрядного контура, регистрировались начальное напряжение на конденсаторной батарее и снимались осциллограммы разрядного тока двигателя. По методикам,

описанным во второй главе, определялась средняя тяга, измерялся расход рабочего вещества и фиксировалось число разрядных импульсов. На основе измеренных величин, по описанным ранее формулам (раздел 2.1), определялись характеристики испытуемого образца, такие как энергия разряда, потребляемая мощность, единичный импульс тяги, тяговая эффективность и среднемассовая скорость истечения плазмы (удельный импульс тяги).

Полученные результаты экспериментов приведены в таблице 20. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показано в таблице 21 и на рисунке 77 [59, 60].

Таблица 20 – Экспериментальные данные при различной начальной индуктивности в АИПД-ИТ с энергией разряда 6,62 Дж.

Характеристики	Начальная индуктивность, нГн		ость, нГн	
Tupantophothini	L <sub>o</sub> =33	L <sub>o</sub> =41	$L_0=50$	
Энергия разряда, Дж	6,6	6,6	6,6	
Потребляемая	13.2	13.2	13.2	
мощность, Вт	13,2	13,2	13,2	
Единичный импульс	0.11	0 100	0.095	
тяги, мH·с	0,11	0,109	0,095	
Расход рабочего	21.4	18.0	13.5	
вещества, мкг/импульс	21,4	10,9	15,5	
Удельный импульс	1966	5777	7058	
тяги, м/с	4700	5111	7038	

Таблица 21 – Экспериментальные и расчетные данные изменения удельного импульса с изменением начальной индуктивности в АИПД-ИТ с энергией разряда 6,62 Дж.

Эксперимент		Расчет		
Индуктивность,	Уд. импульс	Индуктивность,	Уд. импульс	
нГн	тяги,м/с	нГн	тяги,м/с	
33	4966	33	4741	
36	5070	36	5142	
41	5777	41	6074	
46	6850	46	7672	
50	7058	50	9436	
51	6976	-	-	
103	7797	100	16614	



Рисунок 77 – Зависимость удельного импульса тяги от начальной индуктивности разрядной цепи [60]

Видно, что тенденция роста удельного импульса тяги с увеличением начальной индуктивности разрядного контура двигателя хорошо совпадает с прогнозами расчётов. В то же время эксперименты показали, что при существенном увеличении индуктивности длительность разряда возрастает настолько, что он выносится за пределы разрядного канала и это приводит к такому отрицательному явлению как науглероживание шашек рабочего тела, которое не учитывается в теоретических построениях. Этим объясняется наблюдающееся расхождение теоретических и экспериментальных результатов при индуктивности более 45 нГн.

Разработанная физико-математическая модель рабочих процессов в микро-АИПД позволяет понять причины повышения удельного импульса тяги с ростом начальной индуктивности разрядного контура. На рисунке 78 представлены графики изменения от времени количества поступающей в разрядный канал аблировавшей массы при разной начальной индуктивности разрядного контура, взятые из расчётной модели, и графики зависимости квадрата разрядного тока от времени, характеризующие мощность, выделяющуюся в разрядном канале в первых двух полупериодах [60].



Рисунок 78 – Расчётные кривые зависимости аблировавшей массы и квадрата разрядного тока от времени

Из приведенного рисунка видно, что большему значению  $L_0(50 \text{ нГн})$  соответствует большая длительность разряда и меньшая величина испарившейся массы рабочего тела, которая после окочания второго полупериода фактически перестает поступать в канал ( $\Delta m \approx const$ ),в то время как при меньшей индуктивности (33 нГн) – продолжает. То есть, при увеличении  $L_0$  снижается влияние на характеристики двигателя так называемого эффекта послепарения, когда рабочее вещество продолжает поступать в разрядный канал, после прекращеия поступления энергии и, соответственно, не может быть эффективно ускорено.

Таким образом, можно утверждать, что для микро-АИПД с увеличением индуктивности улучшается локально-временное согласование ввода энергии и массы в канал ускорения. Экспериментально подтверждено, что для АИПД-ИТ с энергией разряда 6,6 Дж увеличение на 50% начальной индуктивности разрядного контура, позволило повысить удельный импульс тяги двигателя на 42%.

# 4.3 Изменение индуктивности за счёт изменения формы разрядного канала

Варьировать индуктивность разрядного контура  $L = L_0 + \Delta L$  можно не только путём изменения постоянной составляющей  $L_0$ , но и воздействуя на закон изменения переменной составляющей  $\Delta L$ , определяемой перемещением плазменного сгустка вдоль разрядного канала. Для этого разрядный канал выполняется расширяющимся к выходу, тем самым увеличивая погонную индуктивность.

Так как электродинамический КПД АИПД в значительной степени определяется отношением переменной индуктивности к начальной [75], то обычно с целью увеличения погонной индуктивности разрядного канала, электроды за срезом шашек имеют треугольную в плане форму и наклонены под некоторым углом относительно продольной оси двигателя (рисунок 79).

142



Рисунок 79 – Разрядный канал АИПД с прямоугольнымпоперечным сечением шашек рабочего тела

Дополнительное увеличение погонной индуктивности разрядного канала, можно получить, если выполнить начальный участок разрядного канала также расширяющимся, как показано на рисунке 80. При этом форма поперечного сечения шашек рабочего тела должна соответствовать форме измененных электродов. Для чистоты сравнения экспериментов, размеры новой формы шашки были рассчитаны таким образом, чтобы площадь рабочей поверхности не изменилась.



Рисунок 80 – Разрядный канал АИПД с трапециевиднымпоперечным сечением шашек рабочего тела

Внешний вид модели АИПД-ИТ с трапециевидными шашками приведен на рисунке 81.



Рисунок 81 – Внешний вид лабораторной модели АИПД-ИТ с трапециевидными шашками

На рисунке 82 представлены осциллограммы разрядного тока для двух вариантов исполнения разрядного канала.



Рисунок 82 – Осциллограммы тока АИПД-ИТ для а) разрядного канала с прямоугольным поперечным сечением шашек рабочего тела б) разрядного канала с трапециевидным поперечным сечением шашек рабочего тела
Результаты экспериментов с трапециевидным разрядным каналом сведены в таблицу 22, где для сравнения приведены характеристики для той же лабораторной модели с прямоугольным каналом.

Таблица 22 – Характеристики АИПД-ИТ с различным исполнением разрядного канала

	Шашки прямоугольные	Шашки трапециевидные
	(электроды в начале канала	(электроды,
	плоскопараллельные)	раскрывающиеся от начала канала)
Параметры	00	
Частота, Гц	1-2	1-2
Энергия, Дж	6,6	6,6
Удельный импульс тяги, км/с	5,1	6,6
Расход, г/имп.	2,1.10-5	1,6.10-2
Единичный импульс тяги, мН·с	0,11	0,11

Из приведенных данных видно, что при одинаковой энергии разряда в случае трапециевидного разрядного канала удельный импульс тяги увеличивается на ~30%. То есть, предложенный способ увеличения отношения переменной индуктивности к постоянной является перспективным путём повышения характеристик двигателя. На АИПД с разрядным каналом трапециевидного типа получен патент РФ №2688049 [78].

# 4.4 Экспериментальный образец ДУ ИПД-120

Для проведения исследований влияния величины начальной индуктивности на характеристики микро-АИПД с энергией от 10 до 20 Дж использовался экспериментальный образец двигательной установки ИПД-120, разработанный по заказу НИИ КС имени А.А. Максимова и предназначенный для поддержания и коррекции орбиты малого низкоорбитального космического аппарата массой менее 100 кг [59]. Внешний вид ДУ ИПД-120 представлен на рисунке 83.



## Рисунок 83- Внешний вид ДУ ИПД-120

Двигательная установка ИПД-120 выполнена в виде моноблока включающего блок накопителя энергии (БНЭ) **1** с системой электродов, образующих разрядный канал, блок инициирования разряда (БИР) **2**, блок системы питания и управления (блок СПУ) **3**, экран **4**, установленный с целью защиты элементов двигателя и смежных систем КА от воздействия периферийных потоков плазменной струи двигателя.

Основным силовым элементом конструкции является блок накопителя энергии. На БНЭ закреплен блок инициирования разряда и блок системы питания и управления. Вследствие относительно небольшого запаса рабочего тела, механизм его подачи не выделен в отдельный блок, а входит в состав блока накопителя энергии. Блок системы питания и управления массой 1 кг и потребляемой мощностью 60 Вт предназначен для преобразования бортового напряжения питания 27<sup>+7</sup><sub>-4</sub> В в напряжение 1200±50 В, необходимое для питания БНЭ, и 800±30 В для питания БИР, а также для генерации импульсов 200 В, управляющих работой БИР. Структурная схема ДУ ИПД-120 показана на рисунке 84. КПД блока СПУ составляет 0,95.



Рисунок 84 – Структурная схема ДУ ИПД-120

Блок инициирования разряда предназначен для формирования высоковольтных импульсов напряжения, инициирующих разряды в разрядном канале АИПД. В состав БИР входят корпус с размещенными в нем элементами его электрической схемы, двухэлектродная свеча поджига и соединительные кабели. Масса БИР составляет 0,4 кг.

Блок накопителя энергии, предназначенный для накопления электрической энергии в конденсаторной батарее и питания разрядного канала импульсным рисунке 85. В БНЭ током. представлен на состав вхолят корпус 1, 4 импульсных конденсатора ICARMSR25-C-6.8-50 (номинальная емкость 6,8 мкФ, напряжение 1200 В) 2, кронштейн электродной системы 3, электродная система 4, состоящая из анода, катода, гибких токопроводящих шин 5 и межэлектродного изолятора, верхний 6 и задний 7 изоляторы, керамическая форкамера и механизм подачи рабочего тела 8. Конденсаторы электрически соединены параллельно в силовую батарею емкостью С<sub>0</sub>.



Рисунок 85 – Конструкция БНЭ без крышки корпуса

Соединение конденсаторов с электродами разрядного канала посредством гибких медных шин позволяет легко осуществить замену этих шин для изменения начальной индуктивности разрядного контура.

Осциллограмма разрядного процесса ДУ ИПД-120 приведена на рисунке 86.



Рисунок 86 – Осциллограмма разрядного процесса двигательной установки ИПД-120 (L<sub>0</sub> = 35 нГн)

# 4.5 Улучшение характеристик ДУ ИПД-120 путём изменения начальной индуктивности разрядного контура

Для проведения исследований влияния величины начальной ДУ характеристики ИПД-120 индуктивности на была изготовлена дополнительная серия шин разной длины, которые соединяли конденсаторы с электродами. Их местоположение видно на позиции 5 рисунка 85. После установки каждого набора шин измерялась индуктивность модели, затем проводился эксперимент. В процессе испытаний регистрировались начальное напряжение на конденсаторной батарее, определялась средняя тяга, измерялся расход рабочего вещества и фиксировалось число разрядных импульсов. Затем рассчитывались характеристики испытуемого образца: энергия разряда, потребляемая мощность, единичный импульс тяги, тяговая эффективность и удельный импульс тяги. Экспериментально полученные зависимости удельного импульса тяги, расхода рабочего вещества за импульс и единичного импульса тяги от начальной индуктивности разрядного контура приведены на рисунках 87-89 [59,60].



Рисунок 87 – Зависимость удельного импульса тяги ИПД-120 от начальной индуктивности разрядного контура



Рисунок 88 – Зависимость расхода рабочего вещества в ИПД-120 за один импульс от начальной индуктивности разрядного контура



Рисунок 89 – Зависимость единичного импульса тяги в ИПД-120 от начальной индуктивности разрядного контура

Из графиков видно, что увеличение начальной индуктивности электрической цепи с~ 35нГн до 60 нГн приводит к существенному росту удельного импульса (на 20%), с 7125 м/с до ~8500 м/с, что обусловлено уменьшением расхода рабочего вещества за импульс (на 25%) при существенно меньшем снижении единичного импульса тяги (на 10%).

По результатам испытаний была проведена доработка двигательной установки ИПД-120 с целью улучшения её удельных характеристик. Полученные при испытаниях характеристики исходной и модернизированной двигательной установки приведены в таблице 23 [59, 60].

Таблица 23 – Характеристики исходной и модернизированной двигательной установки ИПД-120

	ДУ ИПД-120	
Характеристики	Исходная	Модернизированная
	модель	модель
	Lo=37 нГн	Lo=59 нГн
Энергия разряда, Дж	20	20
Единичный импульс тяги, мH·с	0,34	0,31
Расход рабочего тела за один	48	36
импульс, мкг/имп.		
Удельный импульс тяги, км/с	7,1	8,5
Цена тяги, Вт/мН	58	64
Рабочая частота импульсов, Гц	2,65	2,65
Потребляемая мощность, Вт	53	53
Средняя тяга, мН	1,1	0,82
Рабочее тело	фторопласт-4	фторопласт-4
Запас рабочего тела, кг	0,12	0,12
Ресурс (по запасу рабочего тела),	$2.10^{6}$	$3.10^{6}$
ИМП.	~	
Суммарный импульс тяги, кН с	0,8	0,95
Полная масса ДУ, кг	3,5	3,5

Из таблицы видно, что удельный и суммарный импульсы тяги двигателя после доработки существенно увеличились, на 20% и 19%, соответственно. При этом отмечается снижение единичного импульса тяги и, следовательно, средней тяги, что легко может быть скомпенсировано увеличением частоты импульсов срабатывания ДУ.

Уменьшение величины расхода и, соответственно, увеличение удельного импульса тяги связаны с уменьшением эффекта послепарения шашек рабочего вещества после завершения процесса ускорения основной массы фторопласта. При повышении индуктивности, как и в случае АИПД-ИТ, это происходит вследствие увеличения длительности разряда и снижения пикового значения тока, что в свою очередь приводит к соответствующему уменьшению энергии излучения плазмы и отдалению излучающей токовой перемычки от шашек рабочего тела на большее расстояние.

Работоспособность двигательной установки АИПД-120 была было подтверждена длительными испытаниями, В результате которых следов науглероживания рабочих поверхностей установлено отсутствие фторопластовых шашек. Внешний вид разрядного канала после длительных испытаний приведен на рисунке 90.



Рисунок 90. Внешний вид разрядного канала ДУ ИПД-120 после длительных испытаний

В процессе длительных испытаний было подтверждено также, что доработка экспериментального образца ДУ ИПД-120 позволяет увеличить ресурс по запасу рабочего вещества с 2.10<sup>6</sup> до 3.10<sup>6</sup> импульсов.

#### Заключение

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научнотехнологического комплекса России на 2014 - 2020 годы" (Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI60719X0308).

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ современного состояния исследований и разработок абляционных импульсных плазменных двигателей для малоразмерных космических аппаратов. Выполнено сравнение АИПД с ЭРД малой мощности других типов. Выбрана схема АИПД рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего тела, как наиболее перспективная схема микро-АИПД для МКА.

2. Проведены экспериментальные исследования моделей микро-АИПД с энергией разряда до 20 Дж, которые показали, что для улучшения тяговоэнергетических характеристик необходимо подобрать такие параметры разрядной цепи двигателя (индуктивность, емкость, сопротивление), при которых реализуется режим работы с локализацией максимума плотности выделяющейся энергии в области среза шашек рабочего тела.

3. Проведены магнитозондовые исследования, которые позволили определить динамическую картину распределения тока в первом и втором полупериоде разряда. Полученные результаты показали необходимость учета второго полупериода в расчётной модели ускорения плазмы в микро-АИПД.

4. Физико-математическая модель рабочих процессов в микро-АИПД адаптирована для двигателей малой мощности с колебательным разрядом, приводящим к волнообразной генерации и ускорению плазмы. По результатам расчёта был установлен характер влияния индуктивности разрядной цепи на характеристики микро-АИПД.

5. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов на лабораторных образцах микро-АИПД, показавшее их удовлетворительную корреляцию.

Экспериментально подтверждено, что увеличение начальной индуктивности разрядного контура на 50% позволило повысить удельный импульс тяги двигателя с энергией разряда 6,6 Дж на 42%.

6. Экспериментально показано, что переход от прямоугольной формы начального участка (область расположения шашек рабочего тела) разрядного канала к трапецевидной позволяет повысить, в результате увеличения погонной индуктивности, удельный импульс тяги на ~ 30%. На микро-АИПД с разрядным каналом трапециевидного типа получен патент РФ № 2688049.

7. Полученные результаты исследования апробированы на ДУ ИПД-120, экспериментальном образце двигательной установкис энергией разряда до 20 Дж. Увеличение начальной индуктивности электрической цепи с ~ 35нГн до 60 нГн позволило повысить удельный импульс тяги ДУ на 20%.

# Список сокращений и условных обозначений

АИПД – абляционный импульсный плазменный двигатель

БИР – блок инициирования разряда

БНЭ – блок накопитель энергии

ВЧИД – высокочастотный ионный двигатель

ГРД – газореактивный двигатель

ДУ – двигательная установка

ЖРД – жидкостной ракетный двигатель

ИД – ионный двигатель

ИПД – импульсный плазменный двигатель

КА – космический аппарат

КД – коллоидный двигатель

КДУ – космическая двигательная установка

КЛА – космический летательный аппарат

КПД – коэффициент полезного действия

МАИ – Московский авиационный институт

МГД – магнито-гидродинамическое [приближение]

МКА – малоразмерный космический аппарат

НИИ ПМЭ МАИ – Научно-исследовательский институт прикладной

механики и электродинамики Москвского авиационного института

ПС – плазменный сгусток

САС – срок активного существования

СПД – стационарный плазменный двигатель

СПУ – система питания и управления

ТИУ – тягоизмерительное устройство

ЭРД – электроракетный двигатель

ЭРДУ – электроракетная двигательная установка

Ряд дополнительных обозначений и индексов, которые используются в диссертации, поясняются в тексте или на рисунках.

### Список литературы

1 Макриденко Л.А., Боярчук К.А.. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Журнал «Вопросы электромеханики». Труды НПП ВНИИЭМ. – 2005. –т. 102. – с. 12-27

2 Романов А.А., Селиванов А.С., Урличич Ю.М. Тенденции развития технологий сверхмалых КА и новых спутниковых спутниковых систем на их основе // VII Научно-практическая конференция «Микротехнологии в авиации и космонавтике». Москва – 2009. – С.10-12.

3. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Попов Г.А., Харламов В.С., Богатый А.В., Любинская Н.В., Даньшов Ю.Т., Нечаев И.Л., Семенихин С.А., Яковлев В.Н., Тютин В.К. Корректирующая двигательная установка с абляционным импульсным плазменным двигателем для малых космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2013 – № 5 (21) – С. 33-37.

4. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Казеев М.Н., Ходненко В.П.. Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов // Прикладная физика, 2002. – № 1, – С.37-47.

5. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная.

6. Кутуев Р.Х., Лебедев И.Н., Салич В.Л. Разработка перспективных РДМТ на экологически чистых топливных композициях. // Авиационная и ракетнокосмическая техника. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2009. – №3(19) – С. 101-108.

7. Shreib R.R. ATS-VI Propulsion Performance. Four jears in orbit. – AJAA – № 1062 – pap. 1978.

8. Shatz W.J. et all. Development and flight experience of the Voyager propulsion system. – AJAA – № 1334 – pap. 1979.

9. Woodruff W.R. et all. Atmosphere Explorer orbit adjust propulsion system. – AJAA– № 1135 – pap. 1974.

10. Мурашко В.М., Корякин А.И., Виноградов В.Н., Вертаков Н.М., Рыбальченко Л.В., Нятин А.Г. Разработка, производство, испытания и данные лётной эксплуатации однокомпонентных жидкостных ракетных двигателей ОКБ

«Факел» // Доклад на научно-технической конференции ЭНЕРГОМАШ, 6-7 сентября 2001г. г. Химки.

11. Murashko V.M., Koryakin A. I., Vinogradov V.N., Kovalthuk O.I., Ribalthenko L.V., Niatin A.G. Main Results 20 Year Operating Activities In Space Of Monopropellant Liquid-Propellant Rocket Engines of EDB FAKEL // 6th International Symposium Propulsion for Space Transportation on the XXIst century 14-17 May 2002 Palais des Congres Versailes- France, pap. #16 – P. 59.

12. Ким В. Разработка и исследование малых СПД. // AIAA-98-3335, Paper AIAA-2003-5002, 39-th Joint Propulsion Conference, Huntsville (USA), 2003.

13. Арцимович Л.А., Андронов И.М. Козубский К.Н., Морозов А.И., Рылов Ю.П., Снарский Р.К., Ходненко В.П. Применение ЭРДУ в системах ориентации и стабилизации ИСЗ. – XXIV Международный астронавтический конгресс. – Баку: ВИНИТИ, 1973. – «Космические исследования» 1974 – т.12. – вып.3. – С. 451-468.

14. Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. – М.: Высшая школа, 1970.

15. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.:Атомиздат, 1978 – Т.1.

16. Квасников Л.А., Латышев Л.А. Севрук Д.Д., Тихонов В.Б. Теория и расчет энергосиловых установок КЛА. – Учебник для авиационных специальностей ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1984 – 332 с.

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

Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А.; под ред. Коротеева А. С.
Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.:
Машиностроение, 2008. – 278 с.

19. Кауфман Г. Ридер П. Электрические двигатели. – М.: Вопросы ракетной техники, 1973. – №8. – С. 53-64

20. Loeb H.W. Development of RIT-Microthrusters. IAC-04-S.4.04. 55th IAC, Bremen, 2004

21 Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Гришин Р.А., Кожевников В.В., Плохих А.П., Попов Г.А., Хартов С.А. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2016. – №2 – С. 4-14.

22. Штырлин А.Ф., Шинин В.К. Экспериментальные характеристики источника тяжелых заряженных частиц – В кн. «Прикладные исследования по низкотемпературной плазме». – М.: МАИ, 1984. – С. 51-55.

23. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение. М.: ЦНИИМАШ.2008. – № 3. – С. 28-34.

24. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и ракетостроение. 2011. – № 5. – С. 30-40.

25. Пец Л. А., Симонов А.И., Храбров В.А. Как создавали первые ЭРД // Земля и Вселенная, 2005. – № 6. – С. 57-60.

26. Бостик У.Х., Нанкивелл Д., Козлов С., Смит Д. Экспериментальные исследования по динамике плазмы. – Ионные плазменные и дуговые ракетные двигатели. – М.:Госатомиздат, 1961. – С. 243-248.

27. Burton, R.L., Rysanek, F., Antonsen, E.A., Wilson, M.J., et al., Pulsed Plasma Thruster Performance for Microspacecraft Propulsion, in Micropropulsion for Small Spacecraft, vol. 187: Progress in Astronautics and Aeronautics, 2000. – pp. 337–352.

28. Mueller J. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State-ofthe- Art and Emerging Technologies. // Micropropulsion for Small Spacecraft. Progress in Astronautics and Aeronautics. Reston, Virginia, 2000. – V.187. – pp. 45-137.

29. Spanjers G., Bromaghim D., Lake J., Dulligan M., White D., Schilling J., Bushman S. AFRL MicroPPT Development for the TechSat 21 Flight // IEPC-01-166, Pasadena, CA, 2001.

30. Vondra R., Tomassen K., Solbes A. Analysis of Solid Teflon Pulsed Plasma Thruster // Journal of Spacecraft and Rockets, 1970. – Vol. 7. 31. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и ракетостроение. 2011. – № 5. – С. 30-40.

32. Takegahara H., Kuninaka H., Funaki I., Ando A., Komurasaki K., Koizumi H., Schönherr T., Shinohara S., Tanikawa T., Nakano M., Nakayama Y., Sasoh A., Miyasaka T., Tahara H., Yamamoto N., Kakami A. Overview of Electric Propulsion Research Activities in Japan // IEPC-2015-01 /ISTS-2015-b-01 Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, 2015

33. Small Spacecraft Technology State of the Art // NASA/TP-2015-216648/REV1

34. Kenyon S., Bridges C., Liddle D., Dyer B., Parsons J., Feltham D., Taylor R., Mellor D., Schofield A., Linehan R., Long R., Fernandez J., Kadhem H., Davies P., Gebbie J., Holt N., Shaw P., Visagie L., Theodorou T., Lappas V. Underwood STRAND-1: USE OF A \$500 SMARTPHONE AS THE CENTRAL AVIONICS OF A NANOSATELLITETE // IAC-11-B4.6B.8, 62nd International Astronautical Congress, 2011

35. Богатого А.В., Дьяконова Г.А., Любинской Н.В., Нечаева И.Л., Попова Г.А., Семенихина С.А., Тютина В.К., Яковлева В.Н.. Современное состояние работ по созданию ЭРДУ с АИПД в НИИ ПМЭ МАИ // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2019, –№ 3. – С. 96-109.

36. Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Ким В.П., Меркурьев Д.В., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Спивак О.О., Попов Г.А.. Электрические ракетные двигатели нового поколения для малых космических аппаратов // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2019, – №3. – С. 3-13.

37. Antropov N.N., Bogatyy A.V., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Yakovlev V.N., Boykachev V.N. Development of Russian Next-generation Ablative Pulsed Plasma Thrusters // Procedia Engineering, 2017 – Vol. 185 – P. 53-60

38. Akhmetzhanov R., Bogatyi A., Dyakonov G., Kim V., Lyubinskaya N., Merkuryev D., Obukhov V., Popov G., Semenikhin S., Derkachev A. Development of

electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2018, Bremen; Germany, 2018-October

39. Казеев М.Н. Импульсные плазменные двигатели в России // Труды МАИ., 2012. – Вып. № 60.

40. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 164-166.

41. Spanjers G., Bromaghim D., Capt Lake J., Dulligan M. MicroPPT Development for Small Spacecraft Propulsion // AIAA 2002-3974 AFRL, 2002

42. Zakrzwski C., Benson S., Sanneman P., Hoskins A. On-Orbit Testing of the EO-1 Pulsed Plasma Thruster // AIAA 2002-3973, 2002.

43. Burton, R., Turchi, P. Pulsed Plasma Thruster // Journal of Propulsion and Power, 1998. – Vol. 14. – No. 5. – pp. 716-735.

44. Spanjers, G. Micro-Propulsion Research at the Air Force Research Laboratory // Proceedings, Air Force Research Laboratory Formation Flying and Micro-Propulsion Workshop, Lancaster, CA, Oct. 1998.

45. Богатый А.В, Дьяковнов Г.А., Нечаев И.Л., Попов Г.А. Перспективы улучшений массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2013. №2 –т. 133. – С. 19-26.

46. Любинская Н.В., Надирадзе А.Б., Хартов С.А. Электроракетные двигатели // Учебное пособие к лабораторным работам, Под редакцией С.А. Хартова, М: ООО«Мегаполис», 2018.

47. Плазма в лазерах / Под ред. Дж. Бекефи. М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.

48. Методы исследования плазмы /под ред. В. Лохте-Хольтгревена // М.: Мир, 1971. – 552 с.

49. Пятницкий Л.Н. Лазерная диагностика плазмы // М.: Атомиздат, 1976. – 424 с.

50. Диагностика плазмы /под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда // М.: Мир, 1967.

51. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. – С. 314-331.

52. Popov G., Antropov N., Dyakonov G., Orlov M., Tyutin V., Yakovlev V. Experimental Study of Plasma Parameters in HighEfficiency Pulsed Plasma Thrusters // IEPC-01-163

53. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления, М: Наука, 1988.

54. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления, М.: Наука, 1979.

55. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Отработка результатов наблюдений. М.: Наука., 1970 – С. 107.

56. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968 г. – 96 с.

57. Дьяконов Г.А., Семенихин С.А., Любинская Н.В. Экспериментальные исследования моделей АИПД малой мощности // Авиационная и космическая техника и технология. 2009, – Т. 9/66 – С. 136-138

58. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Тютин В.К., Хрусталев М.М. Расчётные и экспериментальные исследования в обоснование разработки АИПД с энергией 20 Дж // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2015. – № 2, – С. 108 - 119.

59. Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Хрусталёв М.М. Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных космических аппаратов // Труды МАИ, 2014, – Вып. 73 – С. 19.

60. Diakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Semenikhin S.A. Influence of the discharge circuit inductance on the ablative pulsed plasma thruster performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 – Vol. 868(1) – Art. 012025

61. Конденсаторы типа МКV для силовой электроники и тяжелых условий работы. Краткий обзор продукции EPCOS AG, 2006.

62. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // ЖЭТФ, 33, 1957.

63. Лесков Л.В. Теория электромагнитных ускорителей плазмы. Учебное пособие. Изд. МВТУ им. Баумана, 1973. – С. 33-34.

64. Морозов А.И. Физические основы космических электро-реактивных двигателей, т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД, М., Атомиздат, 1978. – С. 326.

65. Брагинский С. И. Явления переноса в плазме. – В кн.: Вопросы теории плазмы, 1963. – Вып. I. – С. 183-272.

 66. Алексеев Ю.А., Казеев М.Н., Кисула В.В. Численное моделирование ускорения плазмы в импульсном ускорителе с эрозией диэлектрика. – ЖТФ, 1973, 43, 1454.

67. Алексеев Ю.А., Казеев М.Н. Численное моделирование двумерных течений в импульсных плазменных ускорителях. Физика плазмы, 1981. – 7. – № 5. – С.1084-1098.

68. Свид. 2011614430 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Физико-математическая модель течения плазмы в канале абляционного плазменного двигателя с учетом реальных процессов в разрядной цепи двигателя / Хрусталёв М.М., Любинская Н.В. заявитель и правообладатель ГОУ ВПО «Московский авиационный институт (государственный технический университет)» (RU). – №2011612679; заявл. 19.04.11; опубл. 06.06.11, Реестр программ для ЭВМ.

69. Хрусталев М.М., Любинская Н.В. Квазиодномерная физикоматематическая модель ускорения плазмы в АИПД малой тяги// Авиационнокосмическая техника и технология, 2006. – №10 – С. 171-172

70. Попов Г.А., Хрусталёв М.М., Храбров В.А., Антропов Н.Н., Любинская Н.В. Физико-математическая модель ускорения плазмы в абляционном импульсном плазменном двигателе // Физика плазмы, 2014. - Т. 40 – № 5. - С. 409-416

71. Попов Г.А., Хрусталев М.М. Одномерная нестационарная физикоматематическая модель ускорения потока плазмы в абляционном импульсном плазменном двигателе. Международный конгресс «Нелинейный динамический анализ – 2007», Россия, Санкт-Петербург, 2007.

72. Вихрев В.В., Земсков А.И., Прут В.В., Храбров В.А. Моделирование процесса разряда на ЭВМ. Вопросы физики низкотемпературной плазмы. Минск: Наука и техника, 1970. – С. 276-282.

73. Деревянко А.П., Медин С.А. Квазинульмерная модель ускорения плазменного сгустка в коаксикале. М.:Научное объединение "ИВТАН" Российской академии наук, 1992. – Препринт № 8-355. – С.20.

74. Ландау Л.Д., Китайгородский А.И. Физика для всех: Движение. Теплота. 1978.

75. Александров В.А., Белан Н.В. Импульсные плазменные ускорители. Учебное пособие. Харьков, Харьковский авиационный институт, 1983. – С. 247.

76. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. – Атомиздат, 1968. – 285 с.

77. Пат. на изобретение 2253953 Российская Федерация, Н05Н 1/54, F03H 1/00 Импульсный плазменный ускоритель и способ ускорения плазмы /Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А. заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение "Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (государственного технического университета)" (ГНУ НИИ ПМЭ МАИ) (RU). — № 2003128090/06; заявл. 22.09.2003; опубл. 10.06.2005 г., Бюл. № 16

78. Пат. на изобретение 2688049 С1 Российская Федерация, МПК F03H1/00, H05H1/54 Абляционный импульсный плазменный двигатель / Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Московский авиационный институт(национальный исследовательский университет)"(RU). — № 2018122125; заявл. 18.06.2018; опубл. 17.05.2019, Бюл. № 14