

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

На правах рукописи

Богатый Александр Владимирович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ
ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ МАЛЫХ 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 – 2021

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Современное состояние разработок в области ИПД	10
1.1 Существующие типы электроракетных двигателей.....	10
1.2 Области применения электроракетных двигательных установок различного типа. Основные полетные задачи.....	11
1.3 Типы импульсных плазменных двигателей	17
1.4 ИПД с газообразным рабочим телом.....	19
1.5 ИПД с жидким рабочим телом	20
1.6 Начальный этап развития АИПД в России и в мире.....	22
1.7 Второй этап исследований и разработок АИПД в России.....	27
1.8 Конструкции современных АИПД.....	31
1.9 Способы улучшения характеристик АИПД и возникающие проблемы	41
Глава 2. Стендовая база для исследования АИПД и ее модернизация.	
Методы экспериментальных исследования АИПД	44
2.1 Стенд для экспериментальных исследований АИПД и его модернизация.....	44
2.2 Анализ применимости тягоизмерительных устройств. Определение рационального типа тягоизмерительного устройства для измерения средней тяги АИПД.....	46
2.3 Аналитическое исследование маятникового тягоизмерительного устройства.....	57
2.4 Модернизация струнного тягоизмерительного устройства.....	61
2.5 Экспериментальное определение локально-временных характеристик двигателя и его систем оптическими методами.....	63
2.6 Оценка погрешности измерений	67
Глава 3. Исследование процессов развития разряда и ускорения плазмы в АИПД	70
3.1 Экспериментальное исследование развития разряда в АИПД оптическими методами..	70
3.2 Исследование распределений плотности тока в разрядном канале образца АИПД методом магнитозондовой диагностики.....	87
3.3 Исследование начальной стадии разряда методом высокоскоростной фотосъемки	92
3.4 Разработка математической модели начальной стадии разряда АИПД.....	104
3.5 Исследование условий возникновения карбонизации рабочих поверхностей разрядного канала АИПД.....	109
Глава 4. Практическое применение результатов проведенных исследований	122

4.1 Анализ влияния конструкции разрядного канала на характеристики АИПД.	122
4.2 Применение результатов исследования начальной стадии разряда и проблемы карбонизации разрядного канала в конструкциях АИПД нового поколения.....	135
Заключение	147
Список сокращений и условных обозначений	149
Список литературы	151

Введение

Актуальность темы исследования

В настоящее время идёт бурное развитие направления малых (менее 500 кг согласно международной классификации [1]) космических аппаратов (МКА), пригодных для выполнения широкого круга задач, которые до недавнего времени были доступны лишь для космических аппаратов (КА), обладающих значительными массами (более 500 кг) [2, 3]. Данная тенденция объясняется новыми достижениями в микроэлектронике, появлением новых материалов и технологий, а также быстро растущим «потреблением информации»: интернет, телекоммуникации, данные о Земле (метеорология, картография), и прочее.

Снижение массово-габаритных характеристик КА позволяет выводить на околоземную орбиту одной ракетой-носителем одновременно от нескольких единиц до десятков МКА (в зависимости от массогабаритных параметров). Это могут быть МКА как функционирующие независимо друг от друга, и решающие различные задачи, так и аппараты, работающие совместно, составляющие распределенную организованную структуру, позволяющую решать задачи, недоступные одиночным КА.

Многие задачи, ставящиеся перед МКА, не могут быть решены без использования в системе управления движением двигательной установки (ДУ). Одиночным аппаратам, функционирующим на орбитах 250-500 км ДУ необходимы для парирования сопротивления набегающего потока. В случае построения группировки МКА, двигательные установки необходимы для поддержания взаимного положения аппаратов.

Часть аппаратов группировки может использоваться в качестве «холодного резерва», и вводиться в эксплуатацию по мере выхода из строя действующих аппаратов. Такое решение позволяет существенно снизить стоимость создания аппарата за счет снижения требований надежности. Однако, в этом случае встает вопрос увода с рабочих орбит МКА, отработавших свой ресурс или вышедших из строя на орбиту захоронения, либо затопления. Для решения этой задачи также необходимо использование ДУ.

Задача по сведению аппарата с орбиты для затопления, либо перевод на орбиту захоронения требует значительного суммарного импульса тяги, величина которого на порядок может превышать значения, необходимые для выполнения целевой задачи в течение назначенного срока эксплуатации.

Наиболее подходящими для использования в составе ДУ являются электрические ракетные двигатели (ЭРД) [5].

Обладая удельным импульсом тяги в несколько раз превышающим возможности ЖРД, ЭРД позволяют решать задачи обеспечения требуемых затрат характеристической скорости с использованием существенно меньшего количества топлива. Проигрывая в тяге, ДУ с ЭРД значительно выигрывают в полной массе, что является существенным фактором при выборе типа корректирующей ДУ (КДУ) для МКА с массами до 500 кг и сроком активного существования масштаба 5-8 лет.

Электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) для МКА должны удовлетворять следующим требованиям:

- малая потребляемая мощность (от единиц до 200 Вт);
- возможность регулирования тяги и потребляемой мощности в широких пределах без снижения эффективности рабочего процесса;
- высокая надежность;
- относительно низкая стоимость разработки и изготовления.

Суммарный импульс тяги ЭРДУ должен обеспечивать выполнение космическим аппаратом целевой функции, а также, при необходимости, увод его с орбиты после завершения срока активного существования.

Одним из типов ЭРД, удовлетворяющих указанным требованиям, являются абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД) [4]. АИПД в силу простоты принципиальной схемы и конструкции, а также достаточно высоких тягово-энергетических характеристик на режимах работы с малыми мощностями является одним из перспективных электроракетных двигателей малой мощности (ЭРД ММ) для решения задач управления движением МКА. Следует отметить, что в настоящее время при мощности системы электропитания МКА менее 200 Вт, использование в электроракетных двигательных установках АИПД для ряда важных задач, требующих высокоточные малые импульсы тяги при значительных значениях суммарного импульса тяг, практически не имеет альтернативы. Поэтому исследование рабочих процессов в АИПД с целью повышения их эффективности является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы диссертации

В настоящее время вопросам исследования АИПД и развития их конструкций посвящен довольно большой ряд экспериментальных, расчетно-теоретических и обзорных работ, например, [6...15]. В России и за рубежом создан ряд электромагнитных (ЭМПД) и электротермических (ЭТПД) абляционных импульсных плазменных двигателей [15], в том числе доведенных до стадии летных испытаний, разработаны основные принципы их

конструирования и методики их расчета. Тем не менее, во всех упомянутых работах отсутствуют сведения об исследованиях предпробойной (начальной) стадии электрического разряда, при этом подчеркивается необходимость дальнейшего совершенствования рабочих процессов в АИПД с целью улучшения массогабаритных характеристик, повышения удельных параметров, что позволит существенно расширить область применения ЭРД в составе малых космических аппаратов.

Объектом исследования является электромагнитный АИПД с энергией разряда свыше 40 Дж.

Предметом исследования является начальная стадия развития электрического разряда в АИПД и её влияние на геометрию разрядного канала и тягово-энергетические характеристики АИПД.

Целью диссертационной работы является повышение тягово-энергетических характеристик и уменьшение карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитного абляционного импульсного плазменного двигателя.

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

1. Выполнить экспериментальные и расчётно-теоретические исследования начальной стадии электрического разряда, тягово-энергетических характеристик и рабочих процессов электромагнитного АИПД.
2. Выполнить экспериментальные исследования условий возникновения карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитного АИПД и разработать решения, предотвращающие карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела и повышающие тягово-энергетические характеристики электромагнитного АИПД.
3. Получить экспериментальное подтверждение предотвращения карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

1. Установлен характер влияния предпробойных («темновых») процессов начальной стадии разряда на развитие электрического разряда и форму аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитных АИПД и разработана математическая модель темновой стадии разряда электромагнитного АИПД.
2. Разработан способ борьбы с карбонизацией и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД посредством изменения в процессе работы расстояния между аблируемыми поверхностями рабочего тела, на который получен Патент РФ.

3. Разработана и реализована геометрия разрядного канала, позволяющая предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела и обеспечивающая повышение тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД, на которую получен Патент РФ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан способ предотвращения карбонизации в электромагнитных АИПД посредством изменения расстояния между аблируемыми поверхностями рабочего тела в процессе работы, позволяющий создавать двигатели с регулируемые тягово-энергетическими характеристиками при постоянной потребляемой мощности.
2. Создана научно-теоретическая основа для разработки физико-математической модели расчёта геометрии разрядного канала электромагнитного АИПД, учитывающей начальную стадию разряда, что приведёт к значительному сокращению времени разработки новых АИПД за счёт существенного снижения времени «приработки» рабочего тела.
3. Разработана и апробирована геометрия разрядного канала, предотвращающая карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела и повышающая тягово-энергетические характеристики электромагнитных АИПД. Применение разрядного канала разработанной геометрии в экспериментальном образце ЭРДУ АИПД-250 позволило повысить удельный импульс тяги на 9% и снизить цену тяги на 4%, в опытном образце для предварительных испытаний АИПД-95М (разработки АО «НИИЭМ» для КА «Ионосфера-М») повысить суммарный импульс тяги на 20%, среднюю тягу на 15% и предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела.

Методология и методы диссертационного исследования

В исследовании применялись экспериментальные методы и методы математического моделирования. Экспериментально определялись осциллограммы разрядного тока и тягово-расходные характеристики лабораторных образцов АИПД. Проводились экспериментальные исследования рабочих процессов АИПД оптическими методами, в том числе спектроскопическими, интерферометрическими методами и методами сверхскоростной фоторегистрации. Характеристики тягоизмерительного устройства и начальная («темновая») стадия разряда анализировались с помощью специально разработанных математических моделей реализованных в среде аналитических вычислений MAPLE 12.

Личный вклад соискателя

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

1. проведен анализ современного состояния исследований ЭРД, предназначенных для малых космических аппаратов;
2. обоснованы преимущественные области применения АИПД;
3. сформулированы наиболее важные проблемы, требующие решения на современном этапе развития АИПД;
4. рассмотрены различные варианты тягоизмерительных устройств, определены ТИУ, пригодные для экспериментальных исследований и испытаний АИПД;
5. создано усовершенствованное тягоизмерительное устройство для АИПД со сниженным уровнем помех в регистрируемом сигнале;
6. экспериментально исследовано влияние конфигурации и температуры поверхностей разрядного канала АИПД на процессы карбонизации шашек плазмообразующего вещества;
7. проведены экспериментальные исследования рабочих процессов АИПД, в особенности в начальной стадии разряда оптическими методами диагностики;
8. выявлена зависимость между начальной стадией разряда и конфигурацией разрядного канала АИПД;
9. предложен модернизированный по результатам исследований разрядный канал АИПД с новой геометрией;
10. сформулированы и внедрены рекомендации для модернизации ЭРДУ АИПД-250 и АИПД-95М, позволившие улучшить их характеристики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель начальной стадии разряда, результаты расчётов и их сравнения с результатами экспериментов.
2. Способ предотвращения карбонизации и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД при постоянной потребляемой мощности.
3. Геометрия разрядного канала, предотвращающая карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитных АИПД.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- обоснованным выбором существующих методик измерений и физико-математических моделей рабочих процессов;
- соответствием измеренных характеристик расчётным значениям;
- непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов;

- результатами неоднократного обсуждения положений и выводов по итогам работы на отечественных и международных конференциях, совещаниях с участием специалистов-экспертов.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы обсуждались на семинарах НИИ ПМЭ МАИ и каф. 208 МАИ, а также докладывались на российских и международных конференциях: 1) 7-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2008» (Москва, Россия, 2008 г. Исследование распределения концентрации электронов в разряде абляционного импульсного плазменного двигателя); 2) 3d International European Conference for Aerospace Science (Версаль, Франция. 6-9 июля 2009. Research of laboratory small forces measurement system); 3) 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2011» (Москва, Россия, 2011 г. The ablative pulsed plasma thruster (APPT) with the divided mechanism of plasma ionization and acceleration); 4) IX Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2012) (Украина, Алушта, 25 – 31 мая 2012 г. Особенности создания и применения абляционных импульсных плазменных двигателей в составе систем управления движением малых и сверхмалых космических аппаратов); 5) 15-я Международная конференция "Авиация и космонавтика" (Москва, Россия, 2016 г. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей нового поколения); 6) 69th International Astronautical Congress (IAC) (Bremen, Germany, 1-5 October 2018. Development of electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI); 7) The 7th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application (Германия, Гиссе, 2018. 1) Electric Propulsion Thrusters of Next Generation Developed at RIAME MAI for Small Satellites. 2) Investigation of the initial stage of the electric discharge along the surface of the consumable dielectric in an ablative pulsed plasma thruster with a lateral feed of the propellant); 8) XLIV Академические чтения по космонавтике (Москва, Россия, 2020 г. Выбор системы измерения тяги импульсного источника плазмы); 9) 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, Россия, 2020 г. Разработка и испытания ЭРД малой мощности для МКА ДЗЗ на основе абляционного импульсного плазменного двигателя).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 15 работ, получено 2 патента на изобретения.

Объем и структура работы

Работа представляет собой рукопись объёмом 159 страниц печатного текста, включая 120 рисунков, 16 таблиц, а также 102 библиографические ссылки. Она включает в себя введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список литературы.

Глава 1 Современное состояние разработок в области ИПД

1.1 Существующие типы электроракетных двигателей

Основные типы электроракетных двигателей (ЭРД), классифицированные по механизму ускорения рабочего вещества, показаны на Рис. 1 [5].



Рис. 1. Типы электроракетных двигателей [5]

В электротермических двигателях (ЭТД) энергия истекающего газа определяется его температурой перед соплом. К двигателям этого класса относятся термокаталитические (ТКД), электронагревные (ЭНД) и электродуговые (ЭДД) двигатели.

Двигатели с электромагнитным ускорением или магнито-плазодинамические (МПД) принято подразделять на два подкласса: двигатели с собственным магнитным полем разрядного тока – торцевые (ТСД) или коаксиальные сильноточные двигатели – и торцевые двигатели с внешним магнитным полем, называемые в отечественной литературе торцевыми холловскими двигателями (ТХД).

К собственно холловским относят двигатели с замкнутым дрейфом электронов двух разновидностей – стационарные плазменные двигатели (СПД) и двигатели с анодным слоем (ДАС) [16, 17].

К электростатическим относятся ионные (ИД) и коллоидные двигатели с различными механизмами ионизации рабочего вещества [18, 19, 20].

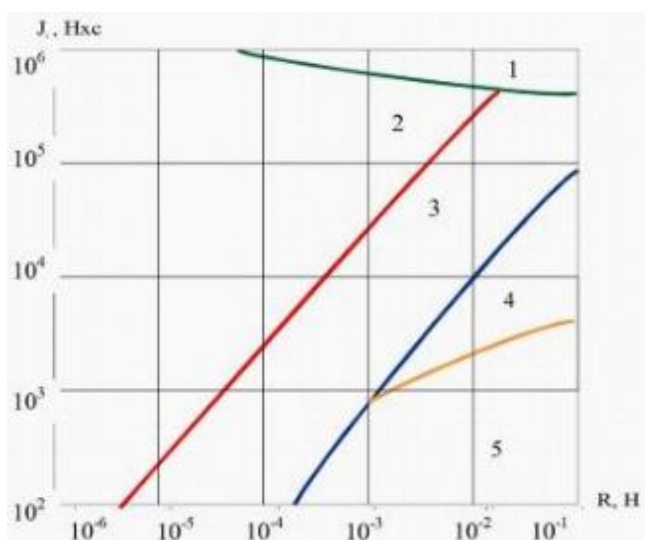
Импульсные плазменные двигатели (ИПД), в силу большой специфики рабочих процессов, обычно выделяют в отдельный класс [5, 11, 13]. Следует отметить, что в импульсных плазменных двигателях может иметь место как электротермический, так и электромагнитный или, чаще, смешанный механизмы ускорения плазмы [15].

1.2 Области применения электроракетных двигательных установок различного типа. Основные полетные задачи

Главным условием для применения ЭРД того или иного типа в составе ЭРДУ МКА является возможность их работы в условиях ограниченной потребляемой мощности. В данной работе в качестве порогового значения принята потребляемая мощность масштаба 100...150 Вт. Этому условию могут удовлетворять следующие типы ЭРД, доведенные до стадии летных испытаний и целевого функционирования в космических условиях:

- в классе электротермических двигателей – термокаталитические двигатели на гидразине и электронагревные двигатели на аммиаке;
- в классе электромагнитных двигателей – холловские двигатели (СПД и ДАС) на инертных газах;
- в классе электростатических двигателей – ионные двигатели малой мощности;
- в классе импульсных двигателей – абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД), как правило, с тефлоном (фторопласт-4) в качестве плазмообразующего вещества.

В работе [21] сделана попытка, проанализировав опубликованные данные, определить предпочтительные области применения ЭРД различных типов. Результаты анализа показаны на Рис. 2. Пользуясь приведенной диаграммой, зная полученные из проектного расчета космического аппарата и его целевой задачи, величины необходимой тяги R и суммарного импульса тяги J_{Σ} , можно приблизительно определить целесообразность применения того или иного типа двигательной установки в зависимости от поставленной задачи.



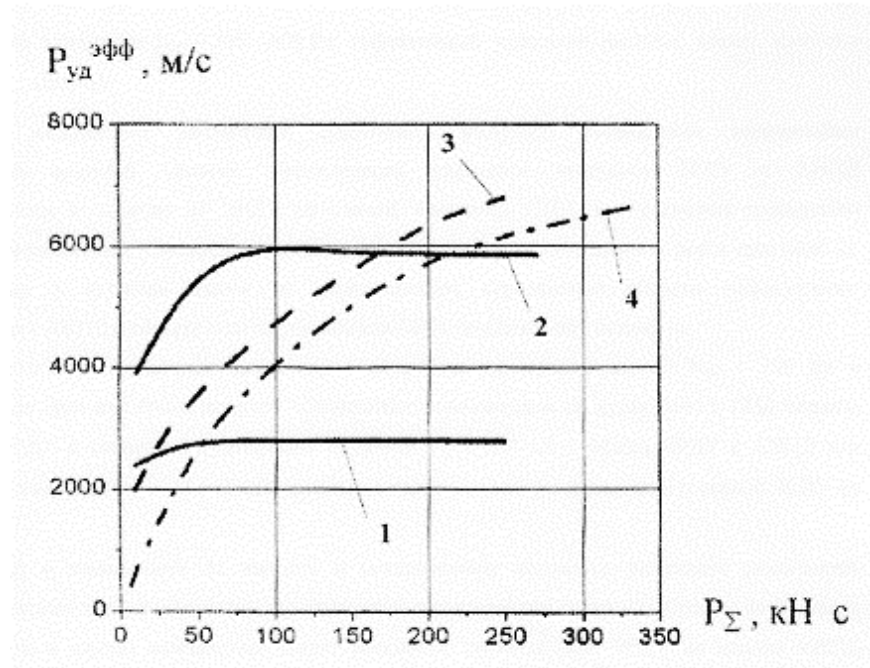
1 – ИД; 2 – ИД и СПД; 3 – СПД и АИПД; 4 – АИПД и ЭТД; 5 – ЭТД

Рис. 2. Предпочтительные области применения ЭРД [21]

Сравнительный анализ эффективности использования импульсных плазменных двигателей в составе системы управления МКА в сопоставлении с альтернативными

вариантами ЭРД, проведенный в работе [22], позволяет выделить область суммарного импульса, в которой АИПД обеспечивают наименьшие затраты массы на электроракетную двигательную установку.

На Рис. 3 приведена заимствованная из работы [22] зависимость эффективного удельного импульса тяги абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД) и стационарных плазменных двигателей (СПД) от суммарного импульса тяги.



1 - ЭРДУ с двумя АИПД первого поколения мощностью по 120 Вт каждый; 2 - ЭРДУ с двумя АИПД нового поколения мощностью по 100 Вт каждый; 3- ЭРДУ с двумя СПД мощностью по 300 Вт каждый; 4 - ЭРДУ с двумя СПД мощностью по 100 Вт каждый.

Рис. 3. Зависимость эффективного удельного импульса тяги АИПД и СПД от суммарного импульса тяги [22]

Под эффективным удельным импульсом тяги $P_{уд}^{эфф}$ понимается отношение суммарного импульса тяги P_{Σ} к массе ЭРДУ $M_{эрду}$, т.е. $P_{уд}^{эфф} = P_{\Sigma}/M_{эрду}$. Как видно из Рис. 3, АИПД нового поколения имеют более высокий уровень энергетических параметров и низкие значения массы ЭРДУ по сравнению с СПД при суммарном импульсе тяги $P_{\Sigma} \leq 70 \dots 80$ кН·с.

Эта область суммарного импульса тяги для АИПД характеризуется ростом эффективного удельного импульса тяги и более высокими его значениями по сравнению с СПД.

В области суммарного импульса тяги $P_{\Sigma} \leq 50$ кН·с для АИПД с частотой импульсов $f=2$ Гц и потребляемой электрической мощностью до $N_{эл} < 200$ Вт эффективный удельный импульс тяги достигает уровня $P_{уд}^{эфф} = 5000 \dots 6000$ м/св то время как для ЭРДУ с СПД при

потребляемой мощности $N_{эл} = 300...600$ Вт эффективный удельный импульс тяги имеет значения $P_{уд}^{эфф} = 3000 ... 4000$ м/с.

При дальнейшем увеличении суммарного импульса тяги посредством наращивания двигательных модулей уровень эффективного удельного импульса тяги ЭРДУ с АИПД стабилизируется в отличие от ЭРДУ на основе, например, СПД, где с ростом суммарного импульса тяги эффективный удельный импульс имеет тенденцию непрерывного роста (Рис. 3). Этот фактор и является одним из определяющих ограничение области эффективного использования АИПД в составе систем управления МКА по массовому критерию.

Импульсные плазменные двигатели с потребляемой мощностью до $N_{эл}=100$ Вт в количестве до трех или более модулей обеспечивают наименьшие по сравнению с СПД затраты массы на ЭРДУ в диапазоне суммарного импульса тяги $P_{\Sigma} \leq 220$ кН·с. Масса ЭРДУ с АИПД для суммарного импульса тяги $P_{\Sigma} = 40...60$ кН·с примерно вдвое меньше по сравнению с массой ЭРДУ на базе СПД.

Приведенные на 0 и Рис. 3 диаграммы показывают, что выбор типа ЭРДУ для МКА непрост и должен определяться на этапе эскизного проектирования задачей, выполняемой космическим аппаратом, и назначением двигательной установки. Ниже рассмотрены две типовые задачи, которые могут выполняться электроракетной двигательной установкой малой мощности – от десятков Вт до 100 Вт и несколько выше: поддержание низкой околоземной орбиты и угловая стабилизация космического аппарата.

Одной из типовых задач ЭРДУ малой мощности является поддержание относительно низкой круговой околоземной орбиты МКА. Подобные задачи, применительно к АИПД, решались в ряде работ, например, в [15, 23].

Сила аэродинамического сопротивления F_a , действующая на космический аппарат, движущийся по орбите со скоростью V , равна [24]:

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

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 (МСА);

C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления (для свободномолекулярного течения газа, имеющего место при плотностях, соответствующих верхним слоям атмосферы ($h > 200$ км), $C_d \approx 2,3$ [24];

S_m – площадь миделевого сечения космического аппарата.

Скорость космического аппарата, в простейшем случае круговой орбиты высотой h , определяется формулой [24]

$$V^2 = G \cdot M / (R_3 + h), \quad (2)$$

где G – гравитационная постоянная; M – масса Земли; R_3 – средний радиус Земли.

Характеристическая скорость V_x , необходимая для поддержания условной круговой орбиты высотой h в течение времени T , равна:

$$V_x = F_a \cdot T / m, \quad (3)$$

где m – масса космического аппарата.

На Рис. 4 представлены расчетные зависимости усредненной, в соответствии с МСА, силы аэродинамического сопротивления F_a и характеристической скорости V_x , необходимой для поддержания круговой орбиты условного малоразмерного спутника массой $m=100$ кг и с площадью миделевого сечения 1 м^2 от высоты орбиты h в течение одного года ($T \approx 3,16 \cdot 10^7$ с). В расчете принят коэффициент аэродинамического сопротивления $C_d = 2,3$.

Характеристическая скорость связана с параметрами двигательной установки формулой Циолковского:

$$V_x = J_{sp} \cdot \ln[m / (m - m_{рт})], \quad (4)$$

где J_{sp} – удельный импульс тяги (среднемассовая скорость истечения) двигательной установки; m – полная масса МКА (с запасом рабочего тела); $m_{рт}$ – запас рабочего тела.

Для электроракетных двигательных установок, как правило, $m_{рт} \ll m$, поэтому без ущерба для точности последнюю формулу можно заменить более простым соотношением:

$$V_x = J_{sp} \cdot m_{рт} / m \text{ или } V_x = J_{\Sigma} / m, \quad (5)$$

где $J_{\Sigma} = J_{sp} \cdot m_{рт} = m \cdot V_x$ – суммарный импульс тяги двигательной установки.

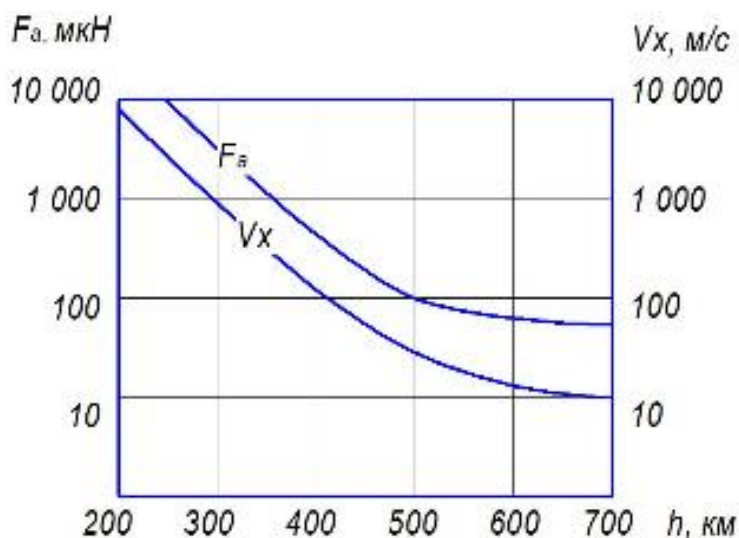


Рис. 4. Расчетные зависимости силы аэродинамического сопротивления F_a и характеристической скорости V_x МКА ($m = 100$ кг, $S_m = 1 \text{ м}^2$) от высоты круговой орбиты h , в течение одного года [6]

На Рис. 5 показаны расчетные зависимости необходимого суммарного импульса тяги J_{Σ} от времени поддержания низкой круговой орбиты условного МКА массой 100 кг и площадью миделевого сечения 1 м^2 для различных высот h низкой круговой околоземной орбиты.

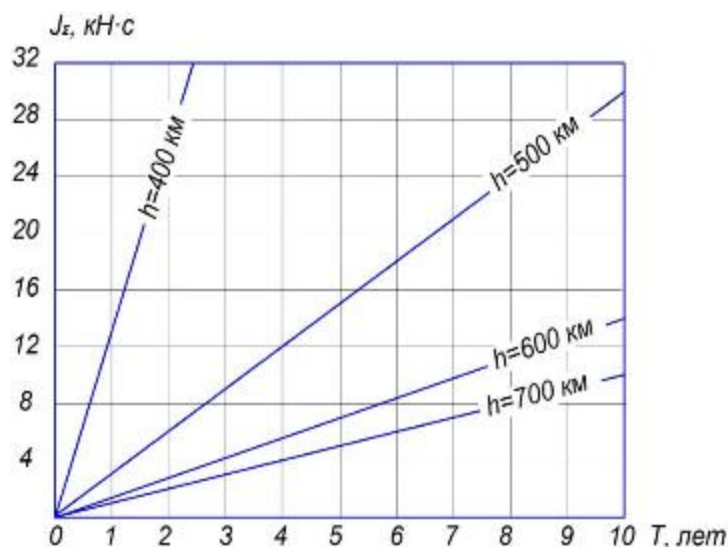


Рис. 5. Расчетные зависимости необходимого суммарного импульса тяги ЭРДУ от заданного времени поддержания низкой круговой орбиты условного МКА ($m = 100 \text{ кг}$, $S_m = 1 \text{ м}^2$) для различных высот орбиты h [8]

Известно, что Международная стандартная атмосфера не рекомендуется для баллистических расчетов орбит искусственных спутников Земли, так как не учитывает существенных флуктуаций плотности верхних слоев атмосферы в зависимости от времени суток, времени года и солнечной активности. Однако такой упрощенный подход позволяет получить оценочные значения минимально необходимой тяги ЭРД и потребного суммарного импульса тяги ЭРДУ для поддержания орбиты заданной высоты и вполне допустим для оценки возможности применения двигательной установки того или иного типа.

Более сложные баллистические расчеты, учитывающие флуктуации атмосферы, проведены в работе [24]. Были получены минимальная, максимальная и средняя оценки среднегодового суммарного импульса тяги ЭРДУ, необходимого для поддержания круговой орбиты различной высоты h . Результаты расчетов представлены в Табл. 1 и вполне согласуются с приближенными кривыми, представленными на Рис. 4.

Табл. 1 Суммарный импульс тяги ЭРДУ за год полета, необходимый для поддержания круговой орбиты (площадь миделя МКА – $1,0 \text{ м}^2$), кН·с [25, 26]

Высота орбиты, км	Минимальная оценка	Максимальная оценка	Средняя оценка
250	97.58	224.77	173.54
300	25.59	79.59	57.34
350	7.97	32.55	22.29

Высота орбиты, км	Минимальная оценка	Максимальная оценка	Средняя оценка
400	2.76	14.61	9.62
500	0.39	3.36	2.07
600	0.06	0.90	0.54
800	0.06	0.12	0.09

Из данных, представленных на Рис. 5 и в Табл. 1, видно, что необходимый суммарный импульс тяги для поддержания орбиты МКА высотой от 400 до 700 км в период от 1 до 10 лет находится в диапазоне от 1 до 30 кН·с. Если ставится задача увода аппарата с орбиты после окончания срока его активного существования, то необходимый суммарный импульс тяги увеличивается примерно вдвое. При этом осредненная сила аэродинамического сопротивления МКА с площадью миделевого сечения 1 м^2 на высоте 400 км и выше не превышает 0,4 мН, что позволяет использовать для поддержания этих орбит различные ЭРД с тягой не менее 1 мН. Отношение осредненной силы аэродинамического сопротивления к располагаемой тяге приблизительно равно отношению времени работы ЭРДУ на каждом витке орбиты к периоду орбиты – относительному моторному времени.

Второй задачей, которая может быть возложена на ЭРДУ МКА, является ориентация и угловая стабилизация аппарата. Известны реактивные, маховичные и гиросиловые системы ориентации космических аппаратов, при этом имеет место тенденция постепенного отказа от применения реактивных систем, требующих расхода рабочего тела [27]. Особенностью маховичных и гиросиловых систем ориентации является то, что они требуют периодического сброса накопившегося кинетического момента, для чего необходима дополнительная система разгрузки системы ориентации, которая, в свою очередь может быть реактивной, магнитной (использующее магнитное поле Земли) и, реже, гравитационной и аэродинамической. В настоящее время для низкоорбитальных МКА наиболее широко применяются маховичные и гиросиловые системы ориентации в сочетании с магнитной системой разгрузки. Такое построение системы ориентации не требует расхода рабочего тела для управления движением МКА относительно его центра масс. Проблемы, связанные с повышенным потреблением электрической мощности и дополнительной массой электромеханических систем ориентации успешно решены. Электромеханическая система ориентации на маховиках с магнитной разгрузкой применена даже на таком легком аппарате, как МКА научного назначения «Чибиc-M» массой всего 42 кг [28]. Тем не менее, реактивные системы ориентации с применением импульсных плазменных двигателей также отличаются малой массой и чрезвычайно низким расходом рабочего тела. Первое применение АИПД для системы ориентации солнечной батареи состоялось в конце 1964 г. на КА «Зонд-2», созданном РКК «Энергия» [29].

В тех случаях, когда требуется очень точная ориентация МКА, например, для спутников для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), реактивные системы ориентации с

импульсными ЭРД, имеющими очень малый единичный импульс тяги, наиболее востребованы. В частности, реактивная система ориентации с АИПД была применена на аппарате ДЗЗ ЕО-1 со сроком активного существования около 10 лет [30]. В данном случае она работала параллельно с электромеханической системой ориентации, обеспечивая точное наведение оптических приборов наблюдения. Необходимый для этого суммарный импульс тяги одного модуля ЭРДУ был небольшим – всего 0,46 кН·с.

В то же время следует отметить, что, преимущественной областью применения ЭРДУ на базе ИПД является поддержание малоразмерных космических аппаратов с мощностью системы электропитания менее 100 Вт и со сроком активного существования от 1 года до 10 лет на низких околоземных орбитах высотой от 400 до 700 км. В этой области импульсные плазменные двигатели пока что превосходят стационарные различных типов по основным для ЭРДУ удельным характеристикам, а также имеют существенные преимущества по стоимости в производстве и эксплуатации. Другая область, применения ЭРДУ более узка, но в ней импульсные плазменные двигатели практически находятся вне конкуренции по точности выдаваемого импульса тяги – это системы точной ориентации малых космических аппаратов.

1.3 Типы импульсных плазменных двигателей

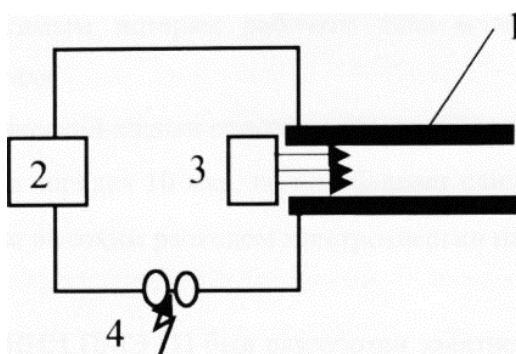
По преобладающему механизму ускорения плазмы импульсные плазменные двигатели (ИПД) разделяются на электротермические (тепловые) - ЭТИПД и электромагнитные – ЭМИПД. В реальных двигателях, как правило, работают оба механизма ускорения, поэтому строгого деления ИПД на ЭТИПД и ЭМИПД нет.

По устройству разрядного канала ИПД подразделяются на два типа: коаксиальные и с рельсовой геометрией разрядного канала. По типу используемого рабочего тела (РТ) на: ИПД с газообразным РТ, ИПД с жидким РТ, ИПД с твердым РТ (металлы или диэлектрики). В настоящее время в разных странах мира ведутся работы по созданию ИПД различных типов, как по конструкции разрядного канала, так и по типу рабочего тела [31, 32, 33].

Общим для всех типов ИПД является использование в качестве источника энергии конденсаторного накопителя, и разрядного канала, состоящего из пары электродов и расположенного между ними, либо подающегося в межэлектродный промежуток, рабочего тела. Индуктивные накопители энергии в ИПД космического назначения не используются из-за большой массы.

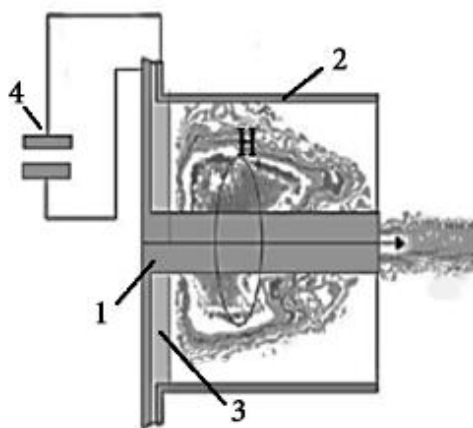
По фазовому состоянию плазмообразующего вещества известны импульсные плазменные двигатели на газе, жидком и твердом рабочем теле. В газовых и жидкостных ИПД рабочее вещество запасается и подается в разрядный канал по стандартной схеме – в зазор между электродами. Существенное отличие от систем подачи стационарных двигателей заключается в необходимости использования быстродействующих клапанов (время открытия до 10 мкс) с

очень жесткими требованиями к ресурсу по числу включений (10^7 и более) для ИПД с газообразными рабочими телами, а для жидкостных двигателей еще и специальных дозаторов рабочего тела, устанавливаемых непосредственно на входе в разрядный канал. В двигателях абляционного (эрозионного) типа подача рабочего вещества в ускорительный канал и его дозирование осуществляются за счет абляции рабочего вещества под действием лучистых и тепловых потоков, поступающих из зоны разряда на поверхность рабочего вещества. Этот процесс идет, как правило, с очень большим излишним расходом рабочего тела и трудно поддается контролю. Однако конструктивная простота и высокая надежность абляционных двигателей вызывают значительный интерес к ним. На Рис. 6 и Рис. 7 представлены традиционные принципиальные схемы ИПД.



1- электроды, 2 - источник питания, 3 - система подачи рабочего вещества, 4 - коммутатор

Рис. 6. Принципиальная схема ИПД с рельсовой геометрией электродов



1, 2 – электроды, 3 – рабочее тело, 4 – система электропитания

Рис. 7. Принципиальная схема ИПД с коаксиальной геометрией электродов

Также известны двухступенчатые конструкции ИПД как с рельсовой, так и коаксиальной конфигурацией разрядного канала [34, 35]. Однако, они существуют только в виде лабораторных образцов и в силу сложности конструкции пока не достигли стадии практического применения.

В США проводились эксперименты с безэлектродным импульсным плазменным двигателем индукционного типа [36]. Было показано, что в двигателях подобного типа приемлемый тяговый к.п.д более 5% достижим только при энергии разряда выше 10 кДж.

1.4 ИПД с газообразным рабочим телом

Основной проблемой такого двигателя является сложность создания быстродействующего и высокоресурсного газового клапана [37]. Требования, предъявляемые к газовым клапанам для ИПД, следующие:

- продолжительность действия клапана должна в идеальном случае соответствовать длительности электрического разряда АИПД и находиться в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков микросекунд;
- затраты энергии, на единицу массы рабочего тела, не должны превышать 10^8 Дж/кг [37];
- ресурс не менее 10^7 включений, что в большинстве случаев применения АИПД является достаточным.

Ни один из разработанных типов клапанов, представляющих собой быстродействующие электромеханические преобразователи, не соответствует предъявляемым требованиям. Так, существующие электромагнитные клапаны обеспечивают быстродействие только на уровне (5000-10000) мкс, что совершенно недостаточно не только для двигателей с электромагнитным механизмом ускорения, имеющих типичное разрядное время на три порядка меньше, но и для ИПД с электротермическим механизмом, типичные времена разрядного процесса которого составляют от нескольких десятков до нескольких сотен мкс. Такое несовпадение времен приводит к недопустимым потерям рабочего тела (газа) и к чрезвычайно низкой эффективности двигателя. Индукционно-динамические клапаны могут обеспечить существенно лучшее быстродействие порядка сотен микросекунд, но, по сравнению с электромагнитными

Электродинамические и индукционно-динамические клапаны способны обеспечить требования по быстродействию, имея активный период порядка 10 мкс, но обычно обладает недостаточным ресурсом ($\sim 10^4$ включений) и слишком высоким расходом электроэнергии на кг рабочего тела $\sim 10^9$ Дж/кг, что объясняется низким к.п.д. по сравнению с электромагнитными механизмами.

Первым импульсным плазменным ускорителем с быстродействующим газовым клапаном индукционно-динамического типа была так называемая «пушка Маршалла» [38], известная с 1960 г. Пушка Маршалла работала на водороде, а энергопотребление ее клапана составляло 50-200 Дж [39], что делало ее применение в качестве плазменного двигателя небольшой мощности невозможным.

В НИИ ПМЭ МАИ был создан и испытан ИПД (Рис. 8), использующий газообразное рабочее тело (азот или водород) [37], он был сагрегитирован с быстродействующим дисковым

электромагнитным клапаном, обеспечивавшим время напуска газа в диапазоне 100-200 мкс, что соответствовало длительности электрического разряда ИПД. При энергии разряда 20 Дж тяговая эффективность ИПД с газовым клапаном составляла 5-6%.

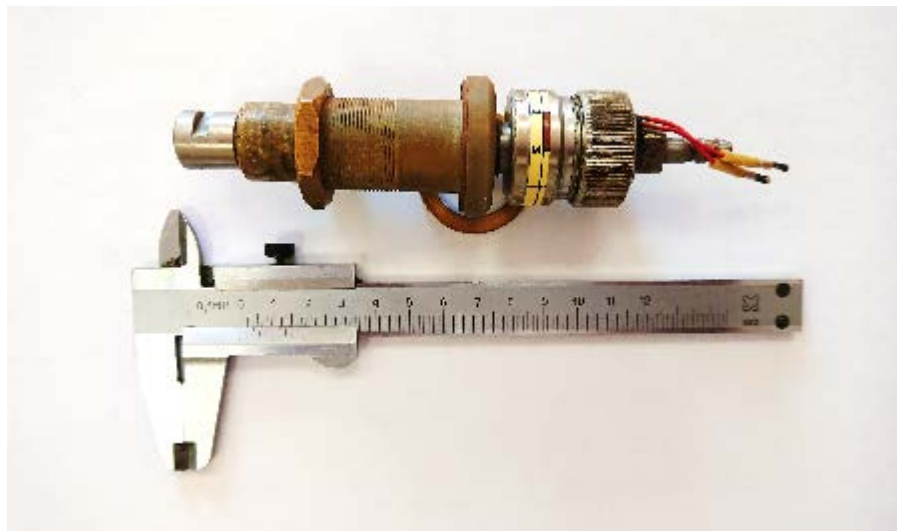


Рис. 8. ИПД с газовым клапаном НИИ ПМЭ МАИ

В США с 70-х годов прошлого века ведутся исследования и разработки ИПД с газообразным рабочим телом [40], исследовались образцы с энергиями разряда от нескольких десятков до нескольких тысяч джоулей. В качестве рабочих тел исследовались различные газы: азот, аргон, ксенон.

1.5 ИПД с жидким рабочим телом

Известны две принципиально различные схемы хранения и подачи жидких рабочих тел (металлических и диэлектрических) в канале ИПД:

- вытеснительная схема подачи, включающая в себя, баки с рабочим телом, трубопроводы, клапаны, редукторы;
- капиллярные системы подачи [33, 41].

Поскольку для работы ИПД с вытеснительной системой подачи РТ требуются весьма малые расходы рабочего вещества ($\sim 10^{-7}$ кг) за импульс, то актуальной является задача обеспечения стабильной работы системы подачи, зазоры в клапанах которой должны составлять доли миллиметра. Увеличение зазоров приводит к появлению колебаний давления в трубопроводах и, следовательно, нестабильности расхода рабочего тела. Для устранения данного явления на выходе системы подачи должны устанавливаться системы дозирования рабочего тела, позволяющие решать проблему стабилизации расхода и согласования ввода массы и энергии в разрядный канал.

С учетом значительной сложности конструкции, технологии изготовления и управления ИПД с жидким рабочим телом, а также сравнительно низкой средней тяги, создаваемой при мощности масштаба 1 кВт, (а именно такие двигатели, рассматривались в качестве

перспективных в 60-е - 70-е годы), после нескольких лет исследований дальнейшее проведение работ по данному двигателю было признано нецелесообразным.

Гораздо более перспективными для создания летных образцов ДУ представлялись двигатели с капиллярными системами подачи (Рис. 9). Значительные усилия были затрачены на исследования и лабораторную отработку ИПД с различными типами таких систем.

Капиллярные системы подачи очень хорошо зарекомендовали себя в лабораторных условиях, обеспечивая равномерную, хорошо дозированную и согласованную с импульсом тока подачу рабочего тела в канал и, тем самым, высокую эффективность рабочего процесса двигателя. Однако проверки таких систем на стендах, имитирующих перегрузки при выведении КА на орбиту, выявили, что капиллярных сил недостаточно для удержания жидкости при перегрузках. В результате рабочее тело под влиянием перегрузок выливалось из капилляров в разрядную камеру.



Рис. 9. ИПД МАИ с капиллярной системой подачи жидкого рабочего тела

В реальной ситуации запуска ДУ с капиллярной системой подачи на орбиту повлечет существенное усложнение конструкции системы подачи РТ, либо проведение мероприятий по специальной подготовке запуска, связанных с необходимостью замораживания системы или покрытия ее поверхности герметичной пленкой, которая должна быть удалена перед началом работы. Реализация таких предложений усложняет технологию подготовки ИПД к работе на орбите. Ввиду отсутствия специального оборудования для полномасштабных наземных испытаний капиллярных схем, было признано нецелесообразным продолжение работ по данному направлению в России, однако, за рубежом подобные исследования в настоящее время продолжаются [41, 42].

Из всех рассмотренных типов импульсных плазменных двигателей наиболее просты по конструкции, технологичны и имеют высокую надежность абляционные двигатели. Поэтому к ним наблюдается постоянный интерес.

1.6 Начальный этап развития АИПД в России и в мире

Первые образцы АИПД прошли летные испытания в 60-х годах. В 1964 году на борту автоматической межпланетной станции "Зонд-2" в качестве исполнительных органов систем ориентации солнечных батарей впервые в мире были применены импульсные плазменные двигатели с электротермическим ускорением плазмы, созданные в Институте атомной энергии имени И.В. Курчатова под руководством В.А. Храброва [15, 29]. Плазменная система ориентации на основе АИПД, представленного на Рис. 10, успешно прошла испытания в течение 70 минут на расстоянии 5 400 000 км от Земли. В 1968 году на борту американского спутника LES-6 успешно работал созданный в США АИПД с электромагнитным ускорением плазмы [43]. В обоих случаях в качестве плазмообразующего вещества использовался фторопласт-4 (тефлон). Успешные летные испытания первых АИПД способствовали дальнейшему расширению работ в этой области.

Дальнейшие работы по разработке ИПД из ИАЭ им. И.В. Курчатова были переданы в ОКБ «Факел». Первенец космической продукции «Факела» – импульсная двигательная установка «Глобус» стартовала в 1968 году с космодрома Плесецк [44]. В 70-ые годы XX века блоки этой установки использовались в МАИ в серии ракетных геофизических экспериментов по программе «Ариель» [39].

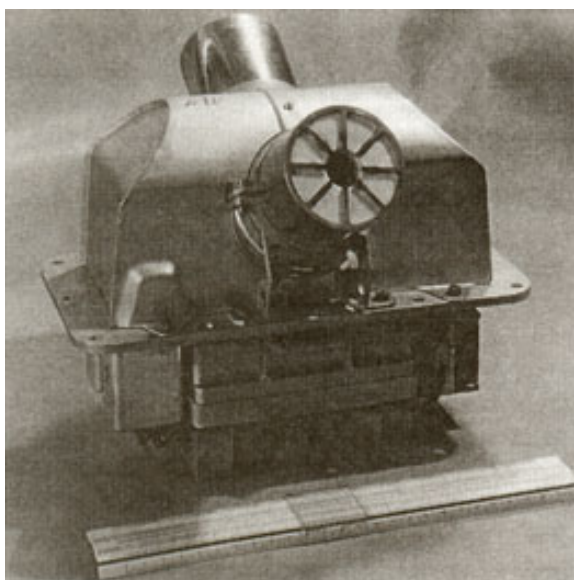


Рис. 10. Блок двигателей плазменной системы ориентации по тангажу автоматической межпланетной станции «Зонд-2» (1964) [39]

Важной для данного этапа была работа [43], в которой были приведены результаты расчетно-экспериментального анализа рабочего процесса АИПД. Основным прикладным

результатом анализа были данные о балансе энергии в двигателе, показавшие значительный процент потерь энергии в типичном накопителе (~30%), что говорило о его слишком большом внутреннем сопротивлении и указывало на еще один болезненный узел проблем, возникающих при решении задачи создания высокоэффективного АИПД: быстрый перегрев накопителя энергии при частотной работе.

Несмотря на успешный запуск в США ДУ с АИПД в 1968 г. в работе [45] отмечались низкие значения тяги и тяговой эффективности двигателя (<10%) (согласно более точным оценкам ~4%) и необходимость их существенного повышения. В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния параметров цепи электропитания (R , L , C) на характеристики двигателя (единичный и удельный импульсы, тяговую эффективность).

Был сделан принципиально верный вывод о необходимости снижать значения индуктивности, емкости и активного сопротивления цепи, одновременно указывалось на трудности реализации данных общих рекомендаций.

Работа [46] является одной из немногих работ в США, посвященных исследованию АИПД с боковой подачей рабочего вещества в разрядный канал. В работе отмечаются такие преимущества схемы, как возможность изменения характеристик АИПД (и даже механизма ускорения плазмы) сближением или удалением шашек. Показано также, что схема с боковой подачей шашек позволяет существенно улучшить соотношение единичного и удельного импульсов тяги, чего практически невозможно добиться в схеме с торцевой подачей. Одним из неустранимых недостатков последней является слишком малый для решения многих практических задач управления орбитами МКА единичный импульс тяги. Следует отметить, что, несмотря на название, работа не содержит конкретных предложений по повышению характеристик АИПД. В работе обращает на себя внимание раздел, посвященный карбонизации рабочих поверхностей тефлоновых шашек. Показано, что, в отличие от АИПД с торцевой подачей тефлона, в рассматриваемой двигателе после ~10000 разрядных импульсов наблюдались области, покрытые углеродом. Методом аналогового моделирования исследовались конфигурации электрического поля в канале двигателя. В результате его оптимизации область карбонизации шашек удалось значительно уменьшить, но не уничтожить полностью. Между тем, наличие на рабочих поверхностях шашек даже незначительных областей, покрытых углеродом, неизбежно приводит к изменению характеристик АИПД с последующей потерей его работоспособности [47, 48].

Представляется, что нерешенные проблемы с карбонизацией рабочих поверхностей шашек в двигателе с боковой подачей рабочего вещества во многом были причиной предпочтения, отдаваемого в США схеме АИПД с торцевой подачей [46].

В работе [46] впервые обнаружено и описано носящее универсальный характер для рельсовых АИПД отклонение вектора тяги от средней линии разрядного канала вследствие действия эффекта Холла. Было показано, что угол между вектором тяги АИПД и средней линией канала, как правило, лежит в пределах $5-6^\circ$. Этот угол практически постоянен для всех двигателей с каналом рельсового типа.

Следует отметить значительный вклад специалистов США в разработку концепции и конструктивных схем АИПД с торцевой [51], а на начальном этапе исследований и с боковой [52, 53] системами подачи рабочего вещества. Ими были разработаны конструктивные, технологические и функциональные требования к ключевым элементам двигателя: разрядному каналу с системой хранения и подачи тефлоновых шашек, накопителю энергии, системе питания и управления, блоку инициирования разряда, не утратившие значения и в наши дни. В работе [52] представлен реализованный в виде демонстрационной модели, абляционный ИПД, предназначенный для поддержания точки стояния геостационарного спутника по линии "Север-Юг". Разрядная энергия АИПД составляла 750 Дж, а расчетный суммарный импульс более $1 \cdot 10^5$ Н·с. Единичный импульс тяги такого двигателя составлял ~ 22 мН·с, полный тяговый КПД $\sim 25\%$. Планировавшиеся летные испытания не состоялись вследствие пробоя конденсатора в ходе наземных испытаний. Важным результатом длительных испытаний была установленная экспериментально стабильность единичного импульса тяги.

В работе [53] описаны преимущества и недостатки АИПД с торцевой, боковой и комбинированной системами подачи (рабочее вещество подается как с торца, так и с боков канала), а также варианты их конструктивного исполнения.

Удачный запуск МКА LES-6 с АИПД, подтолкнул к продолжению работы в направлении создания летных образцов двигателя и их натурных испытаний. Так, в работах [54, 56] представлены данные о разработке АИПД МКА LES-8/9 и результаты его стендовой отработки. Запасаемая энергия двигателя составляла 20 Дж вместо 5 Дж у предыдущей модели.

Согласно данным работы [55] два двигателя в процессе работы произвели более $3,4 \cdot 10^7$ импульсов каждый. Эксперимент был остановлен, т.к. указанная наработка значительно превысила требуемую. АИПД LES-8/9 успешно прошел все виды механических и климатических испытаний. Однако согласно [56] при совместной работе на стенде трех двигателей данного типа при достижении нижнего значения диапазона температуры -15°C отказал один двигатель, а при достижении верхнего диапазона значения температуры $+55^\circ\text{C}$ отказал еще один. По этой причине на МКА LES-8/9 была установлена ДУ на базе гидразиновых двигателей. Однако вскоре совместные ресурсные испытания трех АИПД были успешно проведены повторно в полном объеме [56].

В 60-е - 70-е годы в США активно отрабатывались вопросы интеграции АИПД с системами космических аппаратов. Так, в работах [57, 58] подробно рассмотрены вопросы, связанные с электромагнитным излучением из струи двигателя и влиянием излучения на электронные элементы КА. Объектом наземных испытаний был двигатель, предназначенный для летного эксперимента на КА LES-8/9 с номинальной энергией разряда 20 Дж, однако его накопитель имел запас электрической прочности, позволявший кратковременно повышать энергию до 80 Дж. Было показано, что спектр колебаний представлял собой "белый" шум, причем его интенсивность от разряда к разряду была близка к постоянной. Были определены интенсивности колебаний при различных энергиях разряда и в различных частотных диапазонах. Мощность излучения во всех диапазонах не превышала нескольких сотых долей ватта. Наиболее мощные флуктуации наблюдались в низкочастотной до 1 МГц области спектра, причем регистрировалась магнитная составляющая электромагнитного поля, колебания которой наименее опасны для электронной и прежде всего для радиоаппаратуры КА.

В обзорной работе [59] подводятся итоги работ, проводившихся в течение 60-х - 70-х и начале 90-х годов, в том числе данные о результатах летных испытаний АИПД. Подтверждается отсутствие негативного воздействия электромагнитного излучения на электронную и радиоаппаратуру, установленную на экспериментальных и штатных КА.

Проблемы возможного загрязнения окружающих АИПД поверхностей, помимо анализировавшейся работы [46], подробно рассмотрены в [60]. Показано, что струя АИПД имеет сложный характер и что значительная (до 20%) часть потока рабочего вещества, содержащего углерод, после прекращения разряда разлетается в боковых направлениях в телесный угол до 180°. Эта часть потока может осаждаться на близлежащих поверхностях. Для минимизации загрязняющего воздействия рекомендуется использование защитного экрана, устанавливаемого вокруг разрядного канала. Эффективность такой защиты достаточна для защиты бортового оборудования КА. Что касается высокоскоростной части потока, то она имеет довольно хорошую фокусировку (двойной угол разлета не превышает 40°) и при правильном расположении двигателя не представляет значительной угрозы загрязнения для систем КА. В целом подтверждается основной вывод работы [52] о незначительности загрязняющего влияния струи АИПД на поверхности КА.

Современные работы, посвященные летным [30] и наземным [61] испытаниям АИПД, еще раз подтверждают данные, полученные ранее. В работе [30] анализируется ход летных испытаний АИПД с энергией ~ 20 Дж на МКА США "ЕО-1". Делается вывод о практическом отсутствии влияния как углерода, так и электромагнитного излучения струи на работу оптической и радиоаппаратуры МКА. В работе [61] приводятся результаты испытаний двигателя с относительно большой энергией разряда 150 Дж. Результаты измерений толщин

осаждающихся на образцах углеродных пленок и последующего расчетного прогноза на ресурс 10^7 разрядных циклов показали, что для МКА с габаритными размерами $\sim 0,8$ м ухудшение оптических свойств аппаратуры за счет осаждающегося углерода будет значительно меньшим, чем от влияния факторов внешней среды.

Большое количество работ по АИПД в конце 70-х годов, вовлеченность в работу многих организаций США, казалось бы, говорили о перспективности данного направления на годы вперед, однако, отсутствие результатов по реальному повышению эффективности рабочего процесса двигателя и его явная бесперспективность как исполнительного органа систем управления КА большой массы, по-видимому, подталкивало финансирующие ведомства к принятию решения о прекращении финансирования данной тематики. В этом смысле интересна работа [62], в которой активно обсуждаются планы исследований и разработок АИПД по заданиям основных спонсоров данного направления - ВВС США. Работа опубликована в 1979 г., а уже начиная с 1981 г. поток публикаций по АИПД практически прекращается. Работы по АИПД в СССР фактически были свернуты на несколько лет раньше.

Практически единственным исключением является абляционный импульсный плазменный двигатель, установленный на малом космическом аппарате ДЗЗ Earth Observer 1 (EO-1) [30], выведенном на околоземную орбиту в 2000 г. Плазменный двигатель EO-1 в течение нескольких лет выполнял задачу точной угловой стабилизации КА. Двигатель EO-1, показанный на Рис. 11, имеет рельсовую геометрию двух противоположно направленных разрядных каналов с торцевой подачей тефлоновых шашек рабочего тела, довольно высокую энергию разряда и потребляемую мощность. Основные характеристики АИПД EO-1 представлены в Табл. 2

Табл. 2 Характеристики АИПД EO-1 [26]

Параметр	Значение
Энергия разряда, Дж	56
Частота импульсов, Гц	1
Потребляемая мощность, Вт	60
Число импульсов (ресурс)	$5,3 \cdot 10^5$
Тяговая эффективность, %	8
Удельный импульс тяги, м/с	10400
Единичный импульс тяги, мН·с	0,86
Средняя тяга, мН	0,86
Суммарный импульс тяги, кН·с	0,46
Масса ЭРДУ с рабочим телом, кг	4,95

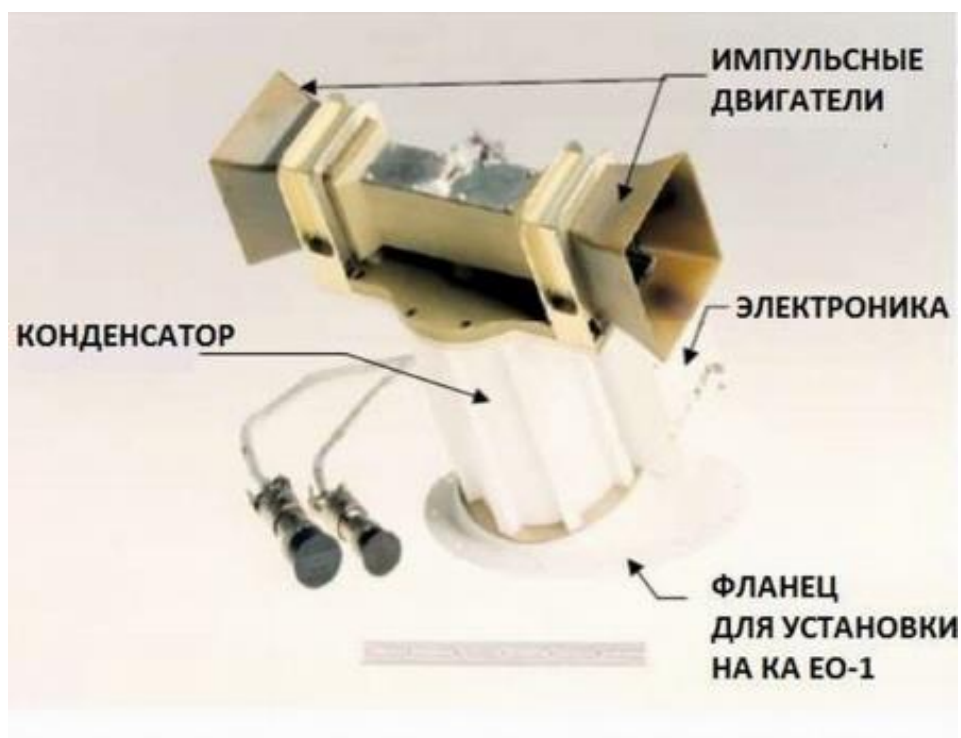


Рис. 11. Внешний вид ЭРДУ ЕО-1 [30]

1.7 Второй этап исследований и разработок АИПД в России

Второй (современный) этап истории АИПД начинается с 90-х годов и своим вторым рождением обязан прежде всего, появлению нового направления космической техники - малых космических аппаратов (МКА). Наметившаяся к концу 80-х началу 90-х годов тенденция к снижению габаритов и массы КА, появление первых малых КА под девизом: "Быстрее, лучше, дешевле", поставили в повестку дня разработку и создание *простых и дешевых* ЭРД, способных функционировать при потребляемой мощности ~100 Вт и меньше. Наиболее простым и дешевым ЭРД такого класса, к тому же неоднократно прошедшим успешные летные испытания, является абляционный ИПД с разрядным каналом рельсовой геометрии. Данное обстоятельство предопределило возрождение интереса к АИПД как к одному из перспективных двигателей систем управления МКА.

На этом этапе работы по АИПД были возобновлены и в России. Первый российский доклад по тематике АИПД с малой энергией разряда (~100) Дж на международной конференции был сделан в 1993 на 44-м конгрессе международной астронавтической федерации [63]. Фактически это была заявка на участие в гонке по созданию двигателя коррекции орбит для МКА. Между тем, как показал анализ задач управления МКА [64], для сравнительно легких аппаратов массой 200-300 кг необходимо использовать эффективный двигатель с запасаемой энергией масштаба 100 Дж. Такого двигателя в конце 90-х годов не было, как не было и ясных перспектив его создания, однако было понимание того, что двигатель с низкой эффективностью не имеет никаких шансов в конкурентной борьбе.

В новейшей истории АИПД вопрос о повышении эффективности его рабочего процесса стал основным вопросом. В 90-е годы в той или иной форме ему было посвящено не менее 50 % всех работ. Ряд из них [65 -71] будет рассмотрен ниже.

В середине 90-х появился целый ряд российских и американских работ, целиком посвященных проблеме повышения тяговой эффективности импульсного двигателя. При этом далеко не всегда предлагались правильные пути решения проблемы. Так, работа [65] интересна тем, что из известного экспериментального факта неэффективности процессов ионизации и ускорения в АИПД первого поколения делается совершенно необоснованный вывод о возможности повышения эффективности двигателя при росте амплитуды разрядного тока за счет снижения емкости накопителя энергии. Авторы работы исключили из рассмотрения форму кривой разрядного тока, ошибочно считая этот вопрос несущественным.

В работе [66] из магнитозондовых измерений были получены распределения разрядного тока в канале двигателя по времени разряда, позволившие установить, что область сгущения тока и, следовательно, плазма движутся в разрядном канале с высокой скоростью только во время первого полупериода разряда конденсаторного накопителя энергии. При последующих 3-4 полупериодах разряда накопителя энергии, в которые вкладывается более 50% запасенной энергии, область тока остается практически неподвижной, локализованной в начале канала, способствуя усиленному испарению рабочего вещества, покидающему канал с малой скоростью. Отсюда был сделан вывод о необходимости перехода к аperiodическому разряду в АИПД с длительностью близкой к длительности тепловых процессов в канале (~ 10-15 мкс). Однако на тот период времени авторы доклада еще не имели ясной картины физических процессов в канале двигателя и, соответственно, конкретных предложений по реализации аperiodического разряда в АИПД. При этом, имея значительный опыт работы с формирующими линиями, авторы исключали возможность их использования для получения такого разряда. В экспериментальной работе [67] было показано незначительное (~2%) влияние угла наклона электродов по отношению к средней линии канала на тяговую эффективность АИПД. Было установлено, что при двойном угле ~ 20° тяговая эффективность двигателя максимальна.

Весьма информативной и полезной для понимания явлений, приводящих к значительной потере эффективности в АИПД, является работа [68]. Не касаясь местами довольно спорной физической картины процессов в канале двигателя на границе "плазма-диэлектрик", отметим, что развитая в работе модель, связывающая низкую эффективность двигателя с развитием затухающих колебаний разрядного тока вследствие значительного дисбаланса импедансов внешнего и внутреннего участков электрической цепи, является весьма убедительной. Приведенные в работе численные оценки импедансов в целом верно указывают главный путь

повышения эффективности рабочего процесса АИПД – переход к аperiodическому разряду. Однако проведенные в тот же период в НИИ ПМЭ МАИ магнитозондовые измерения показали, что индуктивность, а, следовательно, и импеданс разрядного канала, увеличиваются в процессе развития разряда более, чем на порядок, по сравнению с начальными значениями. Поэтому говорить о согласовании импедансов внешнего и внутреннего участков разрядного контура можно только для какого-то краткого момента разряда, а практически такое согласование невозможно. Сам автор рекомендует различные варианты получения аperiodического разряда: включение в электрическую цепь двигателя формирующей линии, периодическое прерывание разряда с помощью диода. Действительно, с помощью предлагаемых мер можно, как уже отмечалось, получить аperiodический, или, по крайней мере, однополупериодный разряд, однако усложнение схемы и дополнительные потери в новых элементах цепи, как правило, сводят к нулю преимущества от их использования. Работа [69] посвящена исследованию проблемы избыточного расхода тефлона в зависимости от температуры шашки. Так, показано, что уменьшение мощности разряда с 60 Вт до 5 Вт за счет снижения частоты следования разрядов накопителя приводит к повышению тяговой эффективности двигателя на 25% вследствие уменьшения паразитного расхода тефлона. Делается предположение, что в условиях космоса при температуре окружающей среды ниже нуля тяговая эффективность будет еще выше. Важным следствием выполненных исследований является то, что в случае планируемой работы АИПД на орбите с повышенной частотой должен предусматриваться дополнительный запас рабочего вещества, компенсирующий его повышенный расход. Авторы полагают, что "правильный" дизайн двигателя позволит уменьшить расход рабочего вещества, однако не предлагают каких-либо конкретных мер. Справедливо связывая многие проблемы АИПД с его рабочим телом, авторы ряда работ пытаются повысить эффективность рабочего процесса двигателя путем модификации тефлона [70] или использования новых рабочих тел [71]. В первой из них представлены результаты экспериментальной отработки АИПД, использующего в качестве рабочего тела тефлон с присадками углерода, а также пористый, номинальный и высокоплотный тефлон. Наилучшие результаты получены при использовании тефлона с присадками углерода. Так, тяговая эффективность АИПД в зависимости от ряда факторов возрастает на 6- 18%. Что касается второй работы из данной серии, то авторы были озабочены в первую очередь запуском двигателя и получением его разрядных характеристик на довольно экзотической смеси тефлона с водой. При этом нет данных об улучшении параметров двигателя.

Заметным шагом на пути значительного повышения тяговой эффективности стали проведенные в НИИ ПМЭ исследования проблемы влияния емкости накопителя энергии АИПД на его характеристики [74]. В данной работе, впервые целенаправленно исследовалось влияние

емкости разряда на эффективность разрядных процессов. Емкость варьировалась от 10 мкф до 200 мкф. Было замечено влияние емкости на токовую кривую, однако рост эффективности двигателя с увеличением емкости оказался незначительным и в лучших случаях не превышал нескольких процентов. Как выяснилось впоследствии, основной причиной этого была недооценка авторами роли начальной индуктивности и омического сопротивления разрядной цепи. Позднее пришло понимание того, что если омическое сопротивление важно иметь как можно ниже, то для емкости и начальной индуктивности существует оптимальное соотношение, свое для каждого типоразмера двигателя.

Первое значительное продвижение в направлении существенного повышения эффективности рабочего процесса АИПД отражено в работе [75]. Магнитозондовые исследования пространственно-временных распределений магнитного поля и плотности тока проводились в импульсном потоке плазмы экспериментального образца двигателя АИПД-50Э с энергией разряда 50 Дж. Пространственно-временные распределения линейной плотности разрядного тока, рассчитанные по результатам магнитозондовых измерений, представлены на Рис. 12. Приведены кривые распределения линейной плотности тока $J_y(x)$ по длине ускорительного канала в моменты времени $t = 1-7$ мкс. При $t \sim 1$ мкс разрядный ток локализован в токовом слое ограниченной протяженности. В момент времени $t \sim 2$ мкс, соответствующий максимуму тока, разряд распространяется по всей поверхности электродов. Далее, до окончания первого полупериода разрядного тока, наблюдается квазистационарное распределение плотности тока вдоль длины электродов. В момент, когда направление тока меняется на противоположное ($t \sim 5$ мкс), в ускорительном канале наблюдается вихрь тока. В течение всего второго полупериода разряда распределение линейной плотности тока остается квазистационарным.

Впервые в канале АИПД с боковой подачей рабочего тела было зафиксировано с помощью магнитного зонда значительное перераспределение разрядного тока, приведшее к формированию близкого к апериодическому разряда. При этом тяговая эффективность двигателя выросла с 10% до 18%.

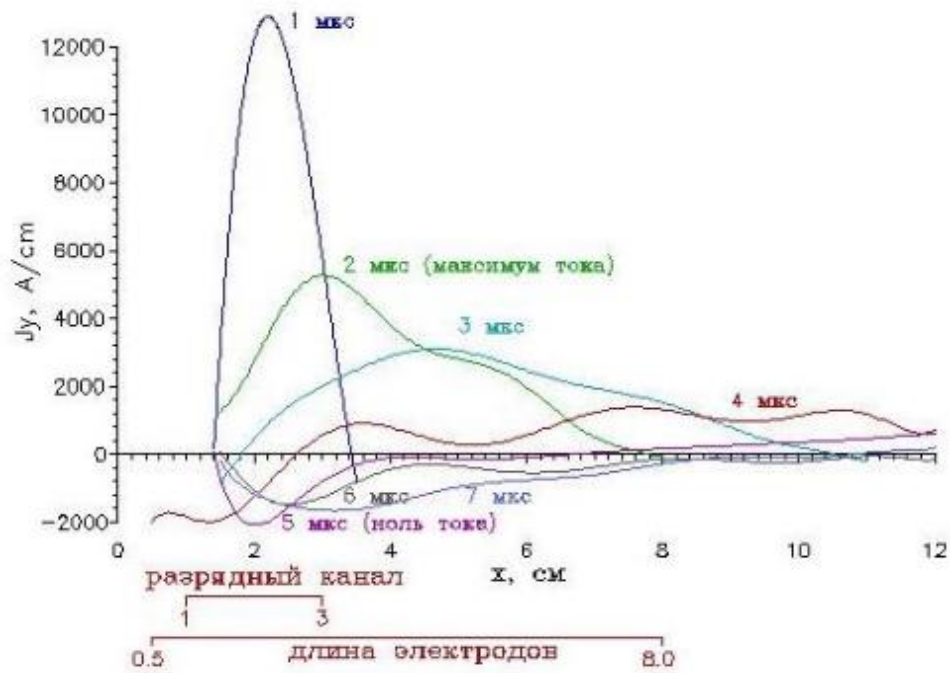


Рис. 12. Распределение линейной плотности разрядного тока в разрядном канале АИПД-50Э

Это было достигнуто выбором правильного, то есть близкого к оптимальному, соотношения емкости и начальной индуктивности разрядного контура. Рост тяговой эффективности двигателя был настолько существенным, что это позволило заявить о создании АИПД нового поколения. В работе [72] показано, что не только распределение тока, но и распределение концентрации заряженной компоненты плазмы в разрядном канале высокоэффективного АИПД нового поколения и за его пределами значительно отличается от распределения концентрации в канале традиционного двигателя. Причем максимум концентрации, как и максимум тока выносятся из области канала, ограниченной шашками к срезу электродов. При этом резко уменьшается паразитный расход фторопласта. В работах приведены данные об удельных характеристиках моделей АИПД в диапазоне энергии от 40 Дж до 150 Дж. Позднее на импульсный плазменный ускоритель нового поколения и способ ускорения плазмы был получен патент РФ [76].

Кратко главный итог второго этапа работ по АИПД выражается в успешном решении проблемы низкой эффективности рабочего процесса двигателя, что делает его одним из наиболее перспективных и конкурентоспособных двигателей для орбитального контроля МКА с массами от единиц до сотни килограмм.

1.8 Конструкции современных АИПД

К началу 2010-х годов в НИИ ПМЭ МАИ были созданы и исследованы образцы АИПД нового поколения, отличающиеся существенно повышенными удельными характеристиками, такими как тяговая эффективность и удельный импульс тяги [11, 12]. Их характерной

особенностью является лучшее, чем в двигателях первого поколения, согласование ввода энергии и массы в разрядный канал. Следует отметить, что высокоэффективные АИПД нового поколения, несмотря на схемную и конструктивную простоту и дешевизну, отличаются сложностью и нестационарностью электродинамических, плазмодинамических и тепловых процессов в разрядном канале и внешней разрядной цепи и недостаточно достоверно моделируются расчетно-теоретическими методами. Поэтому они требуют, как правило, длительной и дорогостоящей экспериментальной доводки. При этом, в зависимости от заданных критериев оптимизации, подбираются параметры разрядного канала и внешней разрядной цепи, обеспечивающие согласование ввода энергии и массы в разрядный канал и соответствие заданным характеристикам двигателя.

Для обеспечения достаточно высоких тягово-энергетических показателей АИПД в НИИ ПМЭ МАИ были проведены экспериментальные исследования по следующим основным направлениям:

- исследования влияния параметров разрядной цепи на характеристики двигателя;
- исследования пространственно-временного распределения магнитных полей и разрядных токов магнитозондовыми методами;
- исследования пространственно-временного распределения плотности плазмы импульсными датчиками давления;
- измерения концентрации заряженных частиц и соответствующие расчеты степени ионизации оптическими методами;
- исследования боковых плазменных потоков и углов разлета плазменной струи оптическими методами;
- прямые тяговые измерения, для чего в НИИ ПМЭ МАИ было разработано уникальное тягоизмерительное устройство с относительной погрешностью ~5% в диапазоне тяг от 0,1 до 10 мН;

Сейчас можно говорить о начале нового этапа в развитии АИПД в России – этапа разработки и летных испытаний двигательных установок, предназначенных для выполнения конкретных задач на перспективных космических аппаратах. К 2014 году в НИИ ПМЭ МАИ был создан ряд таких электроракетных двигательных установок, часть из которых (АИПД-45-2 и АИПД-155) успешно прошла полный объем наземной экспериментальной отработки (квалификационные, в том числе ресурсные, испытания). ЭРДУ АИПД-45-2 в 2014 году была выведена на орбиту в составе малого космического аппарата научного назначения МКА-ФКИ ПН2, разработанного в НПО им. С.А. Лавочкина (см. Рис. 13). К сожалению, лётные испытания

АИПД-45-2 в полном объеме провести не удалось из-за преждевременного выхода из строя аппарата МКА-ФКИ ПН2.



Рис. 13. Размещение ЭРДУ АИПД-45-2 на МКА-ФКИ ПН2 [11]

Все ЭРДУ на базе АИПД нового поколения выполнены как моноблоки, включающие один или два двигательных блока, блок системы питания и управления, систему хранения и подачи рабочего тела. Для обеспечения надежности все основные элементы ЭРДУ резервированы. Адаптация двигательной установки к конструкции малого космического аппарата включает только ее закрепление на заданной плоскости, подача напряжения питания и управляющих команд.

Все АИПД, разработанные в НИИ ПМЭ МАИ имеют единую принципиальную схему разрядного канала – «рельсотрон» с боковой подачей плазмообразующего вещества. В качестве плазмообразующего вещества (рабочего тела) применяется фторопласт-4.

Основные характеристики ЭРДУ с АИПД, созданных в НИИ ПМЭ МАИ, представлены на Рис. 14 и в Табл. 3.

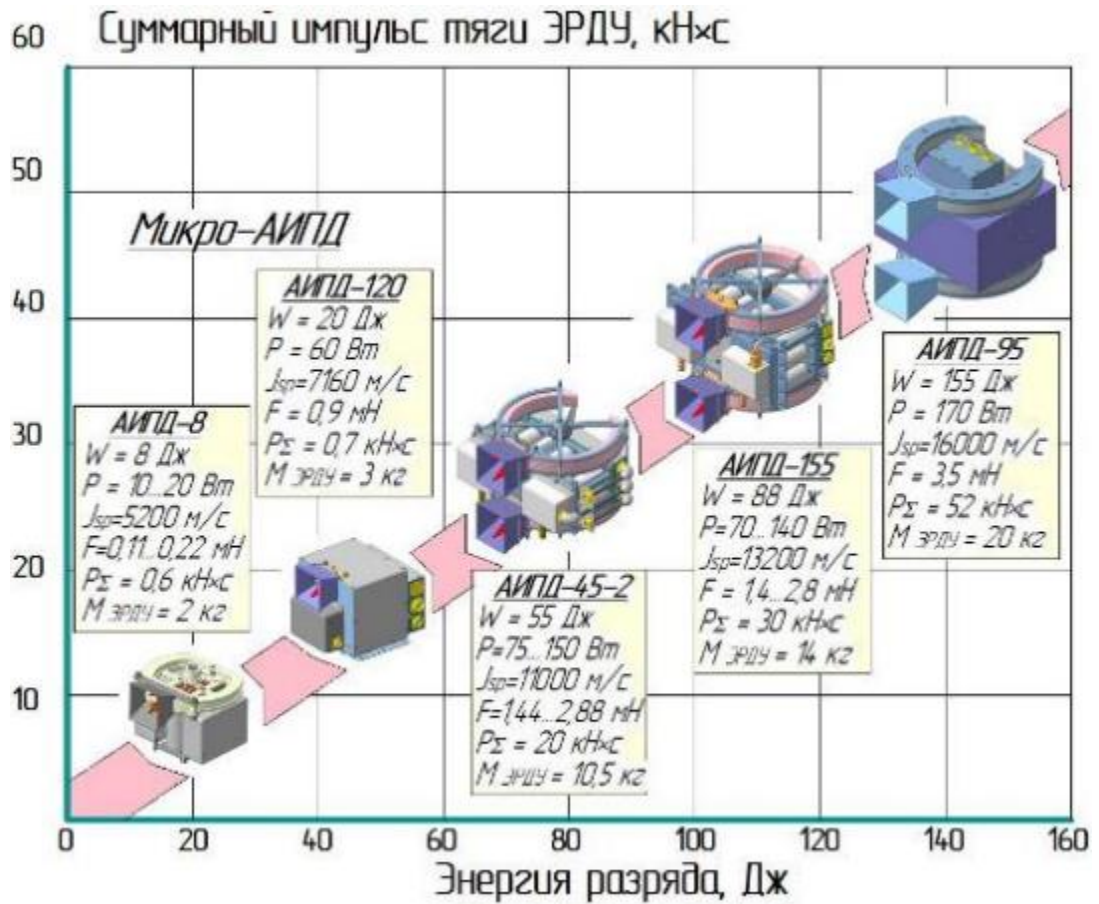


Рис. 14. ЭРДУ на основе АИПД, разработанные в НИИ ПМЭ МАИ [6]

Табл. 3 Характеристики ЭРДУ на основе АИПД НИИ ПМЭ МАИ [11]

Модель ЭРДУ	АИПД-120	АИПД-45-2	АИПД-155	АИПД-95
Энергия разряда, Дж	20	55	88	155
Потребляемая мощность, Вт	60	75...150	70...140	170
Ресурс по запасу рабочего тела, ч	220 ($2 \cdot 10^6$ импульсов)	3860 ($1,6 \cdot 10^7$ импульсов)	5950 ($1,5 \cdot 10^7$ импульсов)	3970 ($1,5 \cdot 10^7$ импульсов)
Удельный импульс тяги, м/с	7160	11000	13200	16000
Средняя тяга, мН	0,9	1,44...2,9	1,4...2,8	3,5
Суммарный импульс тяги, кН·с	0,7	20	30	50
Масса рабочего тела, кг	0,1	1,8	2,4	3,15
Полная масса ЭРДУ, кг	3,0	10,5	14	20
Цена тяги, Вт/мН	67	52	52	49
Эффективный удельный импульс тяги, м/с	233	1900	2140	2600

Типовая структурная электрическая схема ЭРДУ на базе АИПД НИИ ПМЭ МАИ представлена на Рис. 15. ЭРДУ является двухрежимной и имеет два разрядных канала с боковой подачей плазмообразующего вещества. Наличие двух разрядных каналов позволяет повысить надежность ЭРДУ и одновременно уменьшить габариты системы подачи рабочего тела.

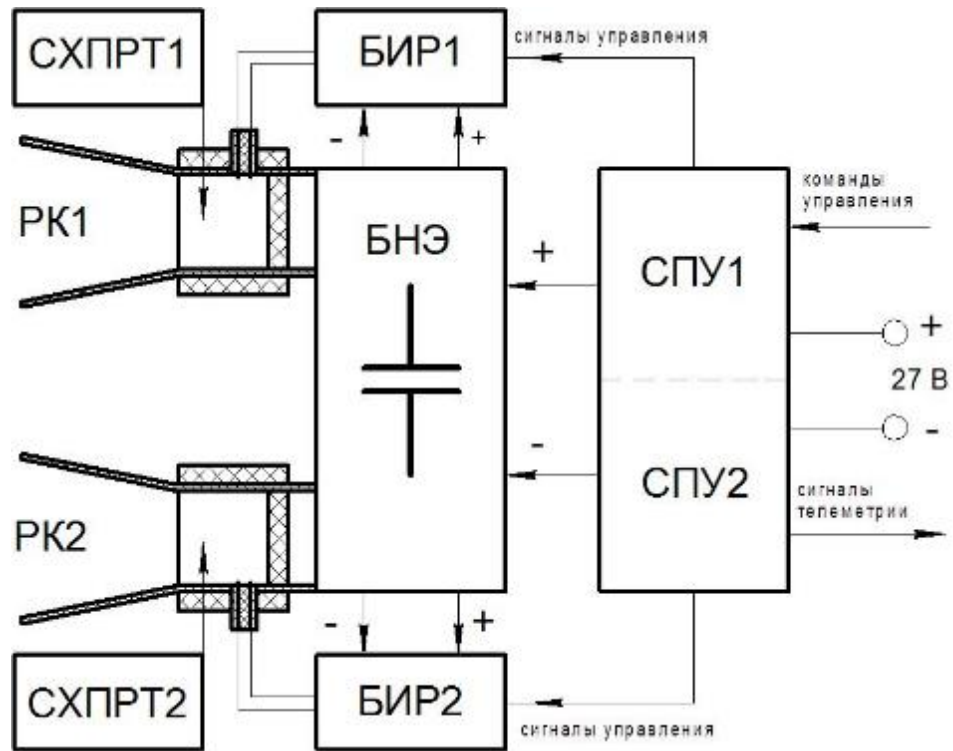


Рис. 15. Структурная схема ЭРДУ на основе АИПД [8, 11]

В состав двухканальной ЭРДУ входят следующие элементы: блок накопителя энергии (БНЭ) с силовыми импульсными конденсаторами и электродами, образующими два разрядных канала РК1 и РК2, две системы хранения и подачи рабочего тела (СХПРТ1 и СХПРТ2), два блока иницирования разряда (БИР1 и БИР2) со свечами поджига, блок системы питания и управления (СПУ). Все системы ЭРДУ имеют, как минимум, двукратное резервирование.

Разрядные каналы РК1 и РК1 работают поочередно по заданной циклограмме так, что в каждый момент времени работает только один разрядный канал. Средняя потребляемая мощность и средняя тяга двигательной установки изменяются путем включения одного или одновременно двух каналов СПУ и соответствующего изменения частоты следования разрядных импульсов.

Разрядный канал двигателя (Рис. 16) образован двумя тефлоновыми шашками прямоугольного сечения (1) и двумя плоскими электродами (2), выполненными, как правило, из меди. Торцевой изолятор (3), закрывающий заднюю часть двигателя, выполнен из тугоплавкой керамики типа нитрида бора (АБН) или окиси алюминия (Al_2O_3), что позволяет ему выдерживать тепловое воздействие импульсной плазмы длительное время.

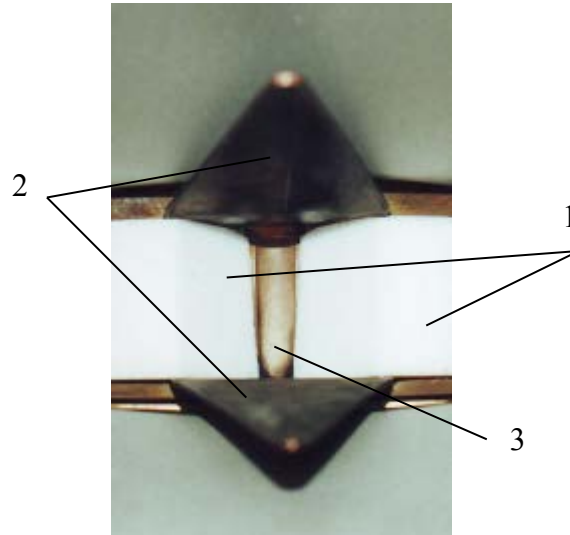


Рис. 16. Внешний вид разрядного канала АИПД с боковой подачей шашек РТ

Минимизация индуктивности и активного сопротивления, существенно влияющих на эффективность АИПД и его ресурс, обеспечивается установкой разрядного канала на минимальном расстоянии от клемм накопителя энергии и надежным соединением элементов внешней цепи. Для уменьшения тепловых потоков от разрядного канала к накопителю могут использоваться устанавливаемые на шины электропитания тепловые развязки, выполненные из теплопроводящих диэлектрических материалов.

Как показывает опыт разработки АИПД, отраженный, например, в работах [77,78] существенное влияние на характеристики и работоспособность двигателя оказывает объем разрядного канала. Получено достаточно экспериментальных данных, позволяющих для каждого уровня энергии в диапазоне 30...150 Дж предварительно выбрать геометрию разрядного канала близкую к оптимальной [68]. Тем не менее, окончательная экспериментальная доводка канала необходима.

Так как напряжение на электродах разрядного канала АИПД обычно относительно небольшое, в пределах 1...3 кВ, необходимым условием начала разряда является принудительный пробой разрядного промежутка [39]. В ИПД с диэлектрическими и металлическими рабочими веществами инициирование разряда возможно несколькими способами: за счет пробоя вакуумного промежутка путем перенапряжения, механического закорачивания электродов с помощью проводника или путем ионизации разрядного промежутка вспомогательным высоковольтным источником плазмы – игнайтером или свечой поджига. В известных АИПД наибольшее распространение получили системы инициирования разряда (СИР) третьего типа. В последние годы получили также развитие низковольтные СИР на основе пьезоэлектрических трансформаторов. Пьезоэлектрическая СИР прошла наземные

испытания в составе АИПД аппарата ЕО-1 [88], однако запущен этот аппарат был с традиционной высоковольтной СИР.

В состав СИР входят блок инициирования разряда (БИР) и свеча поджига, соединенные высоковольтными проводами. Типовая принципиальная схема БИР АИПД представлена на Рис. 17. Для повышения надежности БИР имеет два разрядных контура. Электрическая схема БИР включает один или два параллельно включенных конденсатора поджига C_n , два управляемых разрядника $P1$ и $P2$ (вместо разрядников можно использовать высоковольтные радиационностойкие тиристоры), высоковольтные импульсные повышающие трансформаторы поджига $ТИ1$ и $ТИ2$ с коэффициентом трансформации порядка 100, высоковольтные импульсные повышающие трансформаторы управления разрядниками $ТИ3$ и $ТИ4$.

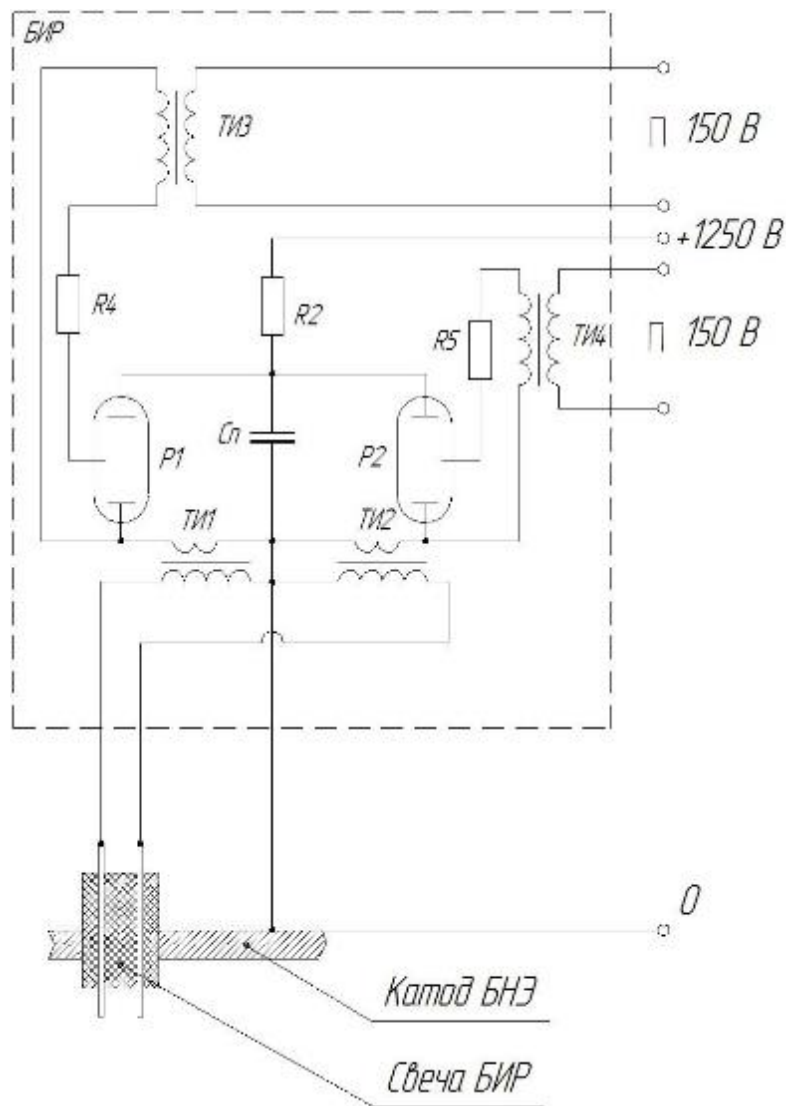


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема двухэлектродной двухканальной СИР

Конструкция двухэлектродной свечи поджига, представлена на Рис. 18. Материал изолятора свечи – корундовая керамика ВК94-1. Электроды свечи выполнены из вольфрамовой проволоки. Каждый электрод подключен к своей высоковольтной разрядной цепи

двухканального БИР. Импульсный высоковольтный разряд происходит между одним из электродов свечи и катодом АИПД. Интересно, что фактически такая свеча поджига представляет собой пушку Бостика – первый в мире импульсный плазменный ускоритель эрозионного типа [89]. Плазмообразующим веществом свечи является углеродная пленка, осаждающаяся на ее поверхности при абляции углерода.

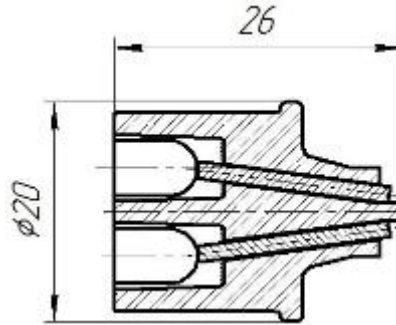


Рис. 18. Конструкция свечи поджига АИПД

Данный блок инициирования разряда работает следующим образом:

На конденсатор поджига C_n подается напряжение 1250 ± 50 В. По команде «Включить разряд» от блока СПУ на первичные трансформаторов ТИЗ и ТИ4 подаются с частотой $0,45 \pm 0,05$ Гц управляющие импульсы напряжения $\square 150-200$ В. При этом управляющие импульсы, подаваемые на первичные обмотки трансформаторов ТИЗ и ТИ4, сдвинуты по времени относительно друга на 1,1 сек. Во вторичных обмотках трансформаторов это напряжение повышается до напряжения пробоя между катодом и управляющим электродом разрядников Р1 и Р2. Искра между управляющим электродом и катодом инициирует пробой между катодом и анодом разрядников, после чего разрядный ток конденсатора C_n поступает на первичные обмотки импульсных повышающих трансформаторов поджига ТИ1 и ТИ2. Во вторичных обмотках, электрически связанных с электродами свечи поджига, формируются импульсы тока высокого напряжения 20-30 кВ. Происходит пробой по поверхности свечи между одним из её электродов и катодом АИПД. При этом два электрода свечи работают поочередно, каждый от своей разрядной цепи БИР. Образующиеся при разряде заряженные частицы инициируют начало разряда накопительной конденсаторной батареи на электродную систему АИПД с частотой $0,9 \pm 0,1$ Гц.

Если межэлектродный зазор разрядного канала не превышает 2...3 см, вкладываемая энергия в разряд поджига составляет всего от 0,5 до 2% энергии основного разряда. При этом величина разрядного тока свечи ограничена сопротивлением вторичной обмотки трансформатора. Поэтому такие системы не могут использоваться для инициирования разряда в АИПД, в которых расстояние между электродами разрядного канала превышает 2,5...3,0 см. Устранить данный недостаток возможно в двухступенчатых эрозионных системах с трехэлектродной свечой поджига.

Принципиальная схема двухканального абляционного импульсного плазменного ускорителя с трехэлектродной СИР представлена на Рис. 19.

Отличие трехэлектродной схемы инициирования состоит в том, что в ней один из выводов конденсатора поджига C_p электрически связан с одним из электродов разрядного канала. После возникновения высоковольтного пробоя между электродами свечи образующаяся плазма закорачивает промежуток между одним из электродов свечи и электродом разрядного канала, связанным с выводом конденсатора. Разрядный ток конденсатора поджига начинает протекать по контуру, включающему коммутатор (разрядник P1 (P2) или тиристор), накопительную емкость $C_{п1}$ ($C_{п2}$) и разрядный промежуток. На второй стадии разряда сопротивление высоковольтного трансформатора ТИ2 (ТИ4) не ограничивает разрядный ток. Это приводит к увеличению эрозии диэлектрика и росту числа частиц, участвующих в создании условий пробоя основного межэлектродного промежутка. Надежность запуска АИПД при этом повышается без увеличения энергетических затрат на инициирование.

Так как энергия разряда СИР составляет, хоть и небольшую, но существенную долю энергии основного разряда, АИПД с инициированием разряда свечой поджига может рассматриваться как двухступенчатый или, в случае применения трехэлектродной свечи, даже трехступенчатый плазменный ускоритель. Свеча поджига создает достаточно плотный факел плазмы, поэтому пробой разрядного промежутка может происходить не, как обычно, по поверхности диэлектрика, а по факелу свечи. Поэтому развитие разряда в его начальной стадии разряда существенно зависит от работы системы инициирования.

В настоящее время работы по АИПД продолжаются и за рубежом, но за исключением описанной выше двигательной установки ЕО-1, не выходят из стадии наземных испытаний лабораторных образцов.

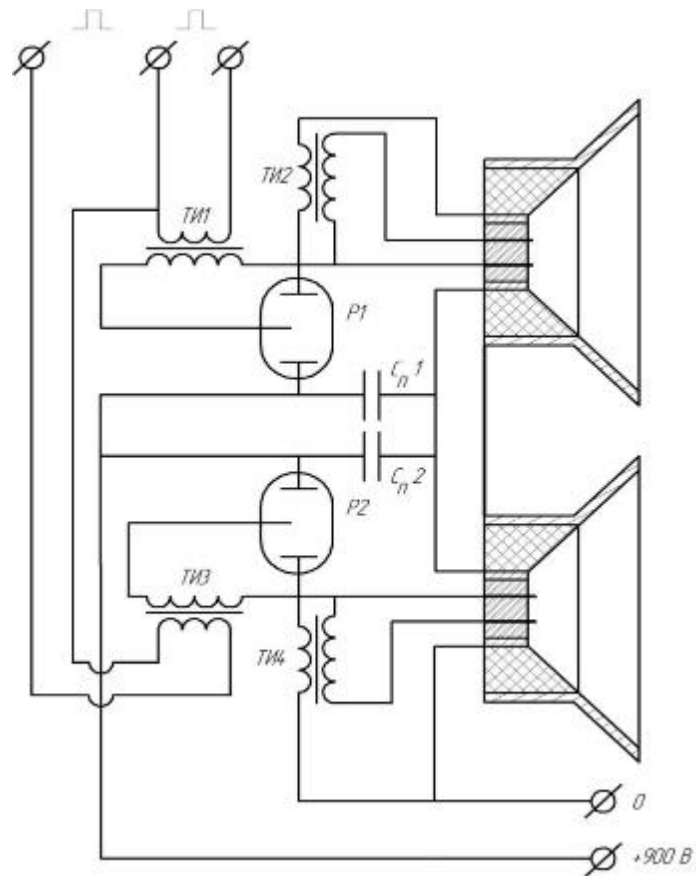


Рис. 19. Принципиальная электрическая схема трехэлектродной двухканальной СИР с коаксиальными разрядными каналами

В качестве примера на Рис. 20 изображена лабораторная модель импульсного плазменного двигателя с рельсовой геометрией разрядного канала и торцевой подачей твердого рабочего тела (тефлона), созданная в кооперации университетом Саутгемптона (Великобритания) и Бразильским национальным космическим центром.



Рис. 20. Двухступенчатый АИПД с рельсовой геометрией разрядного канала [34]

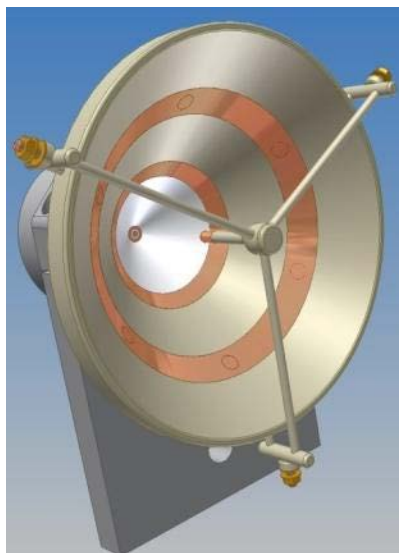


Рис. 21. Двухступенчатый АИПД с коаксиальной геометрией разрядного канала [34]

В ходе исследовательских испытаний происходило сильное науглероживание диэлектрика, разделяющего ступени разрядного канала, с которым разработчикам не удалось справиться, поэтому был рассмотрен вариант создания коаксиального двухступенчатого ИПД (Рис. 21) [34].

1.9 Способы улучшения характеристик АИПД и возникающие проблемы

Высокоэффективные АИПД нового поколения при энергии разряда более 100 Дж могут иметь значения тяговой эффективности, достигающие 25...30 % [75, 79]. То есть, в диапазоне потребляемой мощности до 200 Вт АИПД нового поколения конкурентоспособны по своим характеристикам по сравнению со стационарными ЭРД.

Однако не все удельные характеристики ЭРД, отражая их техническое совершенство, одинаково важны для разработки двигательных установок реальных космических аппаратов. Поэтому на новом этапе развития АИПД – этапе практического применения - потребовалась выработка соответствующих критериев оптимизации.

Выполнение электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) своей целевой функции определяется, в первую очередь, характеристической скоростью V_x , которую она сообщает космическому аппарату массой $M_{КА}$. В свою очередь, характеристическая скорость определяет суммарный импульс тяги двигательной установки P_Σ (КА считается телом постоянной массы, так как запас рабочего тела ЭРДУ $M_{РТ}$, как правило, существенно меньше $M_{КА}$):

$$P_\Sigma = M_{КА} \cdot V_x \quad (6)$$

Таким образом, важнейшей характеристикой ЭРДУ является суммарный импульс тяги, определяемый удельным импульсом АИПД и запасом рабочего тела:

$$P_\Sigma = M_{РТ} \cdot J_{SP} \quad (7)$$

Получение заданного суммарного импульса тяги ЭРДУ достигается в равной мере повышением удельного импульса тяги и увеличением запаса рабочего тела. Последнее требует максимального увеличения поперечного сечения шашек рабочего тела, как правило, выше оптимального для получения максимально высоких удельных характеристик. Поэтому удельные характеристики летных двигателей могут быть ниже, чем характеристики их лабораторных аналогов.

Второй по важности для разработчиков КА характеристикой ЭРДУ является ее полная масса $M_{ЭРДУ}$. Масса ЭРДУ зависит от:

- массы и размерности шашек рабочего тела, то есть от заданного суммарного импульса;
- удельной массы конденсаторов;
- массы и степени резервирования электронных блоков системы питания и управления.

Таким образом, важнейшей удельной характеристикой, показывающей совершенство ЭРДУ, является эффективный удельный импульс тяги [8] J_{spe} [Н·с/кг], равный отношению суммарного импульса тяги ЭРДУ к ее полной массе, включая запас рабочего тела

$$J_{spe} = P_{\Sigma} / M_{ЭРДУ} \quad (8)$$

Абсолютные величины тяги и потребляемой мощности, а соответственно и цена тяги, имеют для ЭРДУ на основе АИПД значительно меньшее значение. В частности, недостаток мощности на борту МКА можно компенсировать снижением частоты импульсов и, соответственно, увеличением времени работы двигателя. Энергия разряда при этом остается той же, соответственно, остаются неизменными все удельные характеристики двигателя. Недостаток тяги так же компенсируется увеличением времени работы двигателя.

Ранее было показано, что имеется ряд задач для ДУ с ЭРД, требующих значительного суммарного импульса тяги. Такими задачами, например, являются:

- довыведение МКА на рабочую орбиту;
- поддержание орбитального положения в течение САС;
- увод на орбиту затопления/захоронения по окончании САС.

Для обеспечения конкурентоспособности ЭРДУ на базе АИПД необходимо добиться увеличения суммарного импульса тяги без существенного увеличения массово-габаритных и мощностных показателей.

Поэтому увеличение суммарного импульса ДУ с АИПД при заданных энергетических и массово-габаритных показателях является актуальной задачей. Ее решение в принципе возможно двумя способами:

1. повышением удельного импульса тяги;
2. увеличением массы рабочего тела.

Первый был рассмотрен в работе [80]. Увеличение удельного импульса тяги было достигнуто за счет увеличения эффективности процессов ускорения плазмы в разрядном канале. Предложен разрядный канал с увеличенным магнитным полем за счёт двойного обратного токоподвода к электродам.

Увеличение суммарного импульса тяги может достигаться также вторым способом – увеличением количества запасаемого рабочего тела. В настоящее время используются следующие способы, позволяющие значительно увеличить количество РТ без существенного роста массы и габаритов несущей конструкции: использование в конструкции ДУ двух и более разрядных каналов, увеличение длины шашек РТ за счёт их изготовления в виде полуколец.

Однако, даже этих приемов может оказаться недостаточно, и, при жестких ограничениях по массе и габаритам, возникнет потребность ещё больше увеличить суммарный импульс тяги. Логично следующим шагом за увеличением длины шашек РТ увеличить площадь их поперечного сечения. Если повышение удельного импульса тяги не влияет на интегральные характеристики двигателя, так как геометрия разрядного канала остается неизменной, то увеличение площади поперечного сечения шашек РТ приводит к изменению геометрии разрядного канала и возникает необходимость в проведении дополнительных исследований, необходимых для определения интегральных характеристик АИПД, а также прогнозирования стабильности расщепления фторопласта тела с рабочих поверхностей шашек.

Экспериментально установлено, что, начиная с некоторого расстояния между рабочими поверхностями шашек (при их раздвижении), при постоянной энергии в разряде возникает явление их "карбонизации" [47, 48]. Так называется процесс возникновения углеродных образований на поверхностях шашек РТ, контактирующих с плазмой, и поставляющих вещество в процессе работы АИПД в разрядный канал. Углерод препятствует абляции фторопласта, что приводит через некоторое время к закорачиванию разрядного канала и прекращению функционирования двигателя.

В связи с этим необходимо определить условия возникновения карбонизации рабочих поверхностей плазмообразующего вещества при недостаточной плотности энергии.

Для достижения этой цели необходимо определить рациональные форму и размеры ускорительного канала. Решение поставленной задачи требует теоретического и экспериментального изучения рабочих процессов в разрядном канале, в особенности начальной стадии разряда. Также необходимо определить условия возникновения карбонизации рабочих поверхностей плазмообразующего вещества при недостаточной плотности энергии.

Глава 2. Стендовая база для исследования АИПД и ее модернизация. Методы экспериментальных исследования АИПД

2.1 Стенд для экспериментальных исследований АИПД и его модернизация

В наземных условиях исследовательские испытания ЭРД должны проводиться в условиях имитации космического пространства, основной особенностью которого является высоко разреженная атмосфера. Для этих целей используются специализированные испытательные стенды с вакуумными камерами, оснащенными вакуумными насосами, способными создавать необходимое разрежение, которое для работы АИПД должно быть не менее 10^{-4} Торр, системами контроля вакуума, источниками электропитания. Также должна быть обеспечена возможность подвода к испытываемому в вакуумной камере образцу силовых электропитающих линий и линий управления и телеметрии. Для измерения тяги в вакуумной камере должно быть размещено тягоизмерительное устройство.

Для проведения экспериментальных исследований АИПД использовался стенд ИУ-2 НИИ ПМЭ МАИ, предназначенный для проведения кратковременных испытаний импульсных двигателей мощностью до 500 Вт. В состав стенда в начальном состоянии входили: вакуумная камера объемом $0,65 \text{ м}^3$ с системой вакуумирования и контроля вакуума, установка для проведения интерферометрических исследований, монохроматор-спектрограф МДР23-У, источники питания для зарядки конденсаторных накопителей энергии и диагностическое оборудование.

Система вакуумирования состояла из высоковакуумного диффузионного насоса Н-400/7000 со скоростью откачки 5000 л/с при давлении 10^{-5} Торр и форвакуумного насоса ВН-6Г со скоростью откачки 160 л/с.

Вакуумная камера состояла из трёх секций диаметром 500 мм: тягоизмерительной, спектрографической и интерферометрической (Рис. 22). Спектрографическая и интерферометрическая секции оснащены специальными кварцевыми окнами, предназначенными для оптических исследований. Разделение вакуумной камеры на секции позволило значительно экономить время на настройку измерительных схем, когда требуется проведение обоих видов оптической диагностики струи.

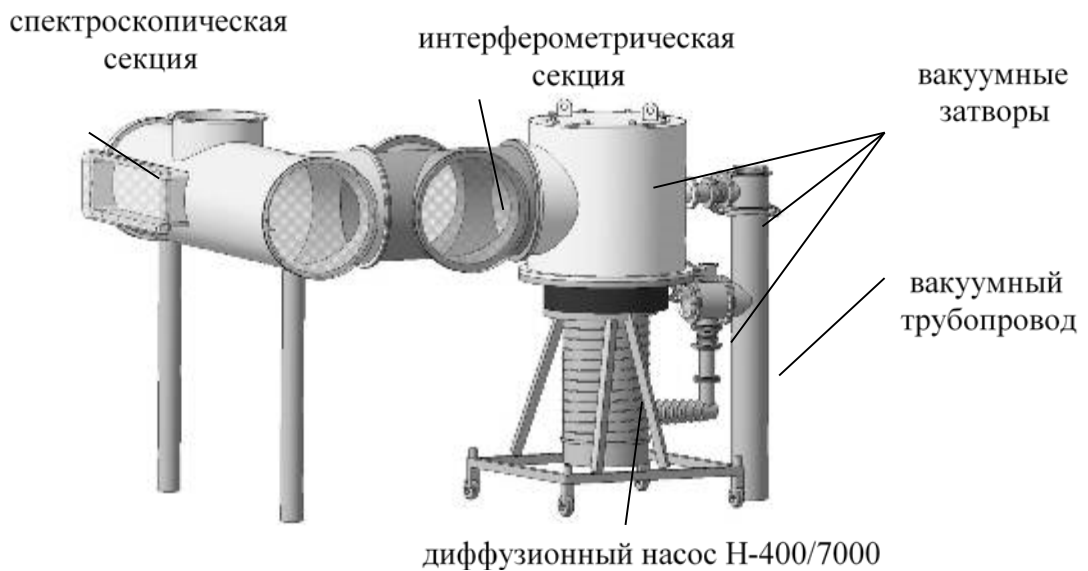


Рис. 22. Схема экспериментального стенда ИУ-2 до его модернизации

Для проведения измерений тяги стенд был оснащен тягоизмерительным устройством (ТИУ), для этих целей на верхнем фланце спектрографической секции была смонтирована секция ТИУ (Рис. 23).

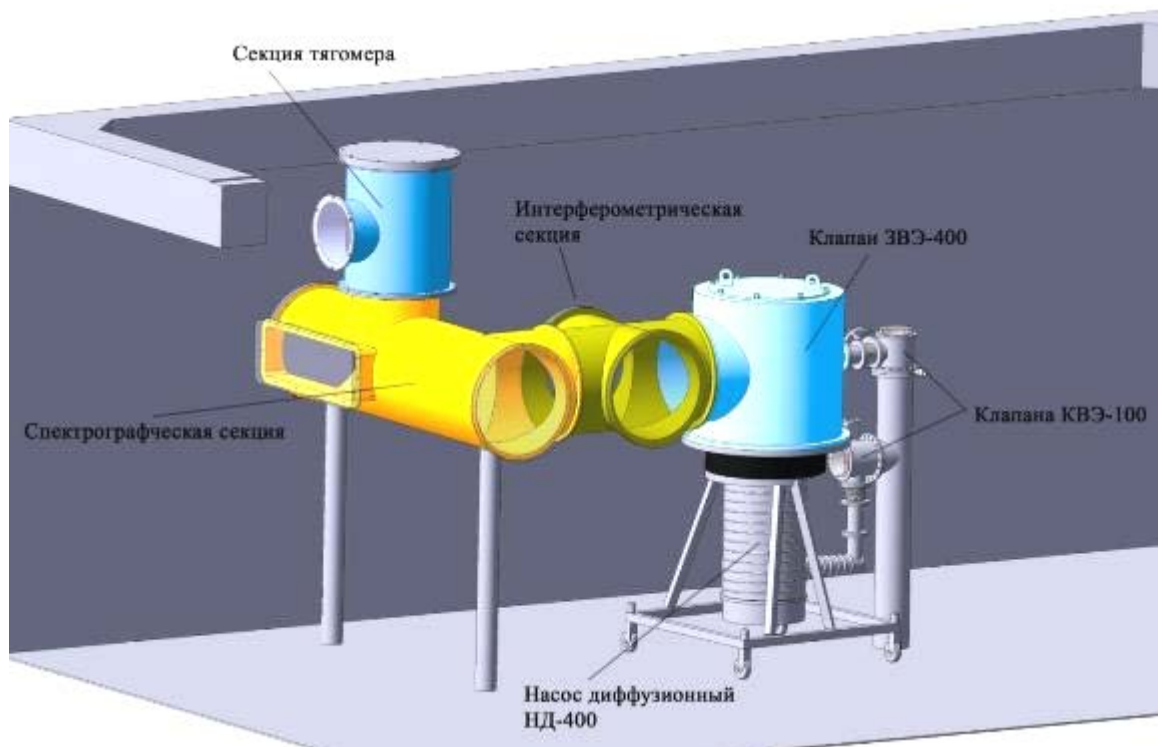


Рис. 23. Схема экспериментального стенда ИУ-2 с секцией ТИУ

2.2 Анализ применимости тягоизмерительных устройств. Определение рационального типа тягоизмерительного устройства для измерения средней тяги АИПД

Достоверное измерение средней тяги, создаваемой исследуемым АИПД, является основополагающей задачей, решение которой позволяет судить о работе двигателя. В процессе работы двигателя производится подсчёт количества произведенных срабатываний – импульсов разряда. По окончании эксперимента производится взвешивание шашек РТ, разница между исходной и конечной массами, деленная на количество импульсов, даёт расход РТ за один импульс. Таким образом, имея значения средней тяги (F), расхода за импульс (\dot{m}), и зная частоту импульсов (f) и энергию накопителя (W), можно определить:

единичный импульс тяги	$p = F/f$
мощность	$N = W \cdot f$
удельный импульс тяги	$J_{sp} = p/m$
тяговую эффективность двигателя	$\eta_t = \frac{p^2}{2 \cdot m \cdot W}$
цену тяги	$C_t = N/F$

Импульсный характер работы АИПД создаёт определенную сложность измерения средней тяги в силу малой величины и длительности импульса тяги и относительно длинной паузы между импульсами.

Известны тягоизмерительные устройства (тягомеры) косвенного и прямого действия. Косвенные тягомеры основаны на измерении импульса реактивной струи двигателя, который, если пренебречь потерями, равен импульсу тяги двигателя [49, 155]. В простейшем случае косвенный тягомер включает ловушку для струи плазмы и датчик ее перемещения. Какой бы не была конструкция ловушки, частицы плазменной струи могут либо полностью передавать свой импульс ловушке, («прилипая» к ней), либо отражаться от нее. Если струя полностью отражается от ловушки в обратную сторону, то ловушка получит удвоенный импульс тяги. Таким образом, погрешность косвенного тягомера может достигать 50...100% в сторону завышения измеряемого импульса тяги. Поэтому, хотя косвенные тягомеры широко применяются для научно-исследовательских работ при сравнении различных двигателей и режимов их работы, они неприменимы для испытаний двигателей с целью точного измерения их тяги.

Тягомеры прямого действия значительно сложнее косвенных. В настоящее время для прямого измерения малых реактивных усилий (масштаба миллиньютон) наиболее широко используются тягоизмерительные устройства следующих конструктивных схем:

- крутильные весы;
- маятниковый тягомер

2.2.1 Крутильные весы

Тягомер типа «крутильные весы» [81] состоит из горизонтально расположенного коромысла (1), подвешенного на упругом подвесе (нити, струне, стержне) (2), на одном конце которого устанавливается испытуемый ЭРД (7) на установочную платформу (4,5,6). На другом конце коромысла размещается уравнивающая масса (3) и отсчетное устройство (8), регистрирующее крутящий момент, кабели подвода электрической энергии и трубопроводы подвода рабочего тела к ЭРД (9, 10, 11, 12) (Рис. 24).

Принцип действия «крутильных весов» заключается в следующем: под действием измеряемых сил рычаг начинает поворачиваться в горизонтальной плоскости до тех пор, пока данные силы не уравновесятся силами упругости закрученной нити.

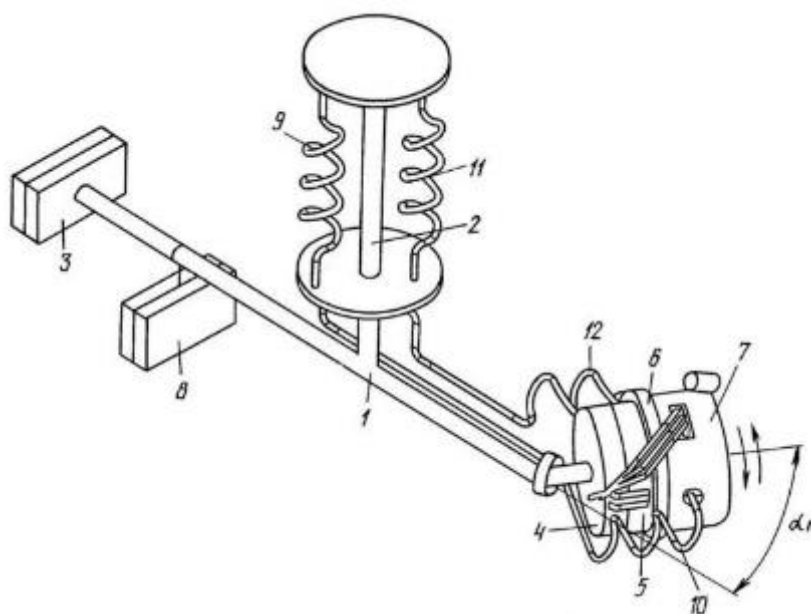


Рис. 24. Схематичное изображение тягомера типа «крутильные весы» [81]

«Крутильные весы», в зависимости от конструкции, позволяют измерять тяги от нескольких мкН до нескольких ньютонов и более. Это самые чувствительные из известных приборов для измерения малых сил. Однако они более сложны в настройке, чем прочие типы тягомеров, так как требуется точное уравнивание рычага с установочной платформой с помощью балансирующих грузов, и требуют большее пространство в вакуумной камере для размещения, особенно в случае испытания АИПД, когда масса испытываемого образца может достигать нескольких десятков килограммов. В то время, как при испытаниях двигателей с жидким или газообразным рабочим телом на тягомере устанавливается только двигательная «головка», а подвод электроэнергии и рабочего тела осуществляется извне вакуумной камеры, в случае испытания АИПД на тягомер устанавливается практически целиком двигательная установка, включающая в себя систему хранения и подачи рабочего тела с его запасом, и часть системы электропитания – конденсаторный накопитель энергии.

При организации рабочего места с тягомером на испытательном стенде ИУ-2 было решено использовать тягоизмерительное устройство с маятниковым подвесом установочной платформы – маятниковый тягомер.

Был произведён сравнительный экспериментальный и теоретический анализ маятниковых тягомеров двух типов: с платформой с нулевым отклонением (СИМС-100) [82] и со свободно качающейся платформой, на основании которого выбран тип тягомера, использовавшийся при проведении исследовательских испытаний.

2.2.2 Маятниковый тягомер с нулевым отклонением платформы

Система измерения СИМС-100 [82] предназначена для измерения силы тяги, развиваемой ЭРД в стендовых условиях при горизонтальной ориентации вектора тяги.

В состав системы СИМС-100 (Рис. 25) входят измерительная подвеска, крепежная рама испытуемого изделия, включающая переходную плиту с противовесом и штангу, механизм калибровки, блок электропитания. Подвеска с закрепленной на ней крепежной рамой и механизм калибровки устанавливаются непосредственно в вакуумной камере испытательного стенда. Главными элементами подвески являются основной маятник и маятник датчика перемещений, установленные на опоры типа керн-призма. ТИУ с установленным на нем двигателем расположен в вакуумной камере таким образом, что осевое движение сгустка плазмы из работающей модели происходит в направлении системы откачки.

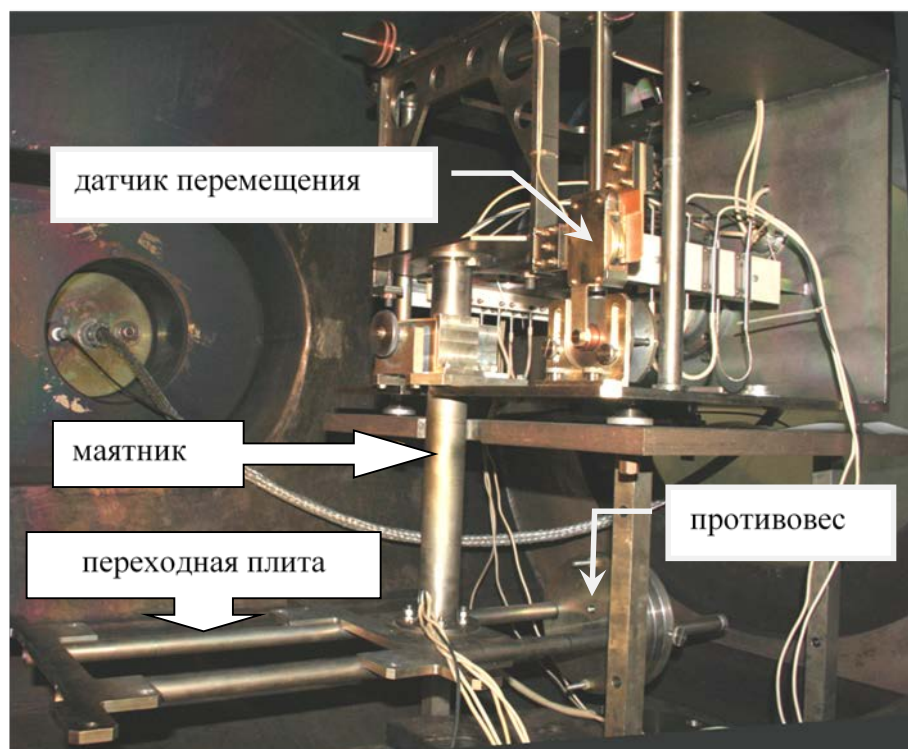
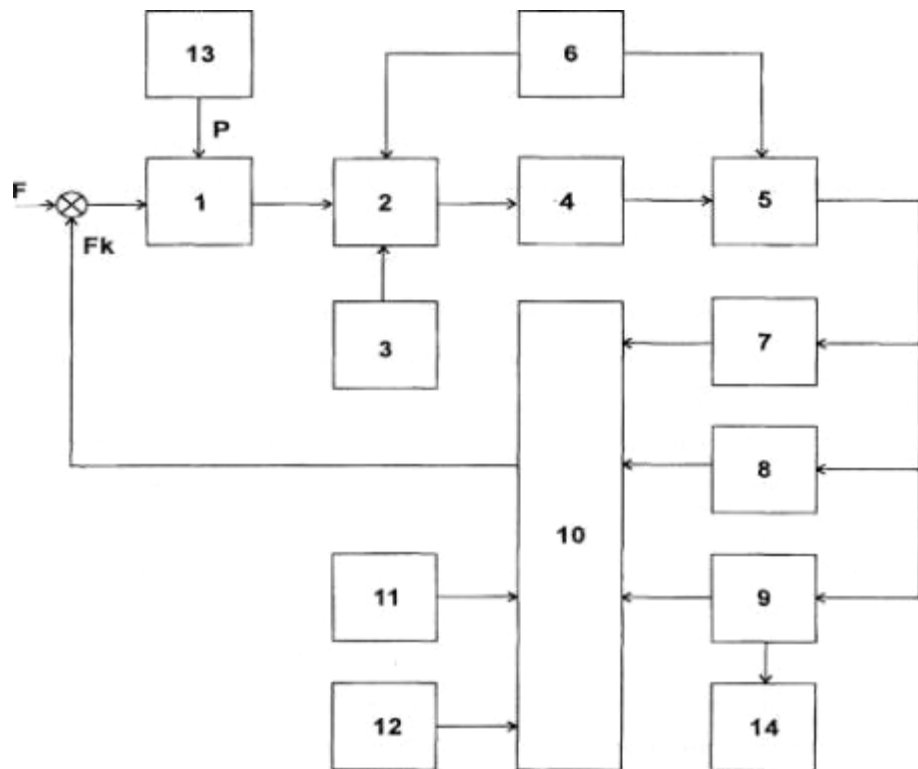


Рис. 25. Внешний вид системы измерения тяги СИМС-100, установленной в вакуумной камере

Принцип действия этой системы основан на автоматической компенсации силы тяги двигателя усилием, развиваемым магнитоэлектрическим компенсатором в цепи отрицательной обратной связи. Следящая система построена по принципу пропорционального интегрально-дифференциального регулирования (ПИД-регулятор) с астатизмом первого порядка. Такое решение позволяет реализовать в системе полную компенсацию тяги без статической ошибки и, следовательно, исключить отклонение маятника подвески двигателя от нулевой точки в процессе измерений. Это, в свою очередь, обеспечивает отсутствие пластических деформаций силовых токоподводов электропитания двигателя, в основном влияющих на характеристики дрейфа нуля и диапазона калибровки тягомера.

Функциональная схема системы измерения СИМС-100 представлена на Рис. 26. Как видно из рисунка, тяга двигателя F воздействует на маятник измерительной подвески 1 и стремится отклонить его от положения равновесия. Дифференциальный ёмкостный датчик перемещения 2 преобразует смещение маятника в модулированное по амплитуде и фазе напряжение переменного тока несущей частоты, поступающего от генератора 6.



1 - маятник измерительной подвески, 2 - ёмкостный датчик перемещений, 3 - датчик синфазной помехи, 4 - усилитель переменного тока, 5 - демодулятор, 6 - генератор несущего и опорного напряжения, 7 - пропорциональный регулятор, 8 - дифференцирующий регулятор, 9 - интегрирующий регулятор, 10 - компенсатор усилия, 11- магнит компенсатора усилия, 12 - схема коррекции нуля, 13 - механизм калибровки, 14 - регистрирующий прибор

Рис. 26. Функциональная схема системы измерения тяги СИМС-100

Усилитель переменного тока 4 осуществляет усиление сигнала рассогласования и подавление синфазной помехи в сигнале датчика перемещений за счет сравнения последнего с сигналом датчика синфазной помехи 3. Амплитудно-фазовый демодулятор 5 в зависимости от направления смещения подвески вырабатывает напряжение положительной или отрицательной полярности, амплитуда которого пропорциональна величине смещения. К выходу демодулятора подключены три канала цепей обратной связи:

- канал пропорционального регулирования 7, представляющий собой преобразователь напряжения сигнала рассогласования в ток компенсатора усилия 10, пропорциональный сигналу рассогласования;
- канал дифференцирующего регулирования 8, выполняющий функции демпфирования колебаний за счет введения в компенсирующий ток первой производной сигнала рассогласования;
- канал интегрирующего регулирования 9, выполняющий функции введения в систему астатизма первого порядка за счет введения в компенсирующий ток интеграла сигнала рассогласования.

Токи, пропорциональные сигналу рассогласования, его производной и интегралу поступают в катушки магнитоэлектрического компенсатора усилия 10, который развивает суммарное усилие F_k , равное по величине измеряемой силе F и встречное по направлению. В одну из катушек компенсатора усилия при необходимости подводится ток модуля коррекции нуля 12, который позволяет дистанционно скомпенсировать временной дрейф нуля измерителя. Так как магнитоэлектрический компенсатор развивает усилие строго пропорциональное току, протекающему в компенсирующей катушке канала интегрирующего регулирования, то этот ток, измеряемый регистрирующим прибором 14, является мерой измеряемой силы в системе. Калибровка тока в единицах силы осуществляется с помощью механизма калибровки 13 путем взвешивания эталонного груза P .

При исследовании тяговых характеристик АИПД различной энергии с помощью СИМС-100 был получен целый ряд результатов, объяснить которые в рамках общепринятых представлений о рабочих процессах в импульсных двигателях представлялось затруднительным. Так, например, при снижении энергии разряда АИПД до уровня 5...10 Дж наблюдалось явление существенного роста его удельного импульса тяги и эффективности с увеличением частоты работы. Значение КПД достигает ~22% при частоте импульсов 5 Гц и становится сопоставимым со значением эффективности АИПД с энергией разряда 20...40 Дж. Однако это не согласовывалось со всем предыдущим накопленным в НИИ ПМЭ МАИ опытом экспериментального исследования импульсных двигателей различных энергий с использованием маятникового тягомера со свободно качающейся платформой, согласно

которому с уменьшением энергии происходит снижение их КПД. Таким образом, зафиксированный уровень тяг и, соответственно, КПД АИПД малой энергии (8 Дж) существенно расходились с теоретическими и практическими представлениями об их величине.

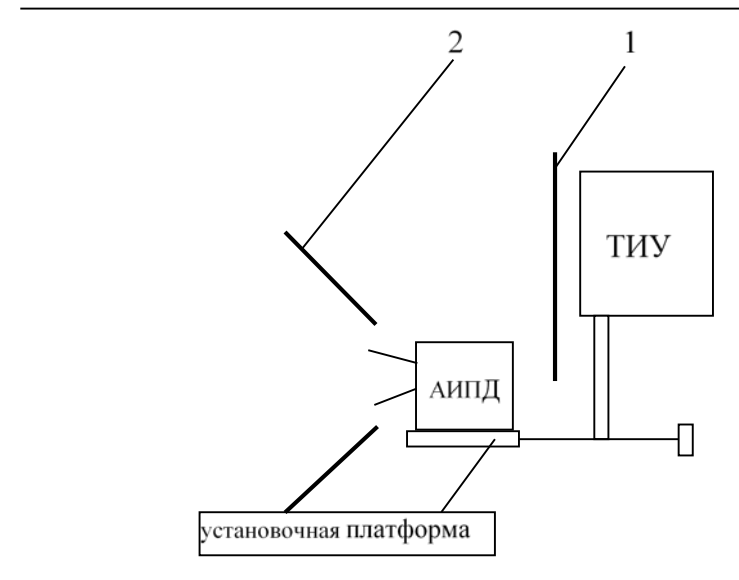
Чтобы определить причины появления аномально высоких значений тяг двигателя, был проведен ряд экспериментов, в ходе которых изучались условия работы модели, методика и технические средства определения интегральных параметров АИПД. В том числе рассматривалось предположение о поступлении в разряд дополнительной, неучтенной при расчете характеристик модели массы рабочего тела. Однако, контрольные взвешивания торцевого изолятора, электродов показали, что их эрозия не выходит за рамки обычных показателей и не может служить объяснением завышения параметров двигателя.

В результате проведенного анализа было установлено, что наиболее вероятной причиной нарушения поведения характеристик АИПД при малой энергии разряда является завышенные значения тяги, то есть недостоверные ее измерения. Причина этого может заключаться:

- в существенно нестационарном процессе течения газовых потоков (газовыделения и натекания) в вакуумной камере обусловленном импульсным характером работы двигателя;
- в воздействии на элементы ТИУ, отраженных от стенок вакуумной камеры частиц струи.

Для проверки первого предположения в области расположения датчика тягоизмерительного устройства был размещен измерительный преобразователь давления электронного ионизационного вакуумметра, который показал, что при работе двигателя наблюдается резкое снижение давления (ориентировочно на $\Delta p = 0,6 \cdot 10^{-2}$ Па за единичный импульс), то есть возникает некоторое направленное движение остаточных газов. Соответствующий этому движению импульс силы может вызывать уход нуля ТИУ, причем его направление обеспечивает прирост тяги. Оценки показывают - силовое воздействие на датчик $F \sim \Delta p \cdot S$ (где S – суммарная площадь воздействия) может достигать значения 0,05 мН. Данное воздействие достаточно мало, однако ответная реакция компенсирующей системы тягомера (ПИД регулятора), которая отслеживает положение основного маятника ТИУ относительно «неподвижного» датчика (а не наоборот) будет соответствовать значительно большим усилиям якобы приложенным к тягомеру, так как масса основного маятника существенно выше массы датчика. То есть погрешность определения тяги может оказаться значительно больше 0,05 мН. Более детальное изучение этого вопроса, а также вопроса влияния частиц струи на показания тягомера потребовало проведения целой серии специальных экспериментов. Для этой цели, в качестве базового, использовался АИПД с энергией накопителя 50 Дж – АИПД-50 (емкость батареи конденсаторов - 60 мкФ, напряжение зарядки - 1300 В).

Для определения величины ухода нуля устройства СИМС-100 при работе АИПД-50 двигатель закреплялся и подключался независимо от ТИУ при сохранении неизменным их взаимного расположения, соответствующего установке модели на устройстве (Рис. 27). После включения модели, на различных частотах работы фиксировались показания тягомера, которые фактически соответствуют величине ухода нуля ТИУ при работе АИПД.



1 - перегородка из стеклоткани, 2 - конический защитный экран

Рис. 27. Схема расположения экрана и перегородки относительно ТИУ

При этом проверялось влияние на эту величину таких факторов как:

- уменьшение силового воздействия на подвижные элементы ТИУ направленного движения потока откачиваемых газов, возникающего при включении АИПД, путем организации встречного потока, отраженного от стеклотканевой перегородки 1;
- уменьшения количества отраженных от стенок вакуумной камеры частиц струи двигателя попадающих на тягомер, посредством размещения на канале модели конусного экрана 2 большой площади;
- увеличения инерционности путем повышения массы, установочной платформы ТИУ, связанной посредством элементов крепления с основным маятником тягомера.

Полученные результаты представлены на Рис. 28. Знак «минус» в легенде данных означает отсутствие соответствующего фактора, а знак «плюс» - присутствие. Видно, что постановка экрана практически не влияет на величину ухода нуля ТИУ, в то время как перегородка значительно ее снижает. Наличие же нагрузки на установочной платформе ТИУ приводит к существенному возрастанию ухода нуля при отсутствии перегородки (до 15% от тяги двигателя энергией 50 Дж) и не оказывает заметного влияния на него при ее наличии.

Замена стеклотканевой перегородки на металлическую (заземленную) для исключения влияния на емкостной датчик ТИУ возможного появления на ее поверхности заряда в процессе работы двигателя не выявила никаких отличий в «поведении» нуля в том и другом случае.

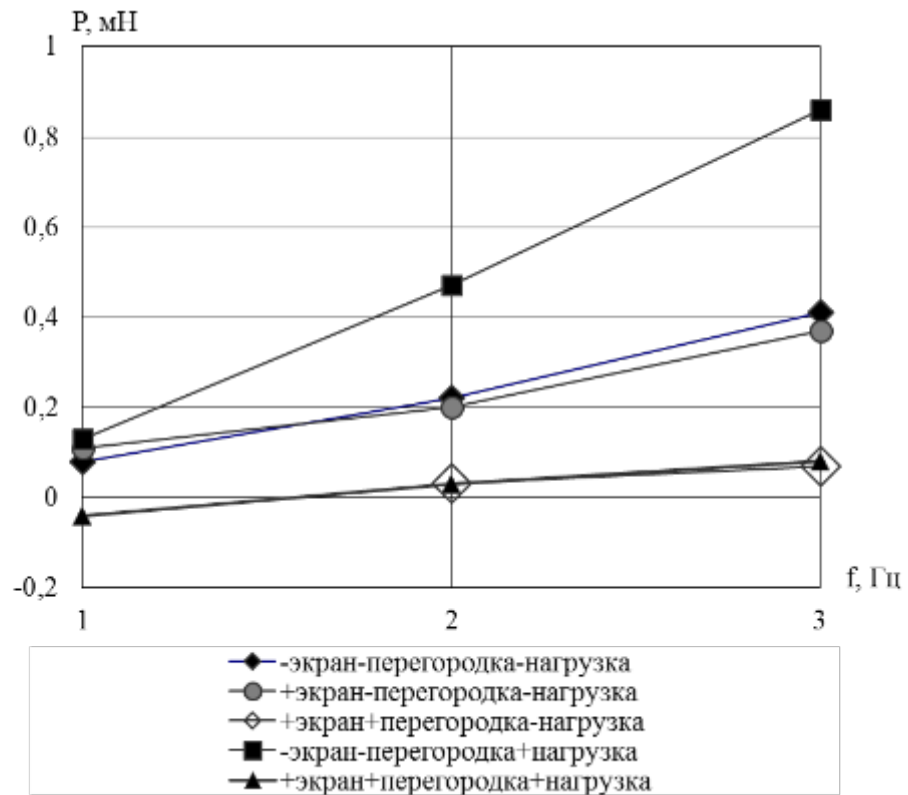


Рис. 28. Величина ухода нуля ТИУ СИМС-100 при работе АИПД-50

Объяснить представленные данные можно исходя из следующих соображений. Работа АИПД вызывает возникновение некоторой дополнительной составляющей скорости движения потока откачиваемых газов направленной вдоль распространения струи плазмы двигателя, то есть возникает импульс силы, воздействующий на имеющие отдельную подвеску подвижные элементы датчика и основного маятника тягомера. Причем, направление данного воздействия в первом случае увеличивает тягу двигателя, а во втором – уменьшает. Суммарный результат определяет уровень ухода нуля ТИУ. Нагрузка основного маятника тягомера вызывает повышение его инерционности, то есть снижается чувствительность к внешнему воздействию. В итоге уменьшается «противотяга». При отсутствии перегородки происходит увеличение ухода нуля. При ее же наличии уровень ухода нуля не зависит от инерционности ТИУ, поскольку снижается величина паразитного воздействия.

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- отраженные от стенок вакуумной камеры частицы струи двигателя не оказывают какого-либо существенного влияния на показания ТИУ;

- основной причиной ухода нуля тягомера СИМС-100 является возникновение дополнительной составляющей скорости движения потока откачиваемых газов в направлении распространения струи плазмы двигателя при его работе, что приводит к появлению паразитного импульса, воздействующего на подвижные элементы ТИУ;
- снижение проводимости вакуумной камеры в области ТИУ путем установки перегородки значительно снижает уровень ухода нуля и делает его независимым от величины нагрузки тягомера.

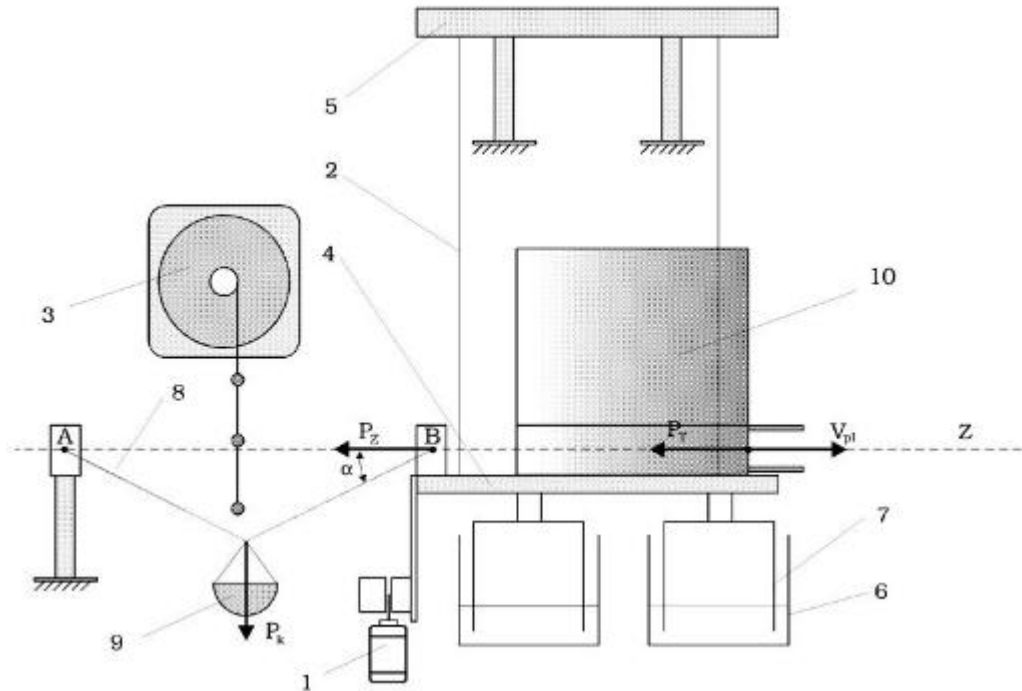
Существуют опасения, что такой тип тягомера принципиально нельзя использовать для измерения средней тяги, создаваемой короткими импульсными силовыми воздействиями. Длительность тягового усилия, развиваемого за один импульс двигателем, составляет масштаба 10 мкс, при этом основная часть импульса формируется за время ~ 5 мкс. Это импульсное тяговое усилие, приложенное к разрядной цепи двигателя, преимущественно к электродам разрядного канала, передается к чувствительному элементу датчика перемещения со скоростью звука в твердом теле, равному, в зависимости от материала $c = 4700 \dots 5100$ м/с. При расстоянии от двигателя до датчика перемещения $x \approx 0,2 \dots 0,5$ м время передачи воздействия на датчик перемещения составит $t = x/c = 40 \dots 110$ мкс. За это время импульс тяги уже закончится и компенсировать его будет невозможно.

Таким образом, принципиальная применимость маятникового тягомера с нулевым отклонением платформы для измерения тяги импульсных плазменных двигателей вызывает сомнения и требует проведения отдельных исследований.

По той же причине – конечной скорости распространения возмущения – в ТИУ для измерения тяги ИПД невозможно использовать широко применяемые в испытательной технике тензометрические датчики, непосредственно измеряющие усилия, а наиболее подходящими являются датчики перемещения.

2.2.3 Маятниковый тягомер с качающейся платформой

В рассмотренной ниже конструкции маятникового тягомера качающаяся платформа подвешена на струнах, поэтому за ней также закрепилось название «струнный тягомер». Струнный тягомер представляет собой маятниковый тягомер прямого действия с демпферами колебаний (масляными, магнитными, электромагнитными) и датчиком регистрации перемещений подвесной платформы, а также системой калибровки. Принципиальная схема струнного ТИУ приведена на Рис. 29.



1 - индуктивный датчик смещения платформы; 2 - подвес платформы; 3 - дистанционно управляемый мотор-редуктор с барабаном с калибровочными грузиками; 4 - подвижная платформа; 5 - неподвижная рама; 6 - неподвижная часть масляного демпфера; 7 - подвижная часть масляного демпфера; 8 – калибровочная нить; 9 - платформа для калибровочных грузиков; 10 - исследуемый объект (АИПД).

Рис. 29. Схема ТИУ струнного типа.

Конструктивно струнный тягомер состоит из рамы 5, устанавливаемой на дно вакуумной камеры, к верхней части рамы подвешивается на подвесе 2 подвижная платформа 4 (подвижная платформа с помощью подвеса может также крепиться непосредственно к верхней стенке вакуумной камеры), предназначенная для установки исследуемого объекта 10. К подвижной платформе с нижней стороны крепятся подвижные части демпферов, состоящие из подвижной части 7, жестко закрепленной к подвижной платформе, и стоящей на дне вакуумной камеры неподвижной части 6, заполненной на треть объема маслом. Перемещение подвижной платформы регистрируется индуктивным датчиком 1. Калибровка ТИУ производится с помощью калибровочного узла ТИУ, состоящего из платформы для калибровочных грузиков 9, подвешенной на нити 8, которая в точке «А» крепится к неподвижной станине, а в точке «В» к подвижной платформе, причем плоскость расположения нити совпадает серединой подвижной платформы. Угол $\alpha=26,56^{\circ}$ выбран для обеспечения равенства действующих усилий на калибровочную платформу и на подвижную платформу, возникающих при опускании калибровочных грузиков. Калибровочные грузики опускаются на платформу 9 с помощью дистанционно управляемого мотора-редуктора с установленным на нём барабаном 3.

Двигатель устанавливается на ТИУ и центрируется по риску, нанесенной на подвижную платформу 4. Исследуемый ИПД ориентируется таким образом, чтобы ось разрядной камеры

(направление тяги инжектора) совпадала с осью Z тягомера. Затем проводится выравнивание платформы в горизонтальной плоскости. Силовые и диагностические провода, идущие от инжектора, подвешиваются без натяга и закрепляются вертикально, так, чтобы их жесткость заметно не ухудшала чувствительность ТИУ.

Принципиальной особенностью струнного тягомера рассматриваемого типа является то, что он измеряет не единичный импульс тяги $P_{ед}$, а непосредственно среднюю тягу двигателя F , равную $F=P_{ед} \cdot f$. При этом платформа под действием тяги двигателя отклоняется от «нулевого» положения. Отклонение платформы регистрируется датчиком перемещения. При этом, чтобы избежать резонансных отклонений, частота импульсов f должна быть существенно больше собственной частоты колебаний платформы $f_{п}$ как математического маятника $f_{п} = 1/\sqrt{l \cdot g}$. Тем не менее, каждый единичный импульс вызывает отклонение платформы от равновесного положения, соответствующего средней тяге двигателя. Для уменьшения этих отклонений предназначены масляные демпферы.

Маятниковый тягомер струнного типа отличается достаточно высокой чувствительностью, позволяя измерять усилия масштаба 100 мкН, однако это приводит к воздействию на него многочисленных малых возмущений, таких как колебания вакуумной камеры под действием проезжающего в радиусе 100 м транспорта и т.п. Поэтому калибровка тягомера должна производиться дистанционно, в вакууме, непосредственно перед каждым измерением и после него.

При работе АИПД на подвижную платформу ТИУ оказываются воздействия импульсного характера длительностью масштаба 10 мкс, в результате которого происходит смещение подвижной платформы в сторону датчика перемещения. При калибровке тягомера грузики, опущенные на калибровочную платформу, оказывают воздействие стационарного характера. На первый взгляд, калибровка ТИУ посредством сравнения сигналов, генерируемых индукционным датчиком расстояния в результате таких разнородных воздействий, представляется некорректной, однако экспериментально, в том числе путем сравнения измерений тягомеров различного типа, доказано, что ТИУ регистрирует среднюю тягу, развиваемую АИПД, и её корректно сравнивать с воздействием, оказываемым грузиком на подвижную платформу через узел калибровки.

Также экспериментально показано, что вязкость масла в демпферах не влияет на величину средней тяги.

Тем не менее, остаются два допущения, требующих теоретического подтверждения путем создания физико-математической модели ТИУ:

- корректность калибровки тягомера, измеряющего среднюю тягу, постоянным усилием;

- отсутствие влияние вязкости масла в демпферах на величину среднего отклонения платформы под действием импульсов тяги от ее «нулевого» положения.

2.3 Аналитическое исследование маятникового тягоизмерительного устройства

Для исследования динамики подвижной платформы под воздействием импульсных и стационарных усилий совместно с Антиповым А.А. проведено математическое моделирование ТИУ [82].

Предложенная математическая модель разработана с учётом следующих допущений и упрощений:

- 1) рассмотрена упрощенная плоская задача движения платформы;
- 2) платформа составляет с двигателем одно целое;
- 3) платформа погружена в среду с постоянной вязкостью, по которой не распространяются колебания;
- 4) коэффициент вязкости среды (k_b) определялся подбором, и выражается в относительных единицах.
- 4) платформа подвешена на невесомом нерастяжимом стержне.

Движение исследовалось в координатах x и y , как показано на Рис. 30.

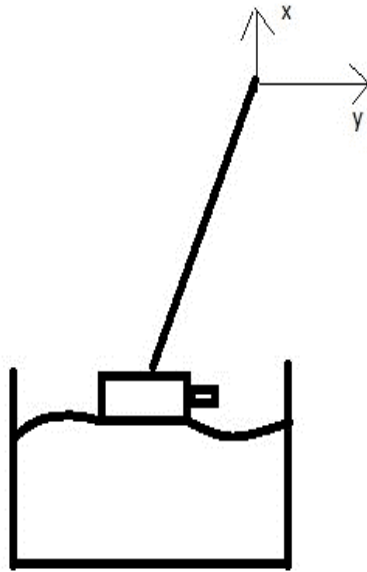


Рис. 30. Схематичное изображение маятникового ТИУ

Для описания движения использовалось уравнение Лагранжа I-го рода:

$$m_i \bar{w}_i = \bar{F}_i + \bar{R}_i, i = 1 \dots n, \quad (9)$$

где реакции: $R_i = \sum_{j=1}^p \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial r_i}$.

Здесь λ_j -множитель Лагранжа, f_j -уравнения связей, r_i -координаты, p -количество связей.

В рассматриваемом случае уравнение связи имеет следующий вид:

$$f = l^2 - x^2 - y^2.$$

Система уравнений Лагранжа I-го рода для рассматриваемого случая:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg + \lambda 2x, \\ m\ddot{y} = -k\dot{y} + \lambda 2y + F, \end{cases} \quad (10)$$

здесь k - коэффициент вязкости среды, F - сила воздействия на платформу.

Далее, чтобы получить зависимость x от y , выразим лямбда из первого уравнения

$$\lambda = \frac{m\ddot{x} - mg}{2x} \text{ и продифференцируем уравнение связи два раза:}$$

$$\dot{x} = -\frac{y\dot{y}}{\sqrt{l^2 - y^2}},$$

$$\ddot{x} = \frac{-\ddot{y}y + \dot{y}^2}{\sqrt{l^2 - y^2}} + \frac{y^2\dot{y}^2}{l^2 - y^2}.$$

а затем подставим все во второе уравнение системы уравнений (10).

Решение системы уравнений производилось численным методом в программе Maple.

Для случая имитации воздействия калибровочного грузик, было принято $m = 2$ гр.

Для случая имитации воздействия импульсов тяги АИПД с частотой $f = 2$ Гц:

$$F = \sum_{i=1}^n (-1)^i \cos(2 \cdot i \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (11)$$

Среднее значение $F = 2$ гр.

Графическое представление (11) показано на Рис. 31.

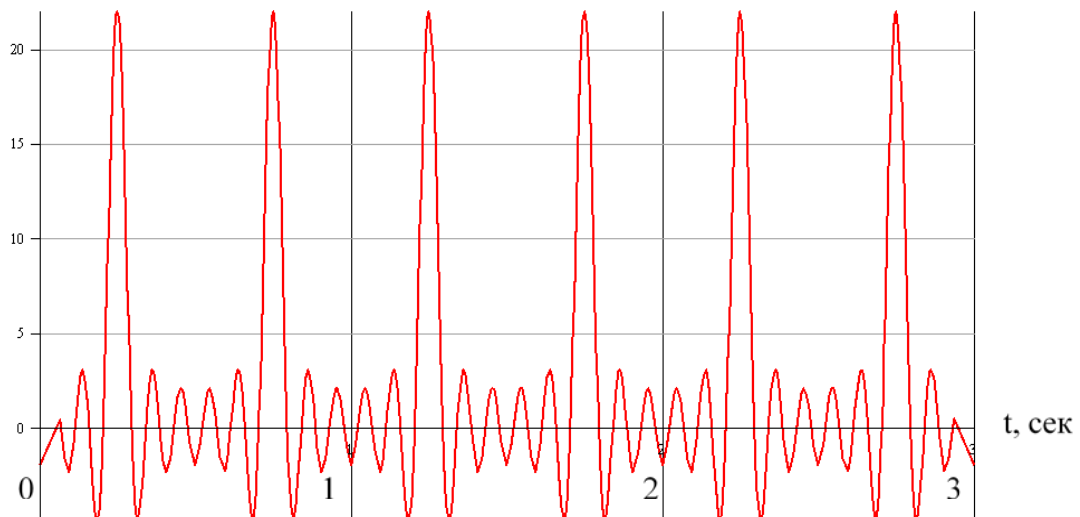


Рис. 31. Графическое представление функции (11), задающей колебания платформы со средним значением $F=2$ гр, частота 2 Гц.

На Рис. 32 показан график перемещения платформы под воздействием грузика массой $m=2$ гр.

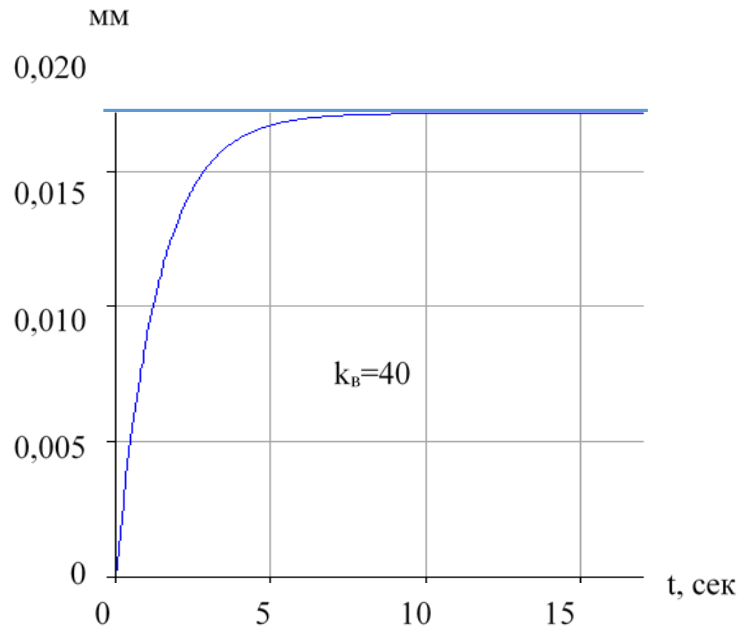


Рис. 32. Перемещение платформы ТИУ под воздействием F при коэффициенте вязкости $k_B=40$.

На Рис. 33 и Рис. 34 представлены графики изменения координаты платформы во времени под воздействием импульсных воздействий, среднее значение которых равно массе калибровочного грузика, при различных вязкостях среды.

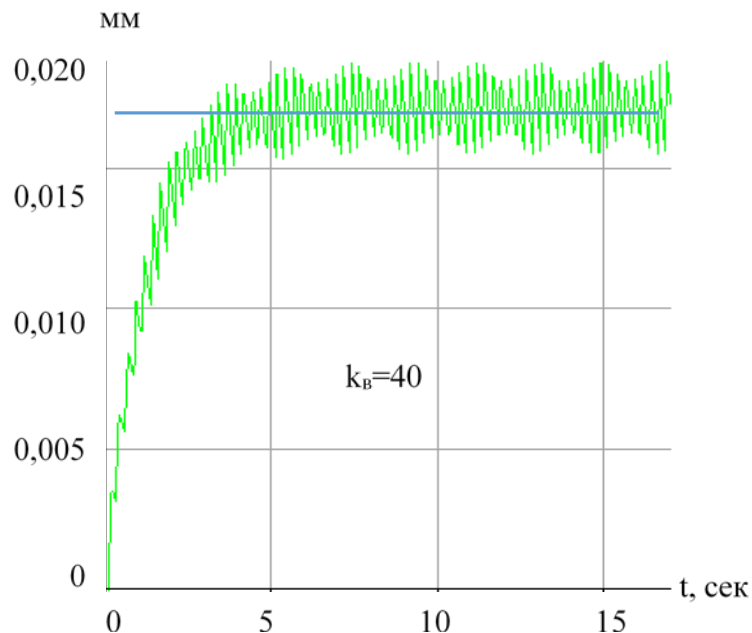


Рис. 33. Перемещение платформы ТИУ под воздействием F при коэффициенте вязкости $k_B=40$.

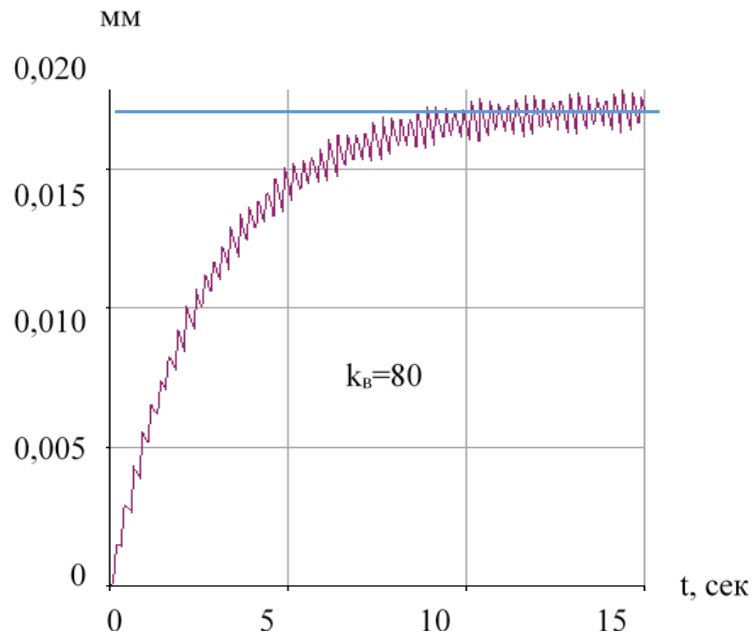


Рис. 34. Зависимость смещения платформы ТИУ от времени (коэффициент вязкости в относительных единицах $k_v=80$)

Сводный график, представленный на Рис. 35, показывает, что вязкость среды влияет на амплитуду колебаний платформы и скорость выхода на асимптоту, но не влияет на среднее значение измеряемого сигнала.

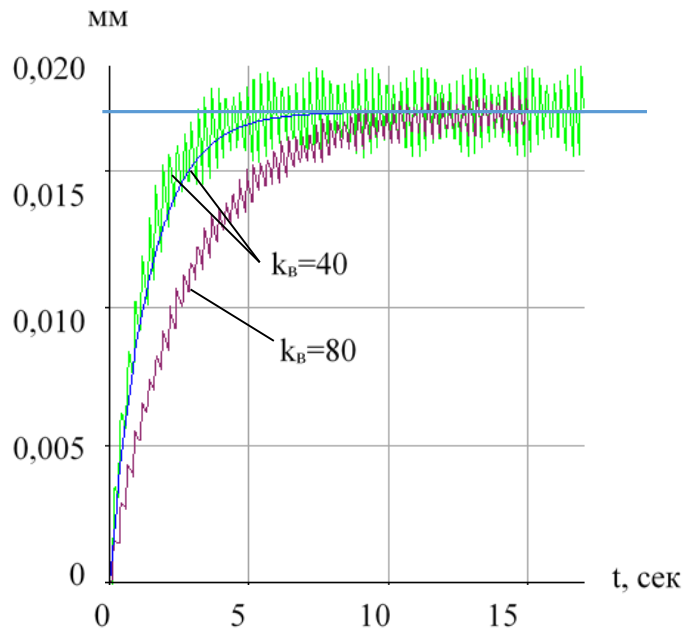


Рис. 35. Сводный график зависимости смещения платформы ТИУ от времени

При использовании среды с относительной вязкостью 80 ед. (красная осциллограмма) и 40 ед. (зеленая осциллограмма) (моделирование работы АИПД) средние значения тяги через 10

и 15 секунд соответственно достигают значения, получаемого от эталонного сигнала, моделирующего опущенный калибровочный грузик (при относительной вязкости 40 ед).

Таким образом, расчетным методом подтвержден экспериментально полученный вывод о том, что вязкость масла в демпферах не влияет на величину среднего отклонения платформы под действием импульсов тяги от ее «нулевого» положения, следовательно, данный тип тягоизмерительного устройства пригоден для достоверного измерения средней тяги АИПД [82].

2.4 Модернизация струнного тягоизмерительного устройства

Внешний вид модернизированного струнного тягоизмерительного устройства представлен на Рис. 36.

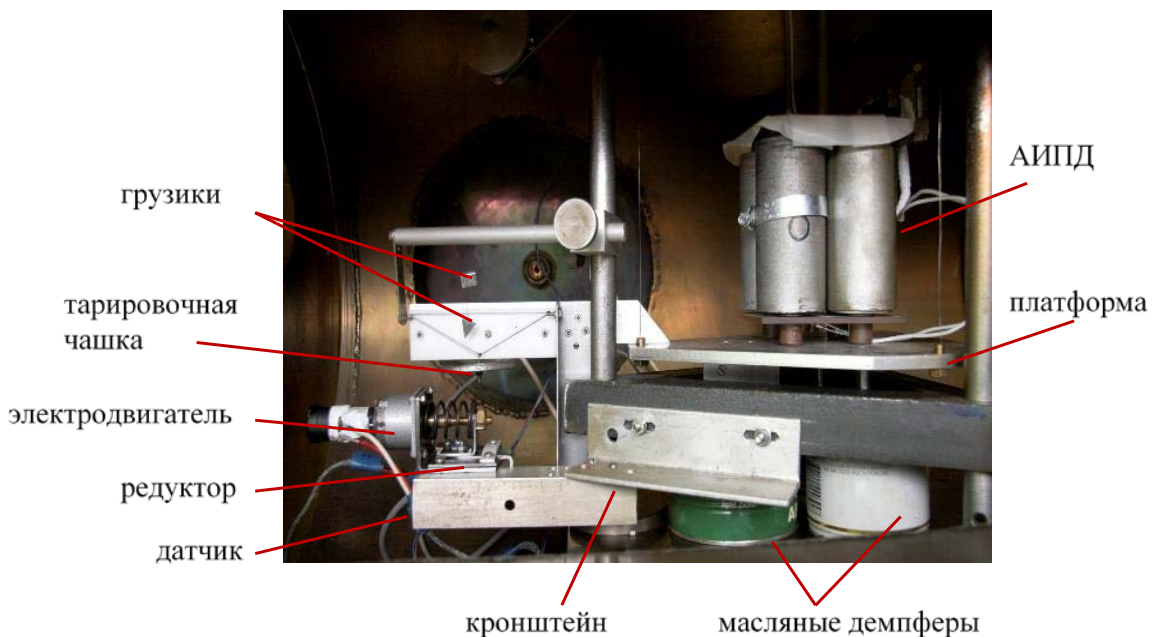


Рис. 36. Модернизированное струнное ТИУ

Для минимизации механических поперечных колебаний платформы, при сохранении прежнего уровня демпфирования, цилиндрические демпферы были закреплены на оси, перпендикулярной к смещению платформы ТИУ, и дополнительно установлен плоский демпфер для снижения воздействия момента вращения платформы, возникающего при неточной установке испытуемого образца. Также было установлено, что датчик перемещения, установленный на отдельном кронштейне, на дне вакуумной камеры и основание ТИУ колеблются с разными амплитудами и в разных фазах, что также вносит ощутимый вклад в шумы. Для минимизации колебаний была разработана новая система крепления и перемещения датчика. Электродвигатель, редуктор и датчик крепятся на кронштейне к нижнему основанию ТИУ (в отличие от имеющегося ТИУ, у которого датчик с редуктором установлен на отдельной стойке.) Это конструктивное решение позволило увеличить жесткость системы измерения и существенно уменьшить габариты ТИУ.

После модернизации была проведена повторная настройка тягомера и проведены контрольные измерения, получена осциллограмма сигнала с датчика перемещения платформы. Осциллограммы до и после модернизации ТИУ приведены на Рис. 37 и Рис. 38. Средняя линия осциллограмм соответствует средней тяге АИПД. Видно, что у модернизированного тягомера уровень шумов на сигнале с датчика перемещения, создаваемых колебаниями вакуумной системы, значительно снизился.

Калибровка используемого индуктивного датчика перемещения показала, что перемещению 0,01 мм соответствует сигнал 80 мВ.

Испытания, проведенные с лабораторными моделями АИПД меньшей мощности, показали, что модернизированное ТИУ уверенно регистрирует тяги масштаба 0,1 мН. При этом уровень помех не превышает 15% от амплитуды сигнала.

$U_{п.р.}, мВ$

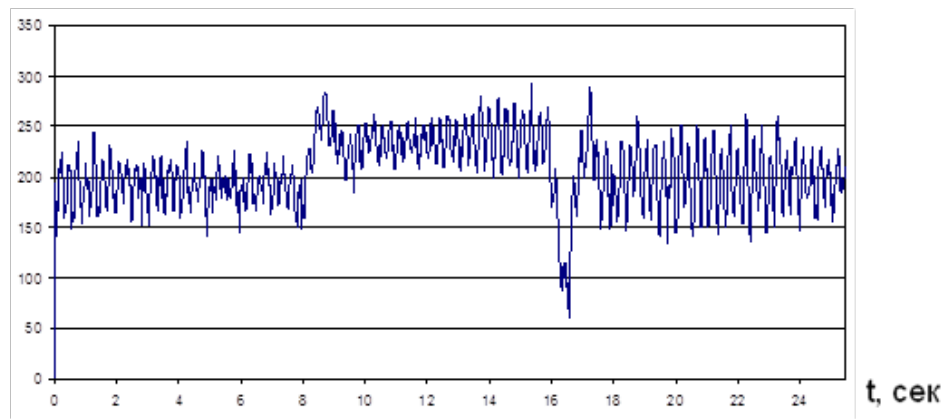


Рис. 37. Осциллограмма сигнала с датчика перемещения платформы, полученная до модернизации ТИУ

$U_{п.р.}, мВ$

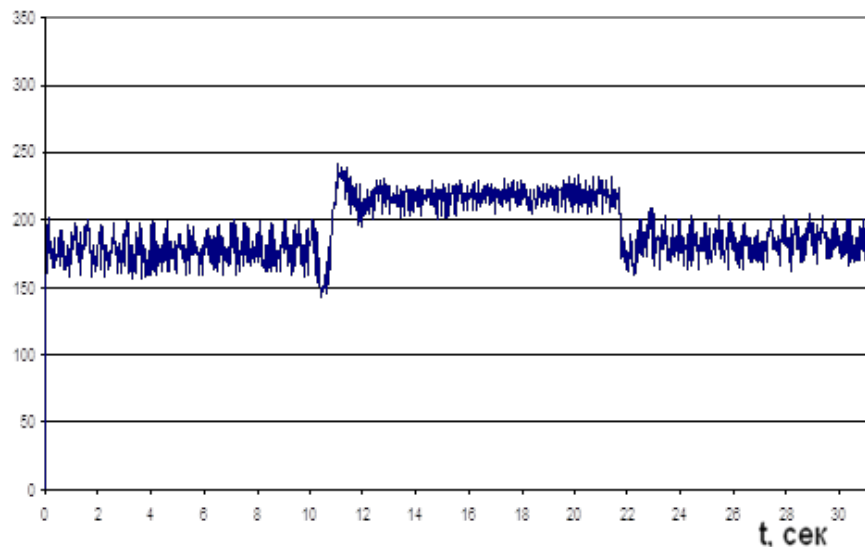


Рис. 38. Осциллограмма сигнала с датчика перемещения платформы, полученная после модернизации ТИУ

Экспериментальные исследования далее проводились с использованием модернизированного ТИУ.

2.5 Экспериментальное определение локально-временных характеристик двигателя и его систем оптическими методами

2.5.1 Интерферометрические измерения концентрации электронов

Среди множества методов исследования фазовых неоднородностей в плазме одним из наиболее развитых и точных является интерферометрия [72, 83]. Суть метода состоит в следующем: при прохождении двух электромагнитных волн в средах с показателями преломления n_1 и n_2 на выходе из сред между этими волнами возникает разность фаз:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 d_1 - n_2 d_2), \quad (12)$$

где d_1 и d_2 - толщины физических сред, λ - длина волны электромагнитного излучения.

Пусть теперь $d_1 = d_2 = d$ и $\frac{n_1}{n_2} = n$. Тогда, учитывая, что для вакуума $n_1 = 1$, получаем

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda}(1 - n)$$

или

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} d(1 - n) \quad (13)$$

где ω - частота электромагнитного излучения, c - скорость света. Показатель преломления плазмы определяется соотношением

$$n^2 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2, \quad (14)$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{2\pi N_e e^2}{m}}$ - электронная плазменная частота,

N_e - концентрация электронов,

e и m - соответственно, заряд и масса электрона.

При $n \approx 1$, т.е. при $\omega \gg \omega_p$ имеем

$$(1 - n) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 4,49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e \quad (15)$$

где λ дана в см и N_e в см^{-3} .

Тогда из (3) и (15) можно получить соотношение:

$$\Delta\varphi = \frac{e^2}{mc^2} \lambda N_e d = \text{const} \cdot N_e d \quad (16)$$

Таким образом, измеряя разность фаз $\Delta\varphi$ в плазме, мы получаем информацию об электронной концентрации. Этот метод измерения N_e может быть использован при выполнении следующих требований [83, 92]:

1. поглощение зондирующего излучения в плазме (в том числе аномальное) должно отсутствовать;

2. падающее на плазму излучение должно сохранять свое первоначальное направление;
3. модуляция интенсивности излучения на выходе из плазмы должна быть обусловлена в основном эффектом интерференции, и влияние поворота плоскости поляризации зондирующего излучения (эффект Фарадея) на его интенсивность при наличии магнитных полей в плазме должно быть незначительным [83].

Первое из этих требований означает, что частота лазерного излучения должна превосходить все частоты элементарных процессов в плазме (включая гирочастоты), т.е.

$$\omega \gg \omega_{pi} \text{ и } \omega \gg \omega_{pe}$$

где ω_{pi}, ω_{pe} - электронная и ионная плазменные частоты, соответственно,

$$\omega \gg \omega_{Hi} \text{ и } \omega \gg \omega_{He}$$

где ω_{Hi} и ω_{He} - электронная и ионная ларморовские частоты, соответственно

$$(\omega_{He} = \frac{eH}{mc}; \omega_{Hi} = \frac{eH}{Mc}; m, M - \text{массы электрона и иона}).$$

$$\omega \gg \omega_{ee}; \omega \gg \omega_{ei}; \omega \gg \omega_{en}$$

где ω_{ee} - частота электрон-электронных столкновений в плазме,

ω_{ei} - частота электрон-ионных столкновений в плазме,

ω_{en} - частота столкновений электронов с нейтральными атомами.

Для плазмы рассматриваемых АИПД эти условия выполняются.

Второе требование означает, что недопустимы сколь-либо значительные отклонения лазерного излучения на градиентах электронной концентрации в плазменном образовании. Выполнение этого требования проверялось экспериментально в достаточно близких физических условиях с помощью теневой схемы регистрации с визуализацией поля на длине волны $\lambda = 6943 \text{ \AA}$. При этом не было зарегистрировано наличия градиентов электронной концентрации, превосходящих $\nabla N_e \sim 10^{14} \text{ см}^{-4}$. При таких значениях градиентов концентрации электронов отклонение зондирующего луча не превышает величины $\sim 1^\circ$.

Анализируя третье требование, можно отметить, что здесь речь идет, в основном, о наличии магнитных полей в исследуемой плазме, которые могли бы оказать некоторое влияние на интенсивность выходящего из плазмы излучения посредством поворота плоскости поляризации зондирующего излучения (эффект Фарадея). Однако магнитозондовые измерения показывают, что максимальные регистрируемые магнитные поля в исследуемой модели не превосходят величины 10 кГс, что, в принципе, может обеспечить угол поворота плоскости поляризации излучения на величину $\sim 1^\circ$ и выражается в изменении его интенсивности менее чем на 1% [84].

В случае низкой степени ионизации следует также учесть вклад в рефракцию, вносимый атомами и ионами, либо показать, что он незначителен [85]. Согласно расчетам, для излучения в видимой области спектра ($\lambda \approx 5000 \text{ \AA}$) формула (10) применима вплоть до $N_e \approx 10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Вклад, который вносят в рефракцию плазмы атомы и ионы в нормальном и возбужденном состояниях, описывается формулой

$$(n - 1)_a = \frac{2\pi e^2}{m} \sum_{\substack{i,k \\ i \neq k}} \frac{f_{ik} N_i}{\omega_{ik}^2 - \omega^2} = \frac{e^2}{2\pi m c^2} \sum \frac{f_{ik} \lambda^2 \lambda_{ik}^2 N_i}{\lambda^2 - \lambda_{ik}^2}, \quad (17)$$

где N_i - концентрация атомов или ионов на i -м уровне, λ_{ik} , f_{ik} и ω_{ik} - соответственно, длина волны, сила осциллятора и частота, соответствующие переходу между i и k уровнями.

Для газов при температурах $10^3 \dots 10^4$ К наибольший вклад в рефракцию вносят нейтральные атомы в основном состоянии. Так как резонансные линии большинства газов лежат в области вакуумного ультрафиолета, то для излучения в видимой области ($\lambda \gg \lambda_{ik}$) формулу (17) можно записать в виде:

$$(n - 1)_a = \frac{e^2}{2\pi m c^2} \left\{ \sum_k f_{ik} \lambda_{ik}^2 + \frac{\sum_k f_{ik} \lambda_{ik}^4}{\lambda^2} \right\} N_a = \left\{ A + \frac{D}{\lambda^2} \right\} \frac{N_a}{N_0} \quad (18)$$

Здесь N_0 - число Лошмидта, N_a - концентрация атомов в нормальном состоянии.

Для видимой области спектра $D/\lambda^2 \ll A$ и рефракция атомов и молекул практически не зависит от длины волны. Формула (13) может быть записана также следующим образом

$$(n - 1)_a = 2\pi \alpha_a N_a = C_a N_a, \quad (19)$$

где α_a - поляризуемость частиц, C_a - рефракция в расчете на один атом.

В «красной» области спектра, когда величиной D/λ^2 в формуле (18) можно пренебречь, поляризуемость связана с коэффициентом A соотношением $\bar{\alpha}_a = A/2\pi N_0$, где $\bar{\alpha}_a$ - поляризуемость при низких частотах. Величины A , D и $\bar{\alpha}_a$ для различных атомов и молекул приводятся в работе [85].

Для большинства газов поляризуемости атомов имеют величины порядка $10^{-25} \dots 10^{-24}$ см и, таким образом, абсолютная величина рефракции атомов в расчете на одну частицу $C_a = 2\pi \alpha_a \approx 10^{-24} \dots 10^{-23} \text{ см}^3$, тогда как для электронов эта величина составляет $C_e = -4,49 \cdot 10^{-14} \cdot \lambda^2 \approx 10^{-22} \text{ см}^3$ (при $\lambda \sim 5000 \text{ \AA}$), что на 1...2 порядка больше соответствующей величины для атомов [85].

Для корректного выяснения вопроса о влиянии ионной и атомной компонент плазмы на результаты интерферометрических измерений могут использоваться намерения на двух или на трех длинах волн, причем желательно, чтобы одна из используемых длин волн находилась в инфракрасной области спектра. Тем не менее, считаю, что приведенная оценка является

разумной, и в условиях проведённых экспериментов вкладом атомов в рефракцию плазмы было пренебрежено.

Оценки, проведенные по формулам работы [92] показали, что в условиях данных экспериментов рефракция плазмы определяется электронами, а вкладом атомов можно пренебречь. Таким образом применение в данной работе лазерной интерферометрии для измерения концентрации электронов является корректным.

При нахождении плазмы в пассивном резонаторе изменяется его оптическая длина и, соответственно этому изменяется собственная частота излучения, выходящего из резонатора. Этот сдвиг частоты $\Delta\nu$ определяется формулой [85]

$$\Delta\nu = (\Delta n \cdot d) \cdot c / \lambda L_r, \quad (20)$$

где $\Delta n \cdot d$ – изменение оптического пути, вызванное плазмой, Δn – изменение показателя преломления в резонаторе, d – размер плазмы в направлении луча лазера, L_r – длина резонатора, λ – длина волны излучения лазера.

Поскольку трехзеркальный интерферометр работает как амплитудно-частотный преобразователь с линейной характеристикой, сдвиг частоты, вызванный плазмой, приведет к пропорциональному изменению мощности генерации лазера ΔE на выходе из интерферометра

$$\Delta E = E_{\max}(\Delta\nu / \delta), \quad (21)$$

где E_{\max} – максимальная мощность лазера, δ – интервал изменения частоты ν .

Концентрация электронов в плазме N_e определяется на основе анализа сигналов интерферометра, зарегистрированных при нахождении плазмы в пассивном резонаторе. Периодическое смещение выходного зеркала пассивного резонатора обеспечивает регистрацию аппаратной функции интерферометра, используемую в качестве калибровочного сигнала. Типичная аппаратная функция, полученная для одного из экспериментов, приведена на Рис. 39.

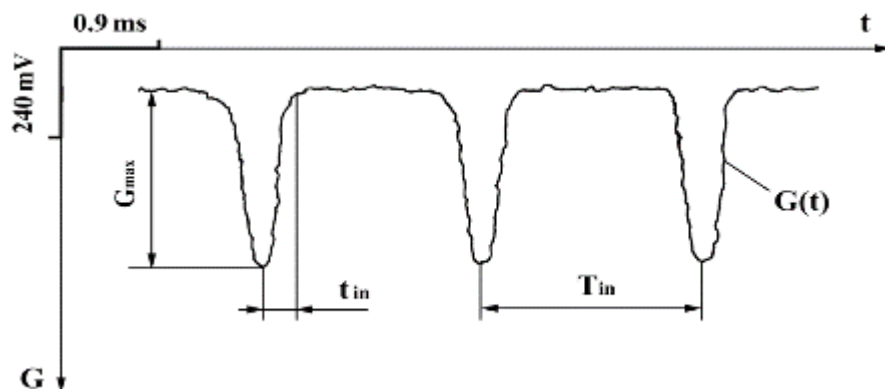


Рис. 39. Аппаратная функция интерферометра

Измерение амплитуды сигнала фотоумножителя, пропорционального ΔE , и измерение параметров аппаратной функции (амплитуды G_{\max} , длительности фронта t_{in} и периода T_{in}) позволяют определить величину Q произведения концентрации электронов N_e на размер плазмы d в направлении луча лазера ($Q = N_e \cdot d$), характеризующую изменение фазы излучения при появлении плазмы в резонаторе. Формула для Q , полученная на основе известных соотношений для коэффициента преломления плазмы и изменения мощности лазера [75, 77], имеет вид:

$$Q(x, y, t) = N_e \cdot d = 1,8 \cdot 10^{17} \frac{\Delta E(x, y, t)}{E_{\max}} \cdot \frac{\Delta t_{in}}{T_{in}} \approx 1,8 \cdot 10^{17} \frac{\Delta F(x, y, t)}{G_{\max}} \cdot \frac{\Delta t_{in}}{T_{in}}, \text{ см}^{-3}, \quad (22)$$

где E_{\max} – максимальная мощность лазера,

ΔF – величина исследуемого сигнала, полученного на фотоумножителе,

G_{\max} – амплитуда сигнала аппаратной функции,

Δt_{in} – длительность фронта аппаратной функции (Рис. 39),

T_{in} – период аппаратной функции (Рис. 39),

x – продольная координата исследуемой точки в направлении оси ИПУ,

y – поперечная координата точки в направлении между электродами,

t – время.

2.5.2 Спектроскопические измерения концентрации электронов

Как известно, электронная концентрация N_e при штарковском механизме уширения линии H_β связана с полушириной контура этой линии соотношением [86]

$$N_e = C(N_e, T) \cdot \Delta \lambda_s^{3/2}, \quad (23)$$

где $C(N_e, T)$ – штарковская константа, приведенная в [86],

$\Delta \lambda_s$ – полуширина контура линии.

Анализ контура спектральной линии водорода H_β и измерение полуширины этой линии $\Delta \lambda_s$ с учетом полуширины аппаратной функции $\Delta \lambda_{in}$ позволили экспериментально определять концентрацию электронов N_e в плазме АИПД.

2.6 Оценка погрешности измерений

При обработке результатов экспериментальных исследований всегда возникает задача оценки погрешности, допущенной при измерении.

В процессе проведения научно-исследовательских работ с экспериментальными образцами АИПД измерялось среднее значение тяги, масса шашек рабочего тела, напряжение зарядки конденсаторов, емкость конденсаторной батареи, величина разрядного тока. Фиксировалась также частота работы и длительность функционирования АИПД. По

результатам измерений рассчитывались следующие характеристики двигателя: единичный импульс тяги, удельный импульс тяги, расход рабочего тела за один импульс.

Система измерения тяги – струнный тягомер прямого действия – подробно описана в разделах 2.2-2.4.

Ошибки в измерениях средней тяги делятся на систематические и случайные. Основными систематическими погрешностями для данного тягоизмерительного устройства являются: дрейф нулевого значения, связанный с тепловыми деформациями элементов ТИУ, колебания, обусловленные механическими вибрациями вакуумных насосов и прочих источников. Дрейф нулевого значения является функцией, слабо зависящей от времени, и корректируется при помощи электромеханического привода положения индукционного датчика. Для устранения влияния на результаты измерений дрейфа нулевого значения все измерения тяги производились в режиме «отсечки» основного разряда. Связанная с этим методом погрешность за счет взаимодействия проводников с током между собой пренебрежимо мала.

В диапазоне тяг от 0,5 до 10 мН систематическая погрешность измерений данного ТИУ составляет не более 2%.

Для уменьшения случайных ошибок и с целью повышения достоверности результатов обработка величин тяги и массы шашек проводилась по пяти измерениям. При отсутствии реального технического задания величина доверительной погрешности задана согласно рекомендациям, представленным в используемой литературе. Для закона нормального распределения случайных величин рекомендуется доверительная вероятность для оценок $\alpha = 0,95$. При числе измерений $n=5$ коэффициент Стьюдента $t_\alpha = 2,78$ [87]. Доверительный интервал может быть представлен в виде:

$$\bar{a} - t_\alpha \Delta S_{\bar{a}} \leq a \leq \bar{a} + t_\alpha \Delta S_{\bar{a}}, \quad (24)$$

где:

– a - истинное значение измеряемой величины;

– $\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$ - математическое ожидание серии измерений случайной величины a_i ;

– $\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}$ -среднеквадратическая погрешность результатов серии измерений;

– $\Delta a_i = \bar{a} - a_i$ (3.4) -«измеряемая» абсолютная погрешность.

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, то принято, что она с доверительной вероятностью 95% находится в указанном интервале значений, согласно

рекомендациям в используемой литературе. Для оценки точности измерений воспользуемся понятием относительной погрешности ε , которая равна:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}}}{\bar{a}} \cdot 100 \% \quad (25)$$

Результаты проведенной статистической обработки измерений тяги приведены в Табл. 4, результаты статистической обработки измерений массы шашек приведены в Табл. 5.

Табл. 4 Величина погрешности измерения тяги АИПД

Режим	P_i , мН	\bar{P} , мН	$\Delta S_{\bar{a}}$, мН	$\bar{P} - t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}} \leq P \leq \bar{P} + t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}}$, мН	ε , %
U=1200 В v=2 Гц	2,36	2,44	0,026	$2,36 \leq P \leq 2,51$	2,99
	2,46				
	2,47				
	2,39				
	2,5				

Табл. 5 Величина погрешности измерения массы шашек АИПД

Режим	m_i , г	\bar{m} , г	$\Delta S_{\bar{a}}$, г	$\bar{m} + t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}} \leq m \leq \bar{m} - t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}}$, г	ε , %
U=1200 В v=2 Гц	80,37	80,342	0,012	$80,309 \leq U \leq 80,376$	0,042
	80,34				
	80,2994				
	80,36				
	80,3424				

Глава 3. Исследование процессов развития разряда и ускорения плазмы в АИПД

3.1 Экспериментальное исследование развития разряда в АИПД оптическими методами

Исследования стадий развития разряда в АИПД проводились на основе электрофизических измерений, интерферометрических, спектроскопических и магнитозондовых измерений в видимой и ультрафиолетовой части спектра плазмы АИПД.

При электрофизических исследованиях начальной стадии развития импульсного разряда в АИПД для измерения токов в электродах свечи поджига и полного тока моделей АИПД использовались пояса Роговского.

Для анализа особенностей рабочих процессов в АИПД нового поколения с целью дальнейшего улучшения удельных характеристик АИПД и повышения эффективности преобразования энергии были проведены исследования стадий развития импульсного электрического разряда в канале двигателя, исследования распределений концентрации электронов в АИПД, измерения электронной температуры плазмы и распределений магнитного поля и плотности тока в разрядном канале АИПД путем использования интерферометрического, спектроскопических, теневого и магнитозондового методов диагностики плазмы, что позволило лучше понять процессы, приводящие к улучшению характеристик АИПД нового поколения, а также наметить пути дальнейшего совершенствования рабочего процесса двигателя.

Исследования рабочих процессов в АИПД нового поколения проводились на экспериментальном образце АИПД-55 с энергией 55 Дж, который был принят в качестве базового образца АИПД повышенной эффективности. Следует отметить, что подобные исследования проводились ранее на экспериментальном образце АИПД-50Э с такой же энергией разряда [75], однако использованный в рамках настоящих исследований образец отличается применением более совершенных конденсаторов – ICAR MSR 25.

Внешний вид образца АИПД-50 с накопителем энергии, состоящим из 12 конденсаторов ICAR MSR 25 емкостью 6,8 мкФ каждый, имеющих минимальные омические потери, представлен на Рис. 40.

Экспериментальный образец АИПД-50 имеет следующие основные интегральные параметры:

- единичный импульс тяги – 1,35 мН·с;
- средняя тяга при номинальной частоте 2 Гц – 2,7 мН;
- среднemasсовая скорость истечения плазмы – 12,9 км/с;
- тяговая эффективность – 0,15.

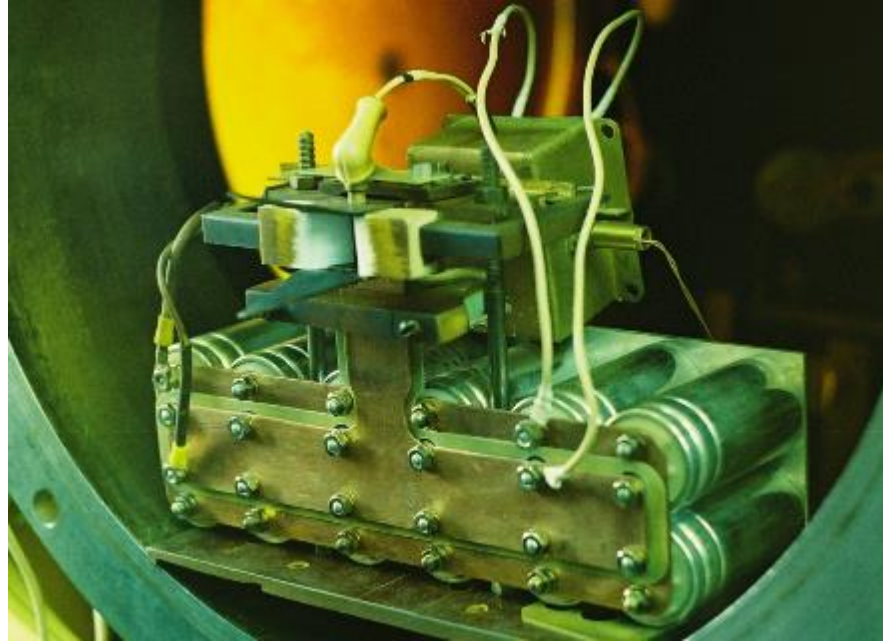


Рис. 40. Внешний вид экспериментального образца АИПД-55 с конденсаторной батареей емкостью 55 Дж

Однако, в ходе исследований не рассматривалась первая стадия разряда – темновая. Это объясняется, отсутствием излучения, которое можно было бы зарегистрировать, и, на основании которого, можно было бы судить о процессах, происходящих на этой стадии разряда. Проведенные исследования условий возникновения науглероживания шашек РТ дают основание полагать, что существенную роль играют процессы зарождения разряда, проходящие на темновой стадии разряда.

3.1.1 Интерферометрические исследования распределений концентрации электронов в разрядном канале АИПД

В ходе исследований, проведенный в НИИ ПМЭ ранее, установлено, что распределения концентраций заряженных частиц в каналах АИПД с квазиаперидической формой разряда различных энергий (в диапазоне 20...150 Дж) принципиально не отличаются. Происходит вынос тока за границы разрядного канала, что дает возможность проводить исследования физических процессов, происходящих в разряде АИПД, используя модели с различными энергиями разряда.

Концентрация электронов относится к основным параметрам плазмы, определяющим физические процессы в канале АИПД и интегральные параметры двигателя.

Для измерения электронной концентрации в разрядном канале АИПД, а также в плазменном сгустке вне разрядного канала использовался метод лазерной интерферометрии плазмы. В НИИ ПМЭ МАИ ранее проводились измерения концентрации электронов в межэлектродном пространстве АИПД за срезом шашек и вне разрядного канала [77], а также в зоне разрядного канала между фторопластовыми шашками [72]. Эти эксперименты были выполнены на моделях АИПД-100 и АИПД-150 с постоянным по длине канала расстоянием между электродами при запасаемой энергии 100 Дж и 150 Дж соответственно.

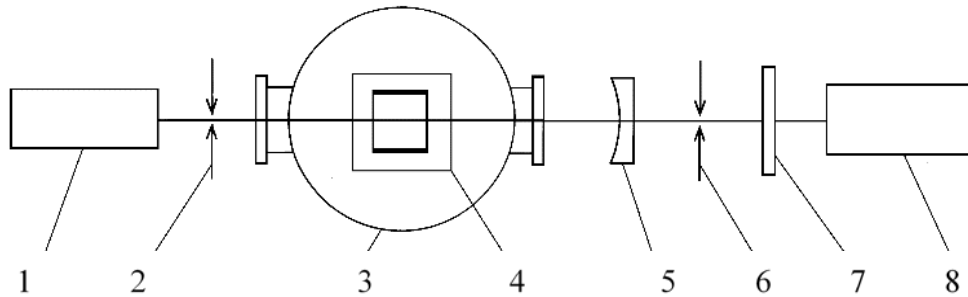
В исследованной ранее модели АИПД нового поколения при энергии разряда 100 Дж (АИПД-100) увеличение плотности тока вблизи среза электродов вследствие выноса тока за пределы шашек вызывало заметное увеличение концентрации электронов у среза электродов [72, 77], что согласовалось с данными магнитозондовых измерений плотности тока, приведенными в [75, 77]. В традиционных АИПД первого поколения с низкой тяговой эффективностью ток локализуется в пространстве между шашками и на участке канала от среза шашек до среза электродов концентрация электронов и плотность тока уменьшаются при движении плазменного сгустка к выходу из канала [77].

В настоящей работе приведены результаты исследования распределений концентрации электронов в экспериментальном образце АИПД-55 повышенной эффективности с раскрывающимися за срезом шашек электродами при запасаемой энергии 55 Дж. В экспериментах на АИПД-55 получены данные по изменению электронной концентрации во всём разрядном канале АИПД, включая пространство между шашками рабочего тела, а также вне разрядного канала.

Эксперименты по исследованию пространственно-временных распределений концентрации электронов N_e в образце АИПД-55 проводились в вакуумной камере с давлением остаточного газа $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. Измерение N_e в плазме АИПД производилось лазерным интерферометром с фотоэлектрической регистрацией сигнала [92].

Оптическая схема интерферометрических измерений приведена на Рис. 41. В классической схеме трехзеркального интерферометра [83, 92] был применен одномодовый гелий-неоновый лазер 1 типа ЛГН-207Б мощностью 15 мВт. Вакуумная камера 3 с исследуемой моделью АИПД размещается между выходным зеркалом лазера и внешним сферическим зеркалом 5 с фокусным расстоянием ~ 1 м, образующими пассивный резонатор интерферометра. Внешнее зеркало закреплено на пьезоэлектрическом керамическом цилиндре, обеспечивающим периодическое смещение зеркала с частотой 50 Гц при подаче модулирующего напряжения ~ 10 В. Колебания оптической длины пассивного резонатора

позволяют регистрировать аппаратную функцию интерферометра, используемую в качестве калибровочного сигнала и для синхронизации измерений.



1 – гелий-неоновый лазер; 2, 6 – диафрагмы; 3 – вакуумная камера; 4 – исследуемая модель АИПД; 5 – сферическое зеркало; 7 - фильтр; 8 – фотоэлектронный умножитель

Рис. 41. Оптическая схема интерферометрических измерений

Концентрация электронов N_e измерялась в разрядном канале в зоне между фторопластовыми шашками (2) и в межэлектродном пространстве за срезом шашек, а также вне разрядного канала за срезом электродов (1). Схема расположения линий просвечивания плазмы, вдоль которых был направлен луч лазера при измерениях N_e , показана на Рис. 42. Луч гелий-неонового лазера пересекает исследуемую плазму АИПД параллельно плоскости электродов, т.е. вдоль линии, параллельной оси z . Точки, показанные на Рис. 42, представляют собой точки пересечения линий просвечивания плазмы с плоскостью, перпендикулярной электродам и проходящей через геометрическую ось канала АИПД. Измерения N_e проводились на оси разрядного канала, а также вблизи катода и анода.

Для прохождения лазерного луча через шашки в каждой из них в соответствии с расположением линий просвечивания плазмы выполнялось по одному отверстию диаметром 4 мм. После завершения измерений в каждом из направлений просвечивания эти отверстия последовательно закрывались фторопластовыми заглушками. Согласно данным сравнительных экспериментов наличие одной пары отверстий в шашках рабочего тела практически не влияет на характеристики АИПД.

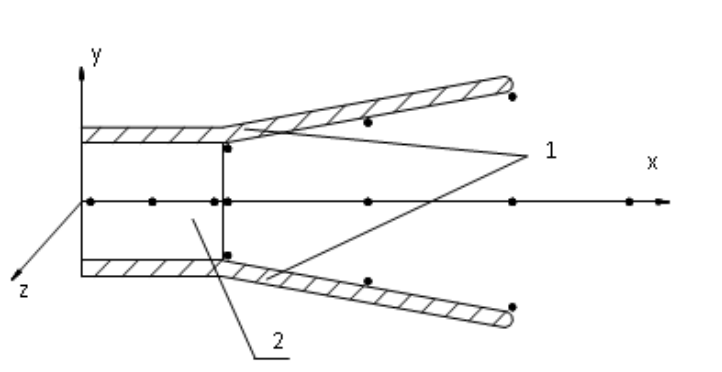


Рис. 42. Схема расположения линий просвечивания плазмы при измерениях концентрации электронов в модели АИПД-55

Основными требованиями, при выполнении которых метод лазерной интерферометрии может применяться для диагностики плазмы, являются [84, 85]:

1. Поглощение зондирующего излучения в плазме должно отсутствовать.
2. Падающее на плазму излучение должно сохранять своё первоначальное направление и отклонение луча лазера на градиентах электронной концентрации должно быть пренебрежимо мало.
3. Модуляция интенсивности излучения на выходе из плазмы должна быть обусловлена в основном эффектом интерференции и влияние поворота плоскости поляризации зондирующего излучения (продольный магнитооптический эффект Фарадея) на его интенсивность при наличии магнитных полей в плазме должно быть незначительным.

Проведенные оценки и эксперименты [72, 77] показали, что применение метода лазерной интерферометрии для измерения концентрации электронов в АИПД является корректным.

При известной протяженности плазменного сгустка d по оси z в исследуемых точках АИПД может быть найдена средняя вдоль направления просвечивания концентрация электронов.

Размер плазмы d в направлении зондирующего луча (параллельном оси z) приближённо определялся по размеру следа, оставляемого плазменным сгустком при работе АИПД в частотном режиме на диэлектрическом экране, устанавливаемом перпендикулярно направлению движения сгустка на различных расстояниях от среза электродов.

Регистрация результатов интерферометрических измерений выполнялась с помощью двух цифровых запоминающих осциллографов (INSTEKGDS-830 и С9-8). Для синхронизации всех элементов измерительной схемы использовался многоканальный генератор импульсов.

Для снижения уровня механических колебаний системы использовалась подвеска рамы с размещёнными на ней элементами интерферометра к массивной металлической конструкции с помощью резиновых жгутов. При проведении измерений была обеспечена защита электрической схемы интерферометра и измерительной аппаратуры от различных помех. Уровень электромагнитных помех был снижен до 10...50 мВ при амплитуде сигнала, регистрируемого интерферометром, ~100...500 мВ и световые помехи были подавлены до уровня нескольких милливольт.

Пространственное разрешение используемой схемы составляло 2 мм, разрешение фотоэлектронного умножителя по времени было равно 1 мкс и нижняя граница чувствительности интерферометра по измеряемой величине концентрации электронов составляла $\sim 3,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

При исследовании параметров плазмы АИПД-55 методом лазерной интерферометрии проведены измерения концентрации электронов N_e на участке разрядного канала между фторопластовыми шашками, в межэлектродной зоне за срезом шашек и вне разрядного канала (Рис. 42).

Сигнал $F(t)$, регистрируемый фотоэлектронным умножителем при появлении плазмы в пассивном резонаторе интерферометра, соответствует изменению во времени параметра $Q = N_e \cdot d$ в заданной точке с координатами x_i, y_i при движении плазмы. Величина $Q(x, y, t)$ находилась по результатам интерферометрических измерений с помощью соотношения (22), представленного в разделе 2.5, а затем при известной протяженности плазменного сгустка $d(x, y)$ в направлении лазерного луча определялась концентрация электронов $N_e(x, y, t)$.

В пространстве между шашками размер сгустка d по оси z равен ширине разрядного канала. В остальных исследуемых точках (Рис. 42) для нахождения d использовались измерения границ сгустка по следам, оставляемым плазмой на экранах.

Интерферометрические измерения электронной концентрации N_e показали, что в разрядном канале формируется токовый слой и в его центральной части есть область плазмы с максимальной величиной N_e .

Для каждой исследуемой точки АИПД-55 проводилось 1-3 эксперимента, в каждом из которых было выполнено 10-12 интерферометрических измерений N_e , а затем после обработки экспериментальных данных полученные результаты усреднялись. Типичные результаты экспериментов для трех точек АИПД-55, расположенных на оси разрядного канала в зоне между шашками ($x = 12$ мм), на срезе шашек ($x = 22$ мм) и на срезе электродов ($x = 72$ мм), приведены в Табл. 6, 7 и Табл. 8.

Табл. 6 Результаты измерений N_e в АИПД-55 в точке с продольной координатой $x = 12$ мм, расположенной на оси разрядного канала в зоне между шашками

Амплитуда сигнала интерферометра F , мВ	98,4
Средняя амплитуда помехи F_n , мВ	19,3
Амплитуда аппаратной функции G_{\max} , мВ	121
Длительность фронта аппаратной функции Δt_{in} , мс	0,42
Период аппаратной функции T_{in} , мс	1,16
Параметр $Q = N_e \cdot d$, 10^{16} см ²	4,2
Протяженность плазменного сгустка d , см	2,1
Средняя величина параметра Q , см ²	$4,23 \cdot 10^{16}$
Средняя величина концентрации электронов N_e , см ⁻³	$2,01 \cdot 10^{16}$

Табл. 7 Результаты измерений N_e в АИПД-55 в точке с продольной координатой $x = 22$ мм, расположенной на оси разрядного канала на срезе шашек

Амплитуда сигнала интерферометра F , мВ	106,4
Средняя амплитуда помехи F_n , мВ	18,9
Амплитуда аппаратной функции G_{max} , мВ	140,8
Длительность фронта аппаратной функции Δt_{in} , мс	0,44
Период аппаратной функции T_{in} , мс	1,52
Параметр $Q = N_e \cdot d$, 10^{16} см^{-2}	3,29
Протяженность плазменного сгустка d , см	3,2
Средняя величина параметра Q , см^{-2}	$3,29 \cdot 10^{16}$
Средняя величина концентрации электронов N_e , см^{-3}	$1,03 \cdot 10^{16}$

Табл. 8 Результаты измерений N_e в АИПД-55 в точке с продольной координатой $x = 72$ мм, расположенной на оси разрядного канала на срезе электродов

Амплитуда сигнала интерферометра F , мВ	117,5
Средняя амплитуда помехи F_n , мВ	17,7
Амплитуда аппаратной функции G_{max} , мВ	186
Длительность фронта аппаратной функции Δt_{in} , мс	0,35
Период аппаратной функции T_{in} , мс	1,5
Параметр $Q = N_e \cdot d$, 10^{16} см^{-2}	2,2
Протяженность плазменного сгустка d , см	5,4
Средняя величина параметра Q , см^{-2}	$2,20 \cdot 10^{16}$
Средняя величина концентрации электронов N_e , см^{-3}	$4,07 \cdot 10^{15}$

Изменение максимальной концентрации электронов вдоль оси канала АИПД при движении плазмы в зоне между фторопластовыми шашками, за срезом шашек и вне разрядного канала показано на Рис. 43. Моменты времени от начала разряда, соответствующие появлению слоя плазмы с максимальной величиной N_e в точках АИПД, находящихся в области канала между шашками, приведены рядом с измеренными значениями концентрации электронов.

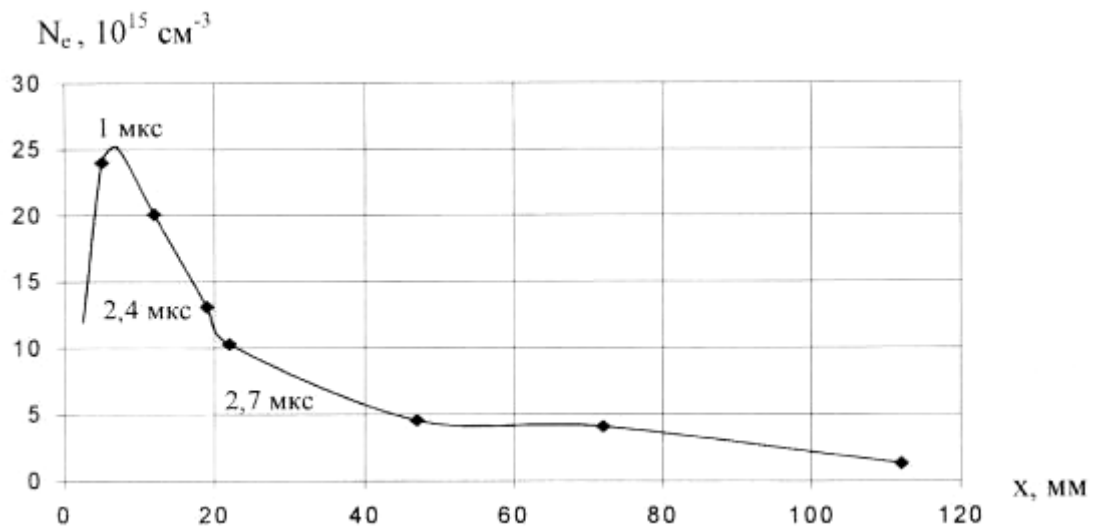


Рис. 43. Пространственно-временное распределение концентрации электронов при движении плазменного сгустка вдоль оси АИПД-55

Из Рис. 43 видно, что наибольшие значения N_e ($2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) зарегистрированы в начале разрядного канала в зоне между шашками. Это связано с влиянием начального пробоя межэлектродного промежутка вблизи торцевого изолятора при включении АИПД и с увеличением тока при развитии основного разряда в канале АИПД. В экспериментальном образце АИПД-50Э максимальное значение тока I_{\max} достигается во время движения плазменного сгустка в начале канала между шашками при $t \sim 1,9$ мкс. При приближении плазмы к срезу шашек ($t > 2$ мкс) ток уменьшается, и концентрация электронов снижается.

При движении плазмы за срезом шашек снижение концентрации электронов замедляется и затем в межэлектродной зоне величина N_e остается практически постоянной. Это связано с тем, что в модели АРРТ-50Э повышенной эффективности с квазиаперриодическим разрядом часть тока не локализуется в зоне среза шашек, как в АИПД первого поколения с затухающим колебательным разрядом, а выносится в межэлектродное пространство за пределы шашек и разряд распределяется по всей длине электродов. На выходе АИПД за срезом электродов концентрация электронов уменьшается, что вызвано расширением сгустка после его вылета из канала ускорителя.

Срез шашек соответствует координате $x=22$ мм, а срез электродов – $x=72$ мм.

Следует отметить, что эффект выноса тока в межэлектродной зоне за срез шашек и распространение разряда по всей поверхности электродов характерен для всех АИПД нового поколения повышенной эффективности, разработанных в НИИ ПМЭ МАИ [72, 77].

В рассматриваемом в данной работе образце АИПД-55 нового поколения с раскрывающимися за срезом шашек электродами в отличие от модели АИПД-100 с постоянным по длине межэлектродным расстоянием, несмотря на распространение разряда по всей поверхности электродов в конце первого полупериода, концентрация электронов N_e вблизи среза электродов не возрастает, а сохраняется примерно постоянной. Это может быть объяснено более интенсивным расширением плазмы при её движении за пределами шашек вследствие раскрытия электродов.

В образце АИПД-55, имеющем меньшую энергию (55 Дж) и длительность первого полупериода разряда (5,3 мкс) по сравнению с АИПД-100 (соответственно, 100 Дж и 8,9 мкс), наблюдается смещение пространственного положения максимума электронной концентрации внутрь канала в направлении торцевого изолятора.

Рис. 44 иллюстрирует изменение концентрации электронов N_e по длине канала у анода и у катода в процессе движения плазмы в АИПД-55 в первом полупериоде разряда. Вследствие проявления эффекта Холла на участке разрядного канала от среза шашек до среза электродов значения концентрации электронов в прикатодной области превышают значения N_e у анода.

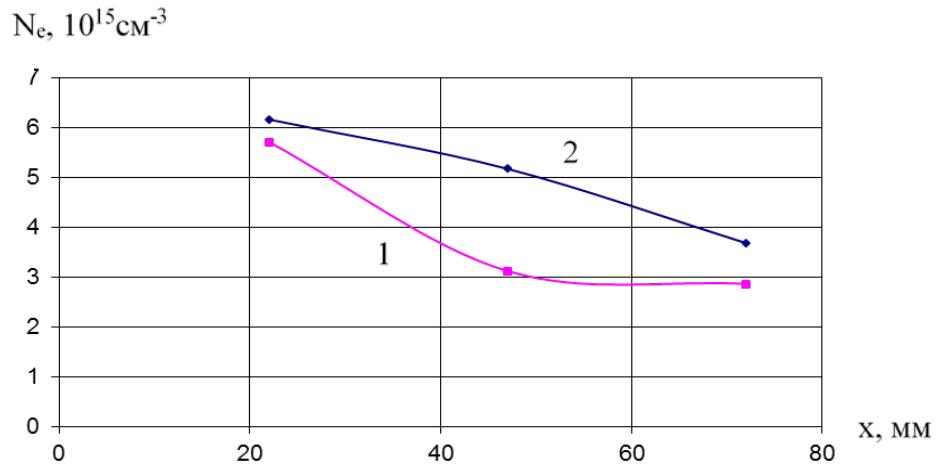


Рис. 44. Распределения концентрации электронов по длине канала образца АИПД-55 у анода (нижняя кривая) и у катода (верхняя кривая)

Поперечная электромагнитная сила, возникающая в результате взаимодействия продольного холловского тока с поперечным магнитным полем от рабочего тока АИПД, прижимает поток плазмы к катоду и уравнивается поперечным градиентом давления.

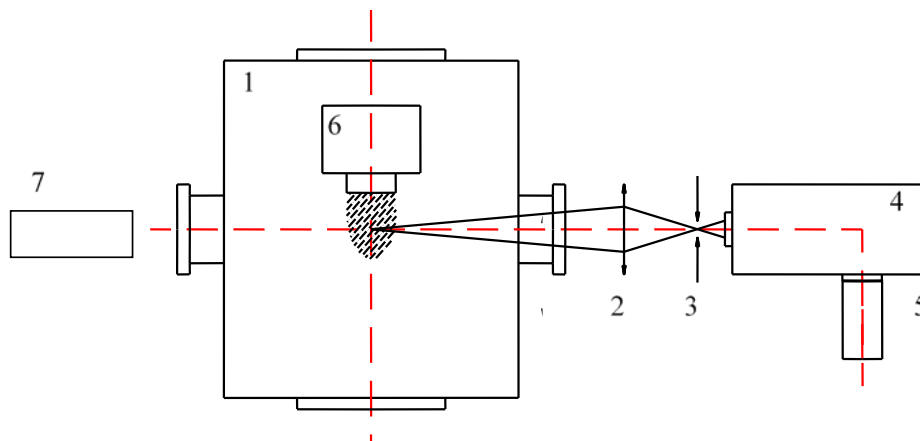
Таким образом, результаты экспериментальных исследований пространственно-временных распределений концентрации электронов в образце АИПД-55 указывают на перераспределение тока в разрядном канале и вынос тока в межэлектродное пространство за пределы шашек. Такая динамика разряда характерна для АИПД нового поколения, созданных в НИИ ПМЭ МАИ и способствует повышению эффективности процесса преобразования энергии в АИПД. Это подтверждается магнитозондовыми исследованиями распределения разрядного тока в АИПД-55, результаты которых приведены в разделе 3.3.

С уменьшением запасаемой энергии АИПД и длительности разряда максимум в распределении концентрации электронов в зоне шашек смещается ближе к началу канала АИПД. Следствием проявления эффекта Холла в условиях данных экспериментов является также асимметрия в распределении концентрации электронов в канале АИПД между электродами из-за воздействия поперечной электромагнитной силы.

3.1.2 Спектроскопические исследования развития разряда в АИПД

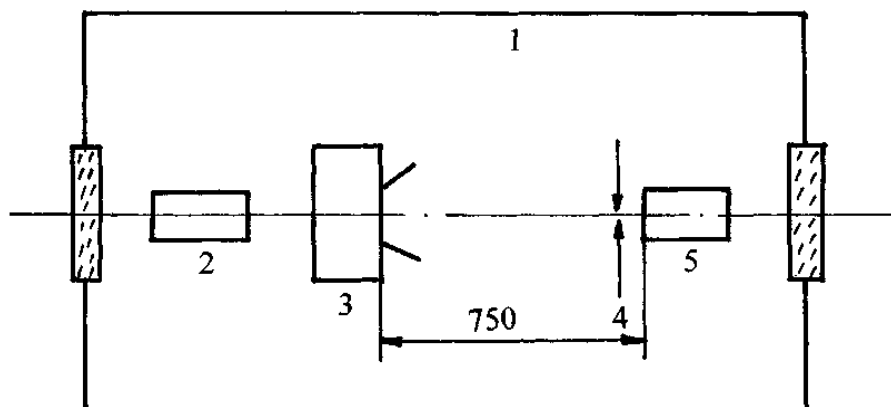
Оптические схемы спектроскопических измерений показаны на Рис. 45 и Рис. 46. В качестве экспериментальной аппаратуры при спектроскопических измерениях использовались: монохроматор МДР-23 с решеткой 1200 штрихов/мм, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-85, регистратор излучения ВЭУ-4 в ультрафиолетовой области спектра, цифровые осциллографы (С9-8 и GDS-830), синхронизирующие устройства (GDG-8210, ГИ-1), а также вспомогательная оптика.

Для оценки времени задержки выхода массы рабочего вещества (фторопласта) относительно начала основного тока в разрядном канале использовались спектроскопические измерения времени задержки начала регистрации излучения элементов плазмы в канале АИПД.



1 – вакуумная камера; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – монохроматор МДР-23; 5 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-85; 6 – экспериментальный образец АИПД-55; 7 – гелий-неоновый лазер

Рис. 45. Оптическая схема спектроскопических измерений в видимом диапазоне спектра



1 – вакуумная камера; 2 – гелий-неоновый лазер; 3 – экспериментальный образец АИПД-55; 4 – диафрагма; 5 – регистратор излучения ВЭУ-4

Рис. 46. Оптическая схема спектроскопических измерений в ультрафиолетовом диапазоне спектра

Спектроскопические измерения проводились в направлении, перпендикулярном оси разрядного канала. Для таких измерений в шашках рабочего вещества были сделаны технологические отверстия диаметром 4 мм. Отверстия были необходимы для вывода излучения из разрядного канала. Располагались они на расстоянии ~ 1 см от начала шашек на уровне оси разрядного канала. При этом в экспериментах было подтверждено, что наличие таких отверстий в шашках практически не изменяло интегральные характеристики АИПД.

Вся измерительная схема была тщательно экранирована от паразитных засветок, что проверялось экспериментально. Фотоэлектронный умножитель был помещен в металлический контейнер с коаксиальными выводами, а измерительный тракт защищался ферритовыми развязками, что позволяло снизить уровень электромагнитной помехи от срабатывания АИПД до 20...50 мВ.

При спектроскопических исследованиях в ультрафиолетовой части спектра регистратор ВЭУ-4 устанавливался внутри вакуумной камеры. В экспериментах любое проведенное измерение повторялось 5 раз, а результаты затем усреднялись.

Для проведения измерений выбирались изолированные спектральные линии плазмы АИПД, состоявшей, в основном, из атомов и ионов фтора и углерода (продуктов абляции фторопласта). В экспериментах регистрировались также некоторые линии меди, присутствовавшей в исследуемой плазме в незначительном количестве как продукт эрозии электродов свечи поджига и основных электродов АИПД. Выбранные спектральные линии находились в различных частях видимого диапазона спектра. Спектральный диапазон, выделяемых изолированных линий, составлял $\pm 1,5 \text{ \AA}$. Основные параметры спектральных линий, выбранных для спектроскопических исследований начальной стадии разряда АИПД, приведены в Табл. 9.

Табл. 9 Параметры выбранных спектральных линий плазмы АИПД-55 [91]

Элемент плазмы АИПД	Длина волны, \AA	Относительная яркость, условные единицы	Потенциал возбуждения, эВ
СI	5380,3	400	9,99
FI	6348,5	1000	14,68
СII	3980,3	200	27,48
FII	4246,1	800	31,56
СIII	4186,9	300	42,96
FIII	3121,5	300	43,29

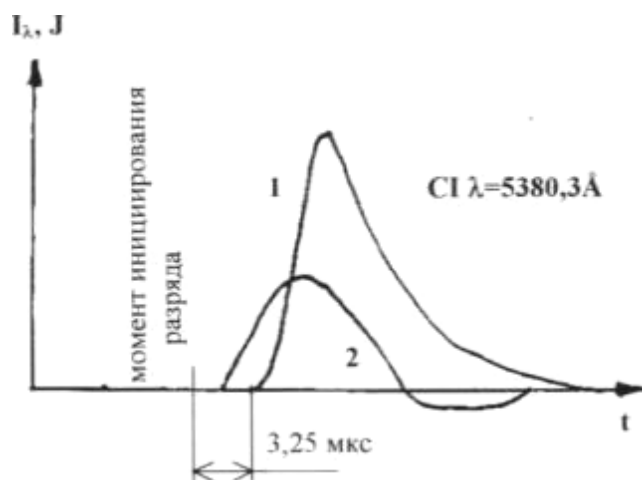
В качестве косвенной проверки объективности получения данных в отдельных интервалах спектра производилась также регистрация интегрального света разряда (без использования монохроматора).

Экспериментальные данные по временам задержки начала регистрации излучения в канале АИПД линий атомов (СI, FI, CuI), однократно и двукратно заряженных ионов (СII, FII и СIII, FIII) рабочего вещества относительно момента инициирования разряда (срабатывания игнайтера) приведены в Табл. 10.

Табл. 10 Времена задержки начала регистрации излучения элементов плазмы

Элемент плазмы АИПД	Длина волны, А	Время задержки, мкс
СI	5380,3	3,25
FI	6348,5	3,3
СII	3980,3	3,3
FIИ	4246,1	3,4
СIII	4186,9	3,15
FIИ	3121,5	3,15

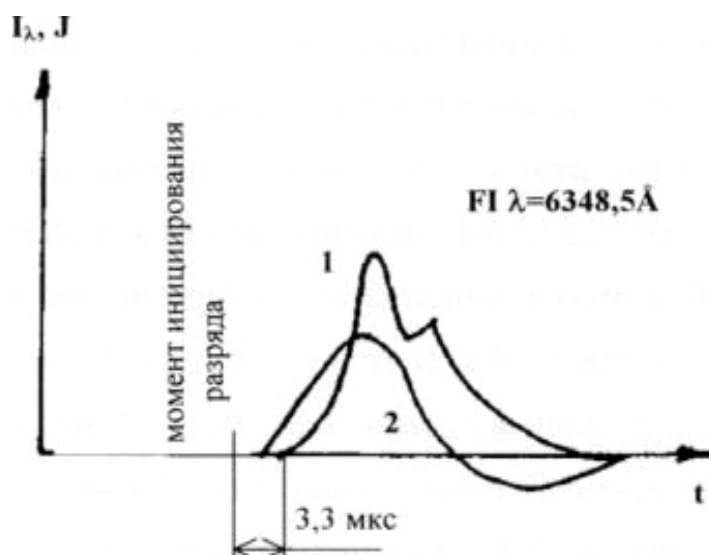
На Рис. 47 и Рис. 48 схематически показаны характерные зависимости интенсивностей излучения I_λ выбранных спектральных линий (на примере линий СI $\lambda=5380,3\text{Å}$ и FI $\lambda=6348,5\text{Å}$ от времени t развития разряда, зафиксированные на экране осциллографа. Там же приведены зависимости тока J ускорителя от времени. Цифры на оси абсцисс на рис. 45-46 указывают интервалы времени между моментом инициирования разряда и началом высвечивания спектральной линии. Сопоставление зависимостей от времени излучения плазмы в отдельных спектральных линиях и интегральном свете показало, что излучение ни одной из этих линий не появляется раньше, чем интегральное свечение, что косвенно является подтверждением корректности проведенных экспериментов.



1.- осциллограмма интенсивности излучения I_λ (в условных единицах)

2 - осциллограмма тока J (в условных единицах). Время t - в микросекундах

Рис. 47. Зависимости интенсивности излучения I_λ спектральной линии СI $\lambda=5380,3\text{Å}$ и тока разряда J от времени t



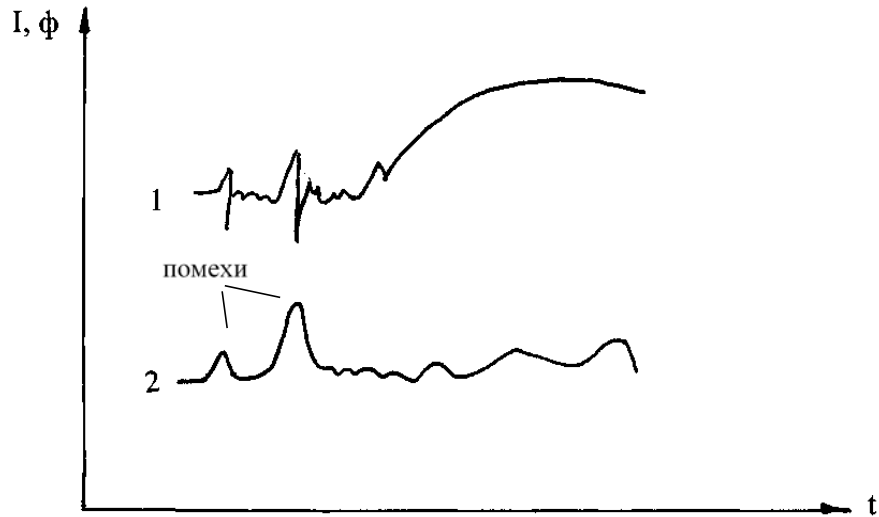
- 1 - осциллограмма интенсивности излучения I_λ (в условных единицах)
 2 - осциллограмма тока J (в условных единицах). Время t - в микросекундах

Рис. 48. Зависимости интенсивности излучения I_λ спектральной линии $FI \lambda = 6348,5 \text{ \AA}$ и тока разряда J от времени t

Проведенные измерения показывают, что интервалы времени между моментом инициирования разряда (моментом срабатывания игнйтера) и началом регистрации излучения возбужденных атомов и ионов рабочего тела составляют 3,15...3,4 мкс. Эти значения можно считать временами задержки выхода основной массы рабочего вещества из боковых стенок разрядного канала относительно момента инициирования, поскольку времена ионизации и возбуждения малы.

При дальнейшей работе по определению временных параметров начальной фазы разряда и возможном механизме зарождения процесса абляции использовался регистратор ультрафиолетового излучения ВЭУ-4 со спектральным диапазоном чувствительности для квантов падающего излучения с длинами волн λ от 100 \AA до 1500 \AA и запоминающий осциллограф GDS-830 с полосой пропускания 100 МГц.

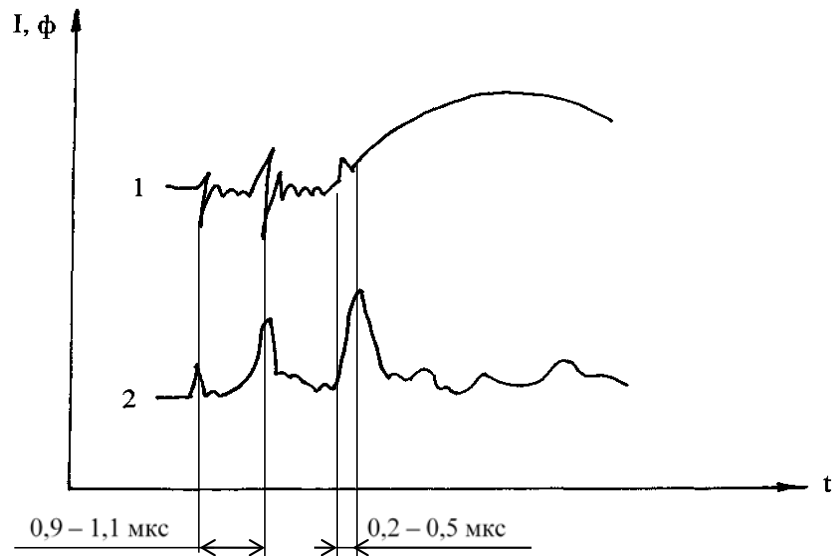
При спектроскопических исследованиях начальной стадии разряда в ультрафиолетовом диапазоне спектра плазмы АИПД-55 регистрировался сигнал прибора ВЭУ-4 параллельно с сигналами разрядного тока из каналов игнйтера и основного разряда. Соответствующие осциллограммы приведены на Рис. 49 и Рис. 50.



1 – осциллограмма тока;

2 – осциллограмма электромагнитных помех в цепи ВЭУ-4 при выключенном напряжении питания

Рис. 49. Осциллограммы тока АИПД-55 на начальной стадии разряда и электромагнитных помех в измерительном тракте ВЭУ-4



1 – осциллограмма тока;

2 – осциллограмма сигнала ВЭУ-4 при включенном напряжении питания

Рис. 50. Осциллограммы тока АИПД-55 на начальной стадии разряда и сигнала регистратора ультрафиолетового излучения ВЭУ-4

На Рис. 49 представлены осциллограмма тока АИПД-55 на начальной стадии разряда и осциллограмма сигнала регистратора ультрафиолетового излучения ВЭУ-4 при выключенном напряжении питания ВЭУ-4. Характерные пики на осциллограмме 2 на этом рисунке обусловлены электромагнитными помехами в измерительной цепи при срабатывании трехэлектродной схемы поджига ускорителя. Таким образом, полностью избавиться от электромагнитных помех в условиях расположения регистратора ВЭУ-4 непосредственно внутри вакуумной камеры не удалось. Поэтому сигнал, изображенный на Рис. 50, не рассматривался в качестве полезного, а служил показателем уровня электромагнитной помехи в измерениях.

При подаче питания на ВЭУ-4 (3,5 кВ) регистрируемая осциллограмма сигнала приобретала вид, представленный на Рис. 50. Можно отчетливо наблюдать трехпиковую структуру сигнала ВЭУ-4, регистрировавшуюся с хорошей повторяемостью. Отметим, что третий пик на этой осциллограмме соответствовал интервалу времени $\sim 0,2...0,6$ мкс от момента начала основного тока разряда, что хорошо согласуется с третьей особенностью осциллограммы тока АИПД-55, приведенной на Рис. 50.

Нейтральные атомы и заряженные ионы не могут регистрироваться ВЭУ-4 из-за гораздо больших время-пролетных характеристик измерительной схемы. Учитывая спектральную чувствительность регистратора ВЭУ-4 относительно квантов излучения, можно сделать предположение, что третий пик на осциллограмме сигнала ВЭУ-4 (Рис. 50) обусловлен потоком жестких квантов с длиной волны ~ 1000 Å. Более того, при перекрытии входного «зрачка» ВЭУ-4 оптическим стеклом БС-3, не пропускающим излучение в области вакуумного ультрафиолета, сигнал с регистратора исчезал. Эти факты не противоречат теории механизма абляции рабочего тела импульсного плазменного ускорителя, основанной на радиационных эффектах. Однако, отсутствие монохроматора, способного выделять узкие спектральные интервалы в области вакуумного ультрафиолета, не позволило более конкретно определить длину волны зарегистрированного излучения.

Вообще говоря, наличие микроскопических областей, способных излучать в ультрафиолетовом диапазоне спектра в начальной фазе разряда в АИПД, вполне возможно. Ультрафиолетовое излучение в разрядном канале возникает, предположительно, вследствие срабатывания третьей ступени игнайтера, которое по времени пересекается с начальной стадией развития основного разряда.

Таким образом в результате проведенных исследований начальной стадии разряда удалось установить, что процесс развития разряда в АИПД протекает следующим образом. После возникновения искрового пробоя между двумя электродами в схеме поджига происходит интенсивное зарождение проводимости на поверхности игнайтера, которое приводит к тому,

что в разряд игнайтера через 0,9...1,1 мкс включается третий электрод, создающий мощный импульс для возникновения основного разряда в цепи. Длительность срабатывания третьего электрода игнайтера составляет 1,5...2,0 мкс. Параллельно с этим процессом развивается основной разряд, в котором через 0,2...0,5 мкс после начала, фиксируется особенность в виде пика на осциллограмме тока, что объясняется началом интенсивного перекрытия электронной лавиной основного разрядного канала.

Высвечивание атомов и ионов плазмы наблюдается в интервале времени 3,15...3,4 мкс от момента возникновения первой искры в игнайтере. Этот временной интервал можно считать задержкой выхода основной массы рабочего вещества из боковых стенок канала АИПД (фторопластовых шашек) относительно момента возникновения первой искры в игнайтере.

Из экспериментов в ультрафиолетовой области спектра было установлено, что третья особенность на осциллограмме тока возникает через 0,2...0,5 мкс после начала основного тока. Указанный интервал времени соответствует появлению третьего пика на осциллограмме сигнала регистратора ультрафиолетового излучения ВЭУ-4. Это, возможно, означает присутствие жестких квантов излучения в разрядном канале с длиной волны $\sim 1000 \text{ \AA}$, обусловленных существованием в разряде в эти моменты времени плазменных образований, возникающих после срабатывания второй ступени игнайтера.

3.1.3 Спектроскопические измерения концентрации электронов в разрядном канале АИПД

Наряду с интерферометрическими измерениями электронной концентрации N_e в экспериментальном образце АИПД-55, описанными в разделе 3.2.1, были проведены спектроскопические измерения N_e . Целью этих опытов было получение значения концентрации электронов за счет анализа уширения какой-либо спектральной линии из большого набора линий, присутствующих в разряде. Для достижения этой цели была использована оптическая схема спектроскопических измерений, представленная на Рис. 45.

Из анализа спектра излучения разряда в двигателе АИПД-55 было установлено присутствие в рассматриваемом спектре водородных линий наряду с линиями фтора и углерода (продуктов абляции рабочего вещества – фторопласта), а также линиями меди (продукта эрозии электродов игнайтера и основных электродов АИПД). Водород в плазме АИПД присутствовал в незначительном количестве вследствие наличия в вакуумной камере остаточных газов (паров воды и вакуумного масла). Для проведения спектроскопических измерений была выбрана линия водорода H_β .

Оценки показали, что доминирующим механизмом уширения линии H_β в условиях эксперимента является линейный эффект Штарка. Полуширина контура линии H_β определялась с учетом аппаратного и доплеровского уширения этой линии. Доплеровская полуширина

линии H_{β} оценивалась величиной $0,2 \text{ \AA}$. Эффект Зеемана при характерных для экспериментальных образцов АИПД уровнях магнитных полей по оценкам давал вклад в уширение линии H_{β} меньше $0,1 \text{ \AA}$ и потому не учитывался.

Для измерения аппаратной функции был использован гелий-неоновый лазер ЛГН-207Б. При этом все схемные элементы экспериментального оборудования, участвовавшие в измерении аппаратной функции оставались такими же, как и при проведении экспериментов на АИПД-50Э. Сканирование спектра при измерении аппаратной функции осуществлялось с шагом $0,125 \text{ \AA}$. В результате было установлено, что полуширина аппаратной функции $\Delta\lambda_{in}$ составляет величину $0,2 \text{ \AA}$.

Измерения контура спектральной линии H_{β} проводились на оси канала образца АИПД-55 при регистрации спектра излучения плазмы вдоль луча, перпендикулярного к оси АИПД, в сечении, находившимся на расстоянии 25 мм от среза шашек в точке с продольной координатой $x = 47 \text{ мм}$. Сканирование по спектру осуществлялось с шагом $0,25 \text{ \AA}$. Полученный в экспериментах контур линии H_{β} приведен на Рис. 51.

$$\bar{I}_{\lambda} = I_{\lambda}/I_{max}$$

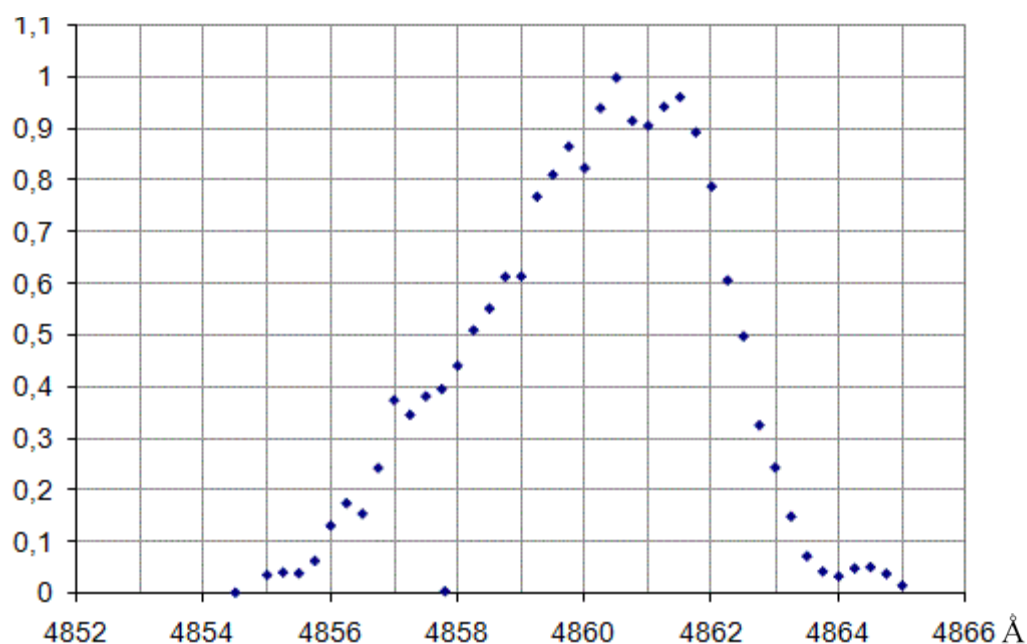


Рис. 51. Зависимость относительной интенсивности $\bar{I}_{\lambda} = I_{\lambda}/I_{max}$ спектральной линии H_{β} от длины волны λ в образце АИПД-55 на оси канала в сечении, расположенном в 25 мм от среза шашек.

По оси абсцисс отложены значения длин волн спектральных линий излучения лазера в ангстремах (А), по оси ординат отложены относительные значения интенсивности излучения спектральных линий.

Как известно, электронная концентрация N_e при штарковском механизме уширения линии H_β связана с полушириной контура этой линии соотношением [86]

$$N_e = C(N_e, T) \Delta\lambda_s^{3/2} \quad (26)$$

где $C(N_e, T)$ – штарковская константа, приведенная в [86],

$\Delta\lambda_s^{3/2}$ – полуширина контура линии.

Анализ контура спектральной линии водорода H_β 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 образце двигателя АИПД-55 на оси канала на расстоянии 25 мм от среза шашек величина N_e составила $3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

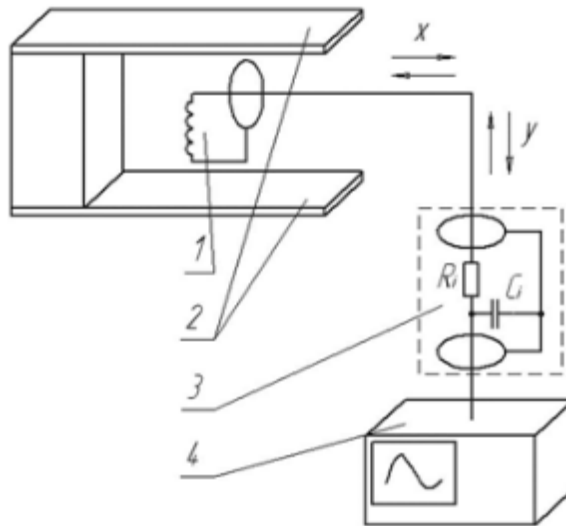
В результате проведения спектроскопических измерений появилась возможность сравнения величины N_e , полученной двумя различными методами. Как следует из результатов интерферометрических измерений, приведенных на Рис. 43 (раздел 3.2.1), значение концентрации электронов в точке, находящейся на расстоянии 25 мм от среза шашек ($x = 47$ мм), составляет $N_e \approx 4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает удовлетворительное согласие измерений N_e интерферометрическим и спектроскопическим методами.

3.2 Исследование распределений плотности тока в разрядном канале образца АИПД методом магнитозондовой диагностики

Магнитозондовые измерения являются широко распространенным способом экспериментального исследования распределения разрядного тока в ускорительных каналах электроракетных двигателей различного типа. Однако такие исследования в канале АИПД рельсового типа сталкиваются со значительными трудностями. Конфигурация магнитного поля принципиально трехмерная, так как в разряде присутствуют все три компоненты плотности разрядного тока j_x , j_y , j_z и три компоненты вектора магнитной индукции B_x , B_y , B_z , изменяющиеся во времени. Кроме того, обратная задача восстановления распределения тока по измеренным в нескольких точках значениям магнитной индукции представляют собой классический пример некорректной задачи математической физики, когда единственной заданной конфигурации магнитного поля соответствует бесконечное множество решений. За исключением нескольких частных случаев таких, как аксиально-симметричный разряд, однозначное решение задачи требует наложения на функцию распределения плотности тока дополнительных эмпирических ограничений, например, требования того, чтобы искомая функция была достаточно гладкой. Приближенные математические методы решения некорректных задач изложены в [94].

Простейшим частным случаем решения является расчет распределения линейной плотности разрядного тока $J_y(x)$ вдоль продольной оси x разрядного канала в одномерном приближении. Такой расчет, основанный на экспериментально измеренных значениях магнитной индукции $B_z(x)_{\text{exp}}$, позволяет проследить развитие разряда в каналах различного типа и определить его влияние на интегральные характеристики двигателя.

Схема магнитозондовых измерений в разрядном канале АИПД показана на Рис. 52. Использовался магнитный зонд индуктивного типа, помещенный в керамическую трубку с внешним диаметром 2,5 мм. Чувствительность зонда составляла 640 Гс/мВ. В процессе измерений зонд перемещался вдоль средней линии канала, на равном расстоянии от обоих электродов и шашек рабочего тела. На этой линии присутствует только одна компонента индукции магнитного поля $B_z(x)$, что значительно облегчает калибровку магнитного зонда.



1 – магнитный зонд, 2 – электроды АИПД, 3 – RC-интегратор, 4 – осциллограф

Рис. 52. Схема магнитозондовых измерений в канале АИПД

Для перемещения зонда использовалось дистанционно управляемое координатное устройство с двумя степенями свободы. Шаг перемещения составлял 5 мм. В процессе эксперимента измерялся также разрядный ток $J(t)$, для чего использовался пояс Роговского. Осциллограммы разрядного тока и сигнала с магнитного зонда регистрировались двухлучевым цифровым осциллографом. Магнитный зонд и пояс Роговского были связаны с осциллографом коаксиальными кабельными линиями с RC-интеграторами.

Магнитный зонд диаметром 2,5 мм, помещенный в разрядный канал с межэлектродным зазором 20...40 мм, несомненно, вносит в разряд возмущение, которое может повлиять на распределение разрядного тока. Однако, проведенные 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

введение магнитного зонда не вносит качественных искажений в распределение разрядного тока.

Расчетная схема разрядных токов представлена на Рис. 53. Здесь величина J соответствует полному разрядному току, h – расстоянию между электродами двигателя, x_0 – расстоянию от токоподвода до обращенной к разряду поверхности торцевого изолятора, x – расстоянию, на котором чувствительность магнитного зонда еще позволяет уверенно регистрировать сигнал.

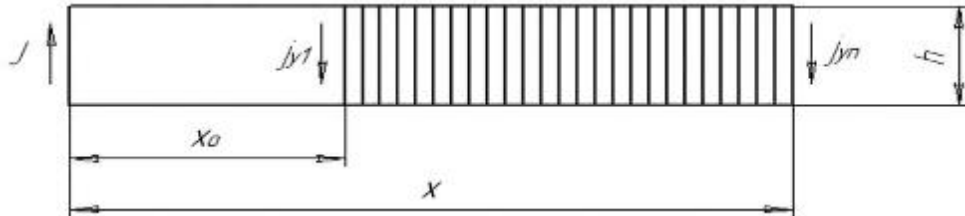


Рис. 53. Расчетная схема разрядных токов

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 $B_{zexp}(x)$.

Магнитная индукция B_{zj} в каждой точке x_j на оси ускорительного канала рассчитывалась как сумма магнитных индукций B_{zij} от каждого i -го элемента расчетной схемы разрядных токов J_{yi} :

$$B_{zj} = \sum_{i=1}^n B_{zij}, \quad (27)$$

где в соответствии с уравнением Био-Савара-Лапласа

$$B_{zij} = \frac{\mu_0 j_{yi}}{4\pi} \left[\frac{h}{x_j \sqrt{x_j^2 + (h/2)^2}} + \frac{h}{x_i - x_j \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h/2)^2}} + \frac{4x_j}{\sqrt{x_j^2 + (h/2)^2}} + \frac{4(x_i - x_j)}{h - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h/2)^2}} \right] \quad (28)$$

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

$$S(j_{yi}) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \left(\frac{2 \cdot (B_{zj} - B_{zjexp})}{B_{zj} + B_{zjexp}} \right)^2} \quad (29)$$

имеющему физический смысл среднеквадратичного отклонения расчетной индукции магнитного поля B_{zj} от экспериментально измеренной $B_{zj}exp$ при следующем дополнительном условии:

$$\sum_{i=1}^n j_{yi} = J, \quad (30)$$

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 $B_z(x)exp$. требует регуляризации численного решения, то есть включения в постановку задачи, кроме условия, еще и требования, чтобы искомая функция $J_y(x)$ была достаточно гладкой [96]. Стандартный прием состоит в добавлении к минимизируемому функционалу $S(j_{yi})$ малой регуляризирующей добавки так, что решается задача нахождения минимума функционала $F(j_{yi}, \alpha_1, \alpha_2)$, равного

$$F(j_{yi}, \alpha_1, \alpha_2) = S(j_{yi}) + \alpha_1 \cdot \int_0^x \left(\frac{dJ_y(x)}{dx} \right)^2 dx + \alpha_2 \int_0^x \left(\frac{d^2 J_y(x)}{dx^2} \right)^2 dx \quad (31)$$

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 $S(j_{yi})$, предпочтение отдается более гладкой, имеющей меньшее значение $F(j_{yi}, \alpha_1, \alpha_2)$.

Данная вариационная задача численно реализована при помощи метода локальных вариаций [97]. Последний является разновидностью метода покоординатного спуска, применим к широкому классу вариационных задач и позволяет легко учитывать ограничения, накладываемые на искомую функцию $J_y(x)$. 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, найденное в предыдущий момент времени.

Параллельно с расчетом функции распределения линейной плотности тока $J_y(x)$ рассчитывалась также индуктивность разрядного канала L по формуле

$$L = \Phi / J \quad (32)$$

где $\Phi = \int_S B_z(x) ds$ и $S = xh$ – площадь области, занятой расчетной схемой разрядных токов.

Магнитозондовые исследования пространственно-временных распределений магнитного поля и плотности тока проводились в плазме импульсного разряда экспериментального образца двигателя АИПД-55 с энергией разряда 55 Дж. Рассчитанные по результатам магнитозондовых измерений пространственно-временные распределения линейной плотности разрядного тока представлены на Рис. 54.

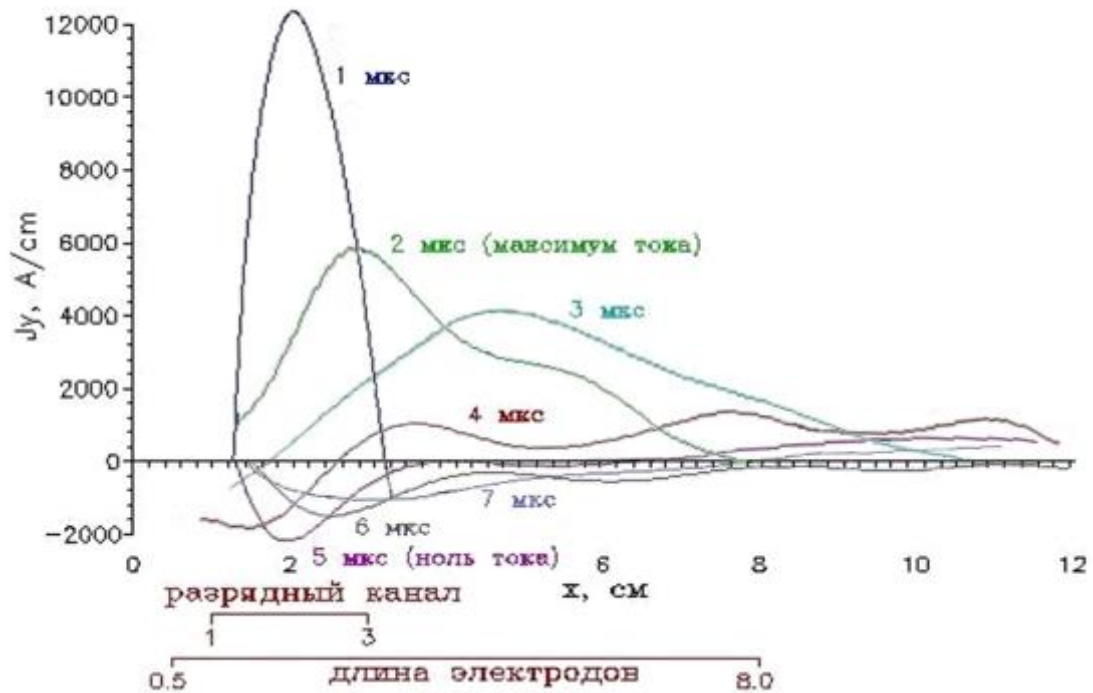


Рис. 54. Распределение линейной плотности разрядного тока в канале экспериментального образца двигателя АИПД-55

Приведены кривые распределения линейной плотности тока $J_y(x)$ по длине ускорительного канала в моменты времени $t = 1; 2$ (максимум разрядного тока); $3; 4; 5; 6; 7$ мкс. Как и в экспериментальной модели АИПД-50Э (Рис. 12) [75], в АИПД-55 при $t \sim 1$ мкс разрядный ток локализован в токовом слое ограниченной протяженности. В момент времени $t \sim 2$ мкс, соответствующий максимуму тока, разряд распространяется по всей поверхности электродов. Далее, до окончания первого полупериода разрядного тока, наблюдается квазистационарное распределение плотности тока вдоль длины электродов. В момент, когда направление тока меняется на противоположное ($t \sim 5$ мкс), в ускорительном канале наблюдается вихрь тока. В течение всего второго полупериода разряда распределение линейной плотности тока остается квазистационарным.

Ранее в НИИ ПМЭ МАИ проводились магнитозондовые исследования пространственно-временных распределений магнитного поля и плотности тока в импульсных плазменных двигателях с большей энергией. В частности, в работе [77] приведены экспериментально полученные распределения линейной плотности тока в потоке плазмы, создаваемом АИПД с энергией разряда 120 Дж.

В [77] было показано, что полученные на АИПД нового поколения высокие показатели эффективности ускорения плазмы объясняются наличием в развитии разряда квазистационарной стадии, характеризующейся распределением разрядного тока по всей длине

электродов. При уменьшении энергии разряда уменьшается и его длительность, поэтому квазистационарная стадия разряда может отсутствовать, что приведет к значительному снижению эффективности ускорения плазмы. В процессе магнитозондовых исследований потоков плазмы меньшей энергии важно было подтвердить наличие квазистационарной стадии в развитии разряда.

Магнитозондовые измерения напряженности магнитного поля в потоке плазмы подтвердили, что в ускорительном канале АИПД с энергией разряда ~ 55 Дж (АИПД-55), начиная с $t \sim 2$ мкс, наблюдается характерное для АИПД нового поколения квазистационарное распределение линейной плотности разрядного тока.

3.3 Исследование начальной стадии разряда методом высокоскоростной фотосъемки

Условно разряд в АИПД можно поделить на три стадии: темновую (лавинно-стримерную), искровую (лидерную) и дуговую [90]. Срабатывание свечи поджига начинается спустя ~ 100 нс после возникновения переднего фронта синхроимпульса. После срабатывания свечи поджига проходит $\sim 1,0\text{--}3,5$ мкс (темновая стадия) до появления видимого искрового пробоя, далее в течение $\sim 0,2$ мкс происходит развитие токовой привязки вдоль поверхности шашки рабочего тела (искровая стадия), после чего происходит формирование дуги (дуговая стадия). Процесс развития искровой стадии электрического разряда в АИПД-55 был запечатлен при помощи съемки высокоскоростной фотокамерой (ВСК) (Рис. 55).

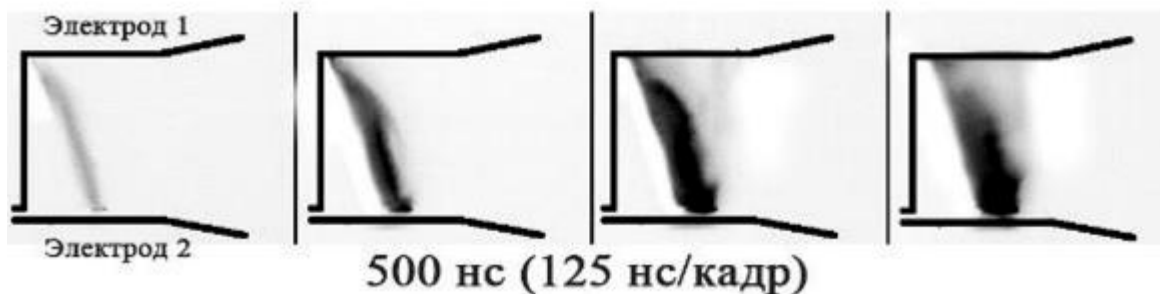


Рис. 55. Развитие искровой стадии разряда в АИПД-55

Токовая привязка, которую становится видно на искровой стадии разряда, формируется под определенным для каждой конкретной модели АИПД углом к поверхностям электродов. Угол развития разряда не изменяется в процессе разряда, и зависит от электрических параметров разрядной цепи и геометрических параметров разрядного канала. В процессе длительной отработки двигателей было установлено, что зона, находящаяся вблизи поверхности торцевого изолятора и незаполненная плазмой (Рис. 56) является зоной с повышенным риском возникновения поверхностной карбонизации (или науглероживания) рабочих поверхностей шашек.

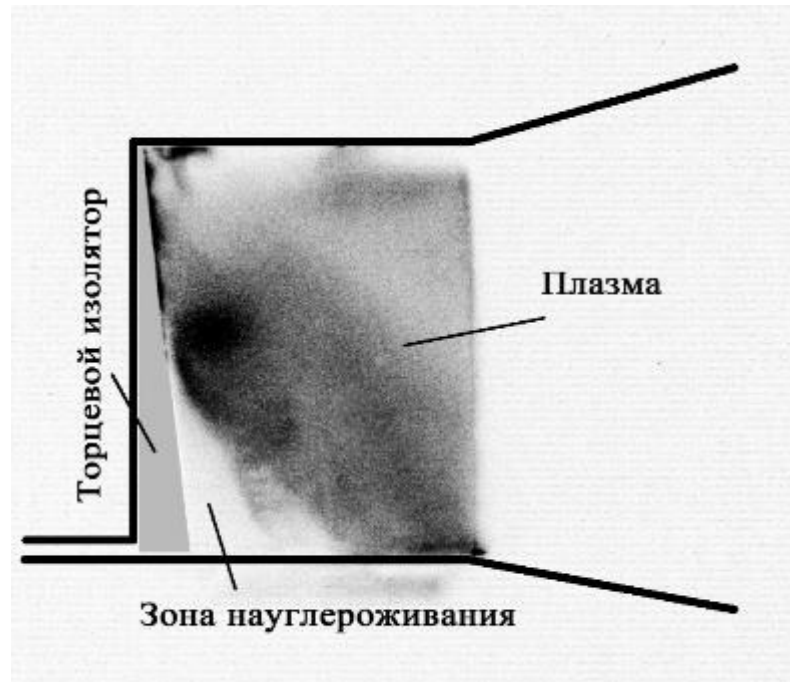


Рис. 56. Дуговая стадия разряда в канале АИПД-55

Негативный эффект от карбонизации шашек заключается в том, что углерод в зоне его контакта с рабочими поверхностями шашек препятствует абляции тефлона, что, спустя некоторое время, приведёт к выходу двигателя из строя.

Ускорение плазмы в разрядном канале АИПД осуществляется следующим образом. От блока иницирования разряда подается короткий высоковольтный импульс на электроды устройства иницирования разряда, в результате поверхностного пробоя образуется плазменный сгусток, «закорачивающий» межэлектродный промежуток разрядного канала АИПД, в котором формируется электрический разряд дугового типа. При этом электроды в процессе пробоя находятся под «ждущим» потенциалом. Рабочее вещество, испаряемое с поверхности диэлектрических шашек, ионизируется и ускоряется под действием электромагнитных сил и газодинамического давления.

С момента срабатывания устройства иницирования разряда до появления свечения на срезе шашек РТ проходит время масштаба 3,5 мкс, в течение которого развивается электрический пробой межэлектродного промежутка и начинается процесс абляции.

Абляция плазмообразующего вещества с рабочих поверхностей шашек рабочего тела происходит в результате следующих воздействий: ударной ионизации поверхности заряженными частицами, излучения дуги и нагрева в результате прямого контакта с плазмой.

Диэлектрическая проницаемость вакуума существенно меньше, чем у твердого диэлектрика, поэтому в зазорах между срезом шашек и электродами произойдет местное усиление поля. Увеличение напряженности поля в зазорах приводит к возникновению там ионизационных процессов, продукты которых (ионы и электроны), попадая в основной

межэлектродный промежуток, создают местное усиление поля, приводящее к уменьшению напряжения пробоя. В течение $\sim(0,5-1,0)\times 10^{-6}$ секунд заряженные частицы, возникшие на границе электрод/поверхность шашки РТ, ускоряясь под воздействием электрического поля, вызывают ударную поверхностную ионизацию [90, 91] ПТФЭ, в результате которой происходит возникновение и развитие токовых привязок вдоль поверхностей шашек РТ. Развитие искровой стадии АИПД-55 показано на Рис. 57.

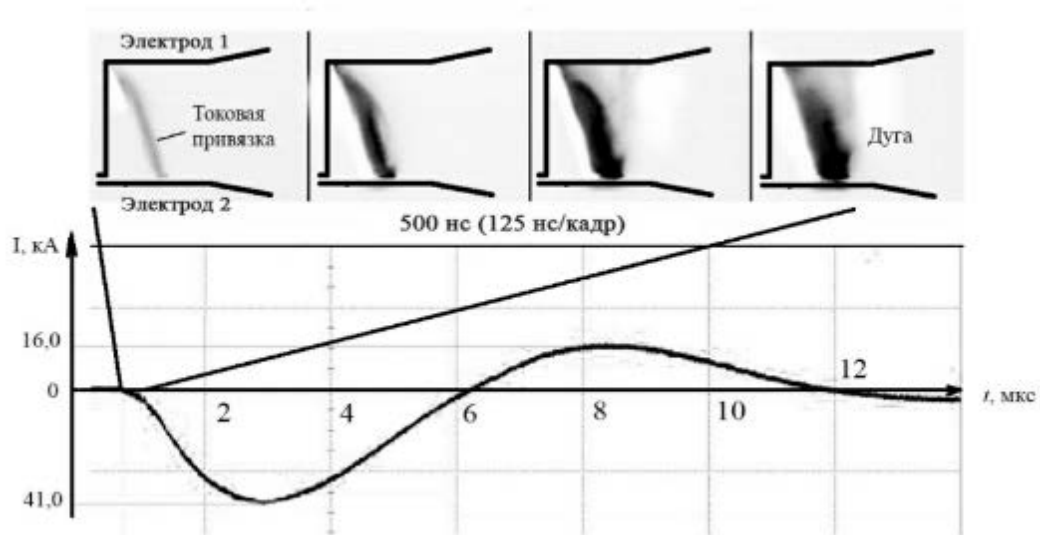


Рис. 57. Искровая стадия электрического разряда АИПД-55 [91]

По мере увеличения силы тока, протекающего в разряде, свечение токовых привязок усиливается, и через $\sim(0,5-1,0)\times 10^{-6}$ секунд от начала искровой стадии начинается дуговая стадия электрического разряда, формируется плазменный сгусток (Рис. 58).

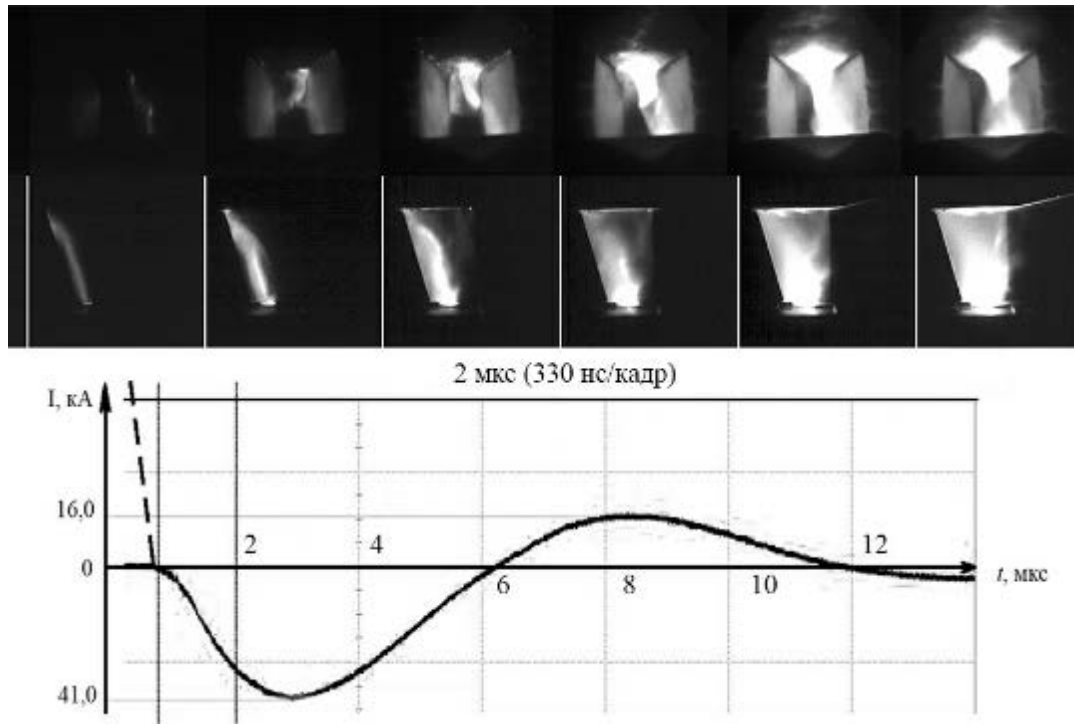


Рис. 58. Формирование токовой привязки на искровой стадии и плазменного сгустка на дуговой стадии электрического разряда в АИПД-55

Через ~ 2 мкс от начала дуговой стадии ток разряда достигает максимального значения ~ 30 - 40 кА, а плазменный сгусток, отделенный от поверхностей шашек РТ, локализуется в средней плоскости разрядного канала.

Ток в основном течет через плазменный сгусток, часть тока течет вдоль рабочих поверхностей шашек РТ, вызывая их абляцию, и, поставляя тем самым плазмообразующее вещество в зону формирования плазменного сгустка. Дополнительный вклад в абляцию вносит жесткое коротковолновое излучение дуги разряда, вызывающее радиационную абляцию фторопласта. Эта стадия характеризуется тем, что за счет сжатия плазменного сгустка собственным магнитным полем (пинч-эффект), происходит некоторая стабилизация процесса абляции фторопласта вдоль с шашек РТ, и, как следствие, ввода массы плазмообразующего вещества в разряд. Основная энергия разряда расходуется на ускорение заряженных частиц, находящихся в сгустке.

Далее, в течение ~ 3 - 4 мкс происходит снижение тока разряда до нуля, плазменный сгусток распадается. На начало второго полупериода разряда весь объем разрядного канала оказывается заполнен плазмой, ток начинает течь вдоль поверхностей шашек РТ, но выделяющейся энергии недостаточно для формирования такого же плазменного сгустка, как в первом полупериоде, таким образом, не происходит дистанционирование зоны выделения основной части энергии от поверхностей шашек РТ. Это позволяет сделать предположение, что

именно течение разрядного тока вдоль поверхностей шашек РТ вызывает «паразитный» расход, достигая своего максимума уже в начале второго полупериода разряда [91].

Присутствие в межэлектродном зазоре диэлектрика снижает пробойное напряжение [90] и создает условия развития разряда вдоль рабочих поверхностей шашек РТ, как на темновой стадии разряда, так и в присутствии плазмы в течение последующих стадий. Если на начальной стадии разряда ударная ионизация происходит только в зоне развития токовых привязок и является наряду с джоулевым нагревом механизмом поставки массы для развития разряда, то во втором полупериоде разряда, когда весь объем разрядного канала оказывается заполнен плазмой, ударная ионизация может происходить по всей площади рабочей поверхности шашек РТ.

Характерной особенностью рабочего процесса АИПД является малая длительность разрядного импульса и сравнительно большая длительность паузы. Лишь часть длительности разряда поверхностный слой шашек РТ, соприкасающийся с плазмой, имеет температуру, равную температуре абляции. Эти обстоятельства позволяют считать, что процесс подвода тепла имеет импульсный характер.

В ходе исследований контроль температуры шашек осуществлялся с помощью датчиков температуры, установленных внутри шашек на расстоянии 1 мм от их рабочих поверхностей. Примерно через час непрерывной работы установилась равновесная температура шашек РТ, не превышавшая 85 °С, что существенно ниже температуры разложения ПТФЭ.

По всей видимости, абляция за счёт нагрева поверхностей шашек РТ вносит незначительный вклад в формирование «паразитного» расхода.

Проведенные исследования показали важность исследования процессов, происходящих на темновой стадии разряда, так как они являются определяющими для развития всего разряда.

Как говорилось ранее, исследование темновой стадии разряда представляет собой трудновыполнимую задачу ввиду быстротечности процесса (менее 10^{-6} сек) отсутствия излучения, а также незначительных (по сравнению с пиковыми значениями, достигающими 50 кА в зависимости от энергии) сил тока (от единиц до сотен ампер), протекающих в цепи разряда.

Одним из возможных подходов к исследованию темновой стадии разряда может являться высокоскоростная фотосъемка, позволяющая с высоким временным разрешением фиксировать переход от темновой стадии к искровой, когда появляется достаточная для записи сигнала интенсивность излучения.

На фотоснимках видно, что зона вблизи поверхности торцевого изолятора остается незаполненной плазмой в течение всего разряда, следовательно, только анализ снимков

зарождения искровой стадии разряда позволит судить о процессах, происходящих и на темновой стадии.

Была поставлена задача исследовать возможность увеличения суммарного импульса тяги КДУ АИПД-95 (разработка АО «НИИЭМ») при сохранении заданных в ТЗ требований по потребляемой мощности и габаритам, что достижимо за счет увеличения удельного импульса тяги либо массы рабочего тела. Установленный предел потребляемой мощности не позволял пойти по пути увеличения скорости истечения. Не допускалось также увеличение габаритных размеров КДУ. Поэтому оставался только путь повышения запаса рабочего тела за счет увеличения площади поперечного сечения шашек. Это могло привести к обострению проблемы карбонизации шашек, решить которую предполагалось путем исследования начальной стадии разряда и последующей модернизации разрядного канала.

Первые исследования проводились на экспериментальной модели АИПД-95 с энергией разряда 155 Дж с показанным на Рис. 59 разрядным каналом, оснащенным типовым для двигателей 2000-х годов торцевым изолятором с форкамерой цилиндрической формы глубиной 4 мм.



Рис. 59. Разрядный канал экспериментальной модели АИПД-95 (вид спереди)

Экспериментальный образец АИПД-95 имел параметры конденсаторного накопителя энергии, разрядного контура, разрядного канала, системы инициирования разряда полностью аналогичные двигателю КДУ АИПД-95 и, являясь его макетным образцом, был предназначен для экспериментальной отработки КДУ АИПД-95 на стадии эскизного проектирования.

Производилась высокоскоростная фотосъемка процесса развития разряда длительностью масштаба 1 мкс. Для этого была собрана исследовательская установка, состоящая из высокоскоростной цифровой фотокамеры, четырехканального осциллографа и четырехканального блока синхронизации. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на Рис. 60.

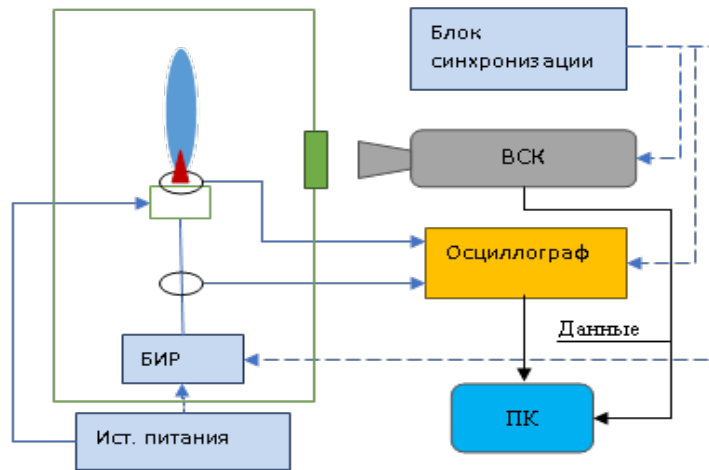


Рис. 60. Принципиальная схема экспериментальной установки для высокоскоростной фотосъемки разряда АИПД

Исследуемая модель была установлена в вакуумной камере так, чтобы срез разрядного канала находился напротив смотрового окна, изготовленного из кварцевого стекла. Электропитание модели осуществлялось от стендового источника питания. Запуск модели производился с помощью блока инициации разряда (БИР), установленного в вакуумной камере в непосредственной близости от АИПД.

Для контроля срабатывания свечи поджига и разряда конденсаторного накопителя энергии, на токоведущие части АИПД были установлены бесконтактные датчики тока, сигналы с которых поступали в четырехканальный осциллограф.

Фотограмма единичного разряда представлена на Рис. 61. Цель съемки: зафиксировать момент зарождения разряда в канале АИПД. Для этого задержка ВСК устанавливалась таким образом, чтобы на первых кадрах было видно срабатывание свечи поджига с дальнейшим развитием стадий электрического пробоя.

Съемка производилась следующим образом: блок синхронизации был настроен на ручной режим запуска, в котором при нажатии на кнопку «Пуск» происходит генерация единичного синхроимпульса, который одновременно подавался на входы в БИР, ВСК и осциллограф, настроенные на запуск по восходящему фронту электрического сигнала. БИР, спустя 0,3 мкс после получения сигнала от БС (желтая осциллограмма) формирует первый высоковольтный импульс на свече поджига (зеленая осциллограмма), далее спустя 3,4 мкс начинает регистрироваться сигнал с датчика тока, установленного на одной из токоподводящих шин лабораторного образца АИПД (синяя осциллограмма), говорящий о том, что начался разряд в канале. Красная осциллограмма – сигнал с датчика тока без интегратора (использовалась для наглядности, на ней лучше виден момент перегиба). Время начало съемки определялось задержкой запуска (в микро или нано секундах), устанавливаемой в управляющей ВСК программе.

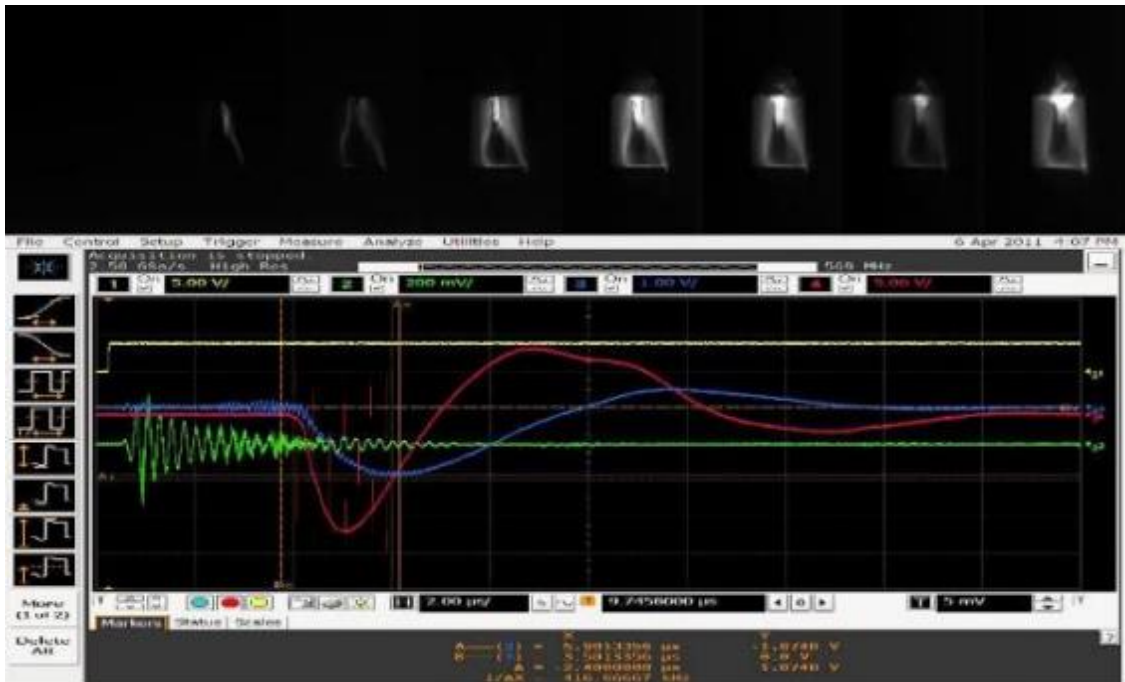


Рис. 61. Фотограмма разряда от начала до максимума тока.

Фронтальный вид на разрядный канал

Первые эксперименты с экспериментальным образцом АИПД-95 выявили наличие существенного разброса во времени моментов инициации пробоя межэлектродного зазора относительно срабатывания свечи поджига. Соответствующие осциллограммы разряда в цепи свечи поджига и основного разряда АИПД представлены на Рис. 62.

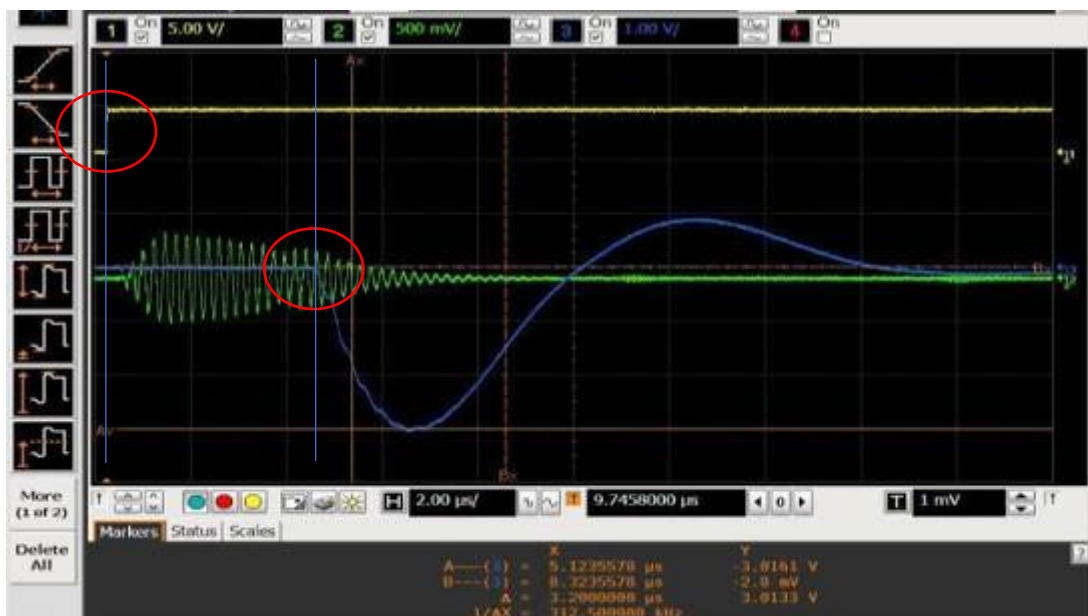


Рис. 62. Осциллограммы разряда в цепи свечи поджига (зеленая осциллограмма) и основного разряда экспериментального образца АИПД-95 (синяя осциллограмма)

Для детального изучения процессов, происходящих на начальной стадии разряда, было важно заснять промежуток времени длительностью не более 800 нс, в то время как разброс мог достигать нескольких микросекунд, что делало практически невозможным «попадание» в

момент начала развития разряда. Кроме того, единичные срабатывания разрядного канала за несколько попыток съемки приводили к науглероживанию рабочих поверхностей шашек РТ, что в свою очередь вело к существенному искажению картины разряда и требовало остановки эксперимента и чистки модели.

Как говорилось выше, в результате работы в режиме единичного импульса с лабораторными моделями, приближенными по параметрам разрядного канала к двигателям, оказалось, что уже через 6-8 запусков необходимо останавливать эксперимент, так как происходило сильное науглероживание рабочих поверхностей шашек РТ, в то время как при непрерывной работе в диапазоне частот (от 0,5 Гц до 2 Гц) следы науглероживания отсутствовали. При этом максимальный разброс во времени моментов инициации пробоя межэлектродного зазора относительно момента срабатывания свечи поджига сохранялся на уровне 2 мкс, что косвенно говорит об отсутствии связи между этими двумя процессами (науглероживанием и нестабильностью запуска).

Было предположено, что нестабильность запуска разряда связана с процессами, происходящими на темновой стадии разряда.

Для исследования процессов возникновения и развития искровой стадии разряда была изготовлена шашка прямоугольного сечения толщиной 25 мм и высотой 27 мм в форме параллелепипеда. Проведенные ранее экспериментальные исследования показали, что пробой межэлектродного промежутка сначала происходит по поверхности одной шашки и далее по мере развития разряда начинает возникать вдоль рабочей поверхности второй шашки. Поэтому для удобства съемки и интерпретации результатов была установлена только одна шашка, что позволило производить фотосъемку под прямым углом к рабочей поверхности шашки РТ.

Фотограммы процесса развития разряда, снятые со стороны шашек рабочего тела, показаны на Рис. 63.

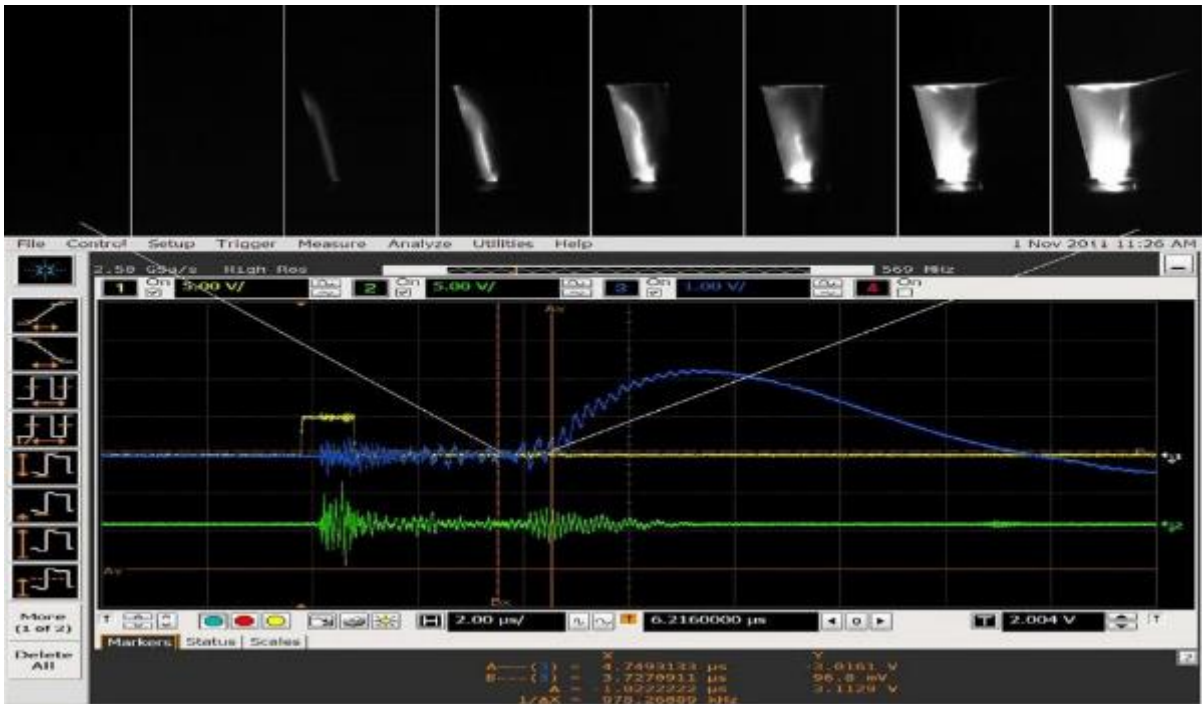
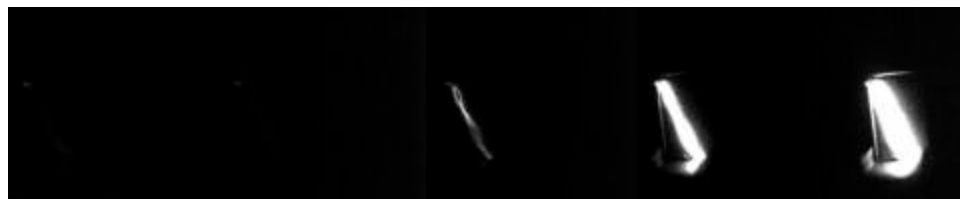


Рис. 63. Фотограммы процесса развития разряда экспериментального образца АИПД-95, снятые со стороны шашек рабочего тела (серия кадров 1 мкс)

На Рис. 64 показано сравнение начальных стадий разряда в трёх лабораторных образцах АИПД, отличающихся конструкцией, геометрией разрядного канала и энергией разряда (зафиксирован промежуток времени длительностью 500 нс).

Очевидно, формирование разряда на начальной стадии существенно влияет на процесс развития плазменного сгустка и, как следствие, на процесс карбонизации рабочих поверхностей шашек РТ.

АИПД-55
с энергией 55 Дж
Канал (ВхГхШ):
20х15х8
Угол наклона ТИ 5°



АИПД-70
с энергией 70 Дж
Канал (ВхГхШ):
27х25х10
Угол наклона ТИ 5°



АИПД-95
с энергией 155 Дж
Канал (ВхГхШ):
45х35х13
Угол наклона ТИ 15°

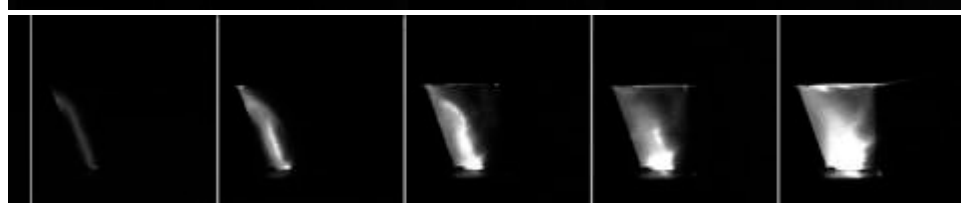


Рис. 64. Развитие искровой стадии разряда в лабораторных образцах АИПД с различными энергиями разряда

На Рис. 65 зафиксирован промежуток времени длительностью 200 нс (ограничен вертикальными линиями), видно, что угол развития электрического разряда в канале АИПД формируется уже на его темновой стадии, когда, благодаря срабатыванию свечи поджига, происходит пробой вакуумного межэлектродного промежутка, так как уже на искровой стадии разряда отчётливо виден угол, под которым будет происходить развитие дуги.

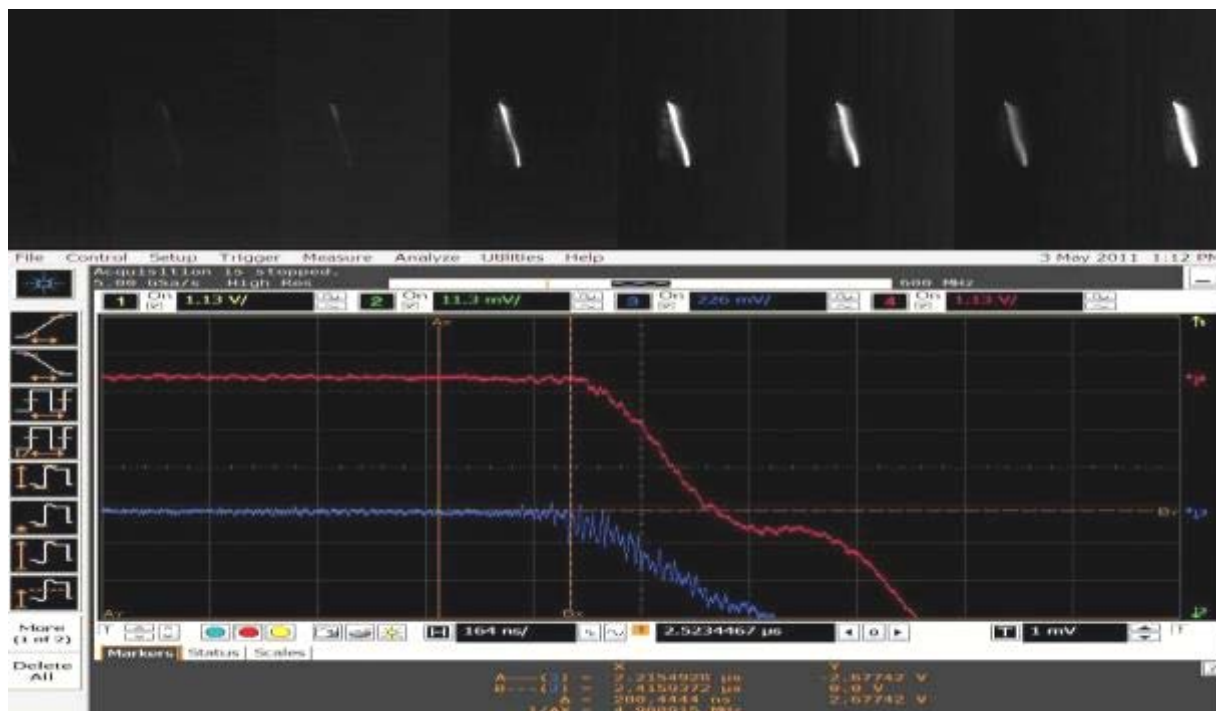


Рис. 65. Зарождение токовой привязки в разрядном канале АИПД-95
(8 кадров, 200 нс)

На Рис. 66 показан промежуток разряда длительностью 1 мкс (8 кадров по 125 мкс, время экспозиции каждого кадра 50 нс).

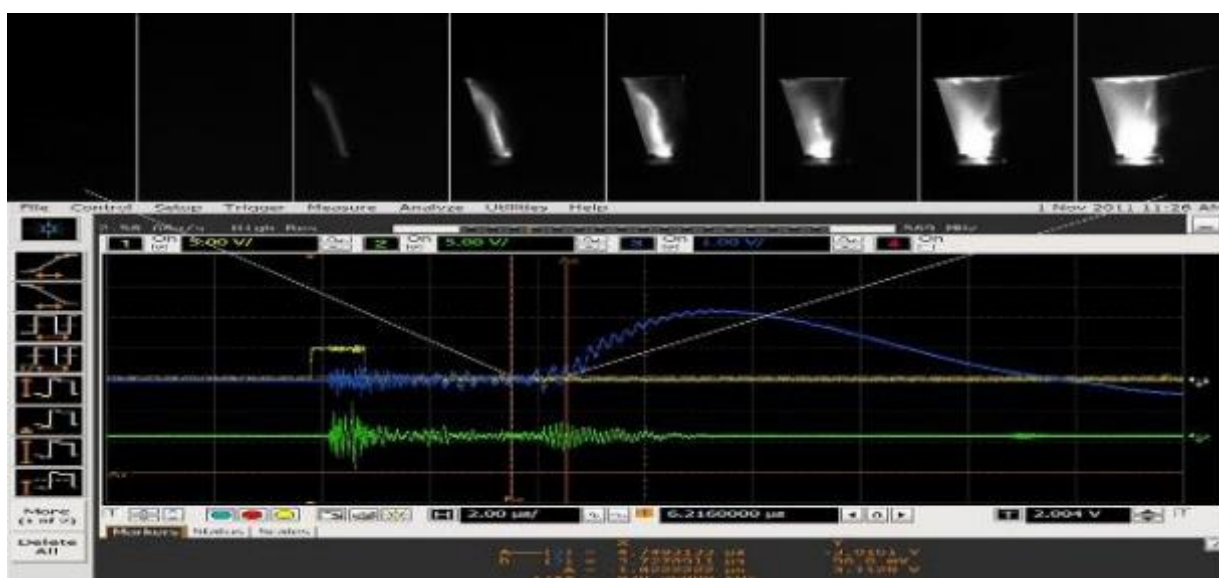


Рис. 66. Развитие разряда в экспериментальном образце
АИПД-95 в течение 1 мкс после срабатывания свечи поджига

Одним из явлений, возникающих в разрядном канале АИПД, и негативно отражающихся на работоспособности двигателя, является карбонизация (возникновение углеродных образований) рабочих поверхностей шашек. В ходе исследований первых АИПД с боковой подачей шашек твердого рабочего тела (фторопласт-4) было установлено, что углеродные образования на рабочих поверхностях шашек возникают в первую очередь вблизи торцевого изолятора и упора.

На Рис. 67 показаны пять последовательных кадров, которые охватывают промежуток времени разряда АИПД длительностью 500 нс, время экспозиции каждого кадра 100 нс. Отмечена зона, находящаяся вблизи торцевого изолятора и анода, которая в процессе всего разряда остается практически не заполненной плазмой. Также, в случае начала процесса карбонизации, в этой зоне на рабочих поверхностях шашек в первую очередь возникают отложения углерода.

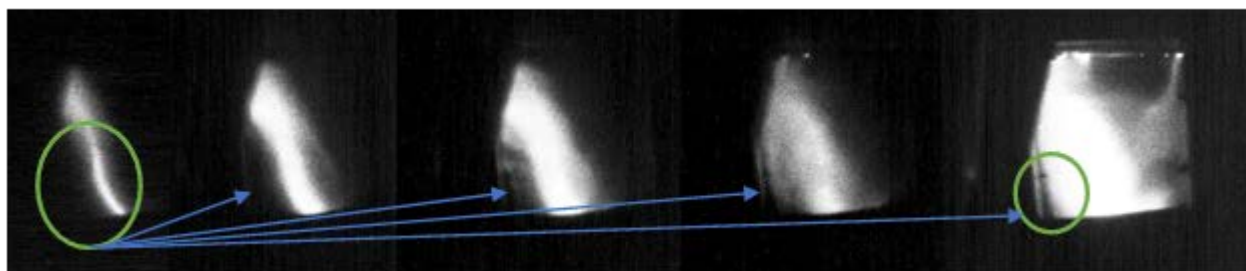


Рис. 67. Развитие разряда экспериментального образца АИПД-95 (100 нс/кадр)

На Рис. 68 показана рабочая поверхность шашки РТ после работы. Видна зона карбонизации, локализованная в нижнем левом углу.



Рис. 68. Рабочая поверхность шашки РТ после работы

Исключение данной зоны из объема разрядного канала помогло решить проблему науглероживания рабочих поверхностей шашек РТ в процессе длительной работы двигателя. Для этого был сделан торцевой изолятор с наклонной поверхностью, обращенной в сторону разрядного канала, контактирующие с торцевым изолятором поверхности шашек РТ были выполнены с аналогичным уклоном, обеспечивающим плотное прилегание шашек к торцевому

изолятору. Уклон торцевого изолятора ($\sim 15^\circ$) был выбран, исходя из угла наклона дуги электрического разряда.

Для каждого нового образца АИПД можно экспериментально определить потребный угол наклона торцевого изолятор, который позволит избежать науглероживания шашек РТ. Для этого необходимо провести «приработку» шашек в течение не менее 10^5 импульсов. Для этого модель со свежеизготовленными шашками РТ устанавливается в вакуумную камеру и запускается. В ходе длительной работы происходит унос вещества шашек РТ, что приводит к постепенному изменению формы рабочих поверхностей, и через 10^5 импульсов форма рабочих поверхностей шашек РТ стабилизируется и остается неизменной вплоть до полного их израсходования. При этом определяется правильность выбора угла наклона торцевого изолятора. При частоте 1 Гц весь процесс приработки шашек РТ занимает около 30 часов огневого времени. В случае неверно выбранного угла наклона торцевого изолятора будет необходимо изготовить новый торцевой изолятор и новые шашки РТ. Этот длительный и трудоёмкий процесс можно сократить, используя метод высокоскоростной съёмки, позволяющий определить необходимый угол на основании формы токовой привязки на начальной стадии разряда, что с учётом времени подготовки эксперименту, занимает не менее двух рабочих дней.

Было предположено, что угол токовой привязки можно определить математически.

3.4 Разработка математической модели начальной стадии разряда АИПД

3.4.1 Постановка задачи для математического моделирования

Очевидно, формирование разряда на начальной стадии существенно влияет на процесс развития плазменного сгустка и, как следствие, на эффективность расходования рабочего тела в связи с процессами науглероживания рабочих поверхностей шашек фторопласта.

Угол развития дуги электрического разряда в канале АИПД, по-видимому, определяется процессами, происходящими на лавинно-стримерной [90] стадии разряда, так как на лидерной стадии разряда отчётливо виден угол, под которым будет происходить дальнейшее развитие дуги. Для каждого нового образца АИПД угол наклона может быть определён эмпирически, для этого требуется длительная отработка АИПД (не менее 200 ч), чтобы шашки рабочего тела приняли стабильную форму, либо применение высокоскоростной фотосъёмки начальной стадии разряда. Этот длительный и трудоёмкий процесс можно сократить, прогнозируя угол развития дуги расчетными методами [99, 100]

3.4.2 Математическая модель движения заряженных частиц на начальной стадии разряда в канале АИПД

Приближенная математическая модель разрабатывалась совместно с А.А. Антиповым [99].

Для проведения математического моделирования принята упрощенная схема разрядного канала АИПД-95 с энергией разряда 155 Дж аналогично представленным в [98-99]. Упрощенная модель разрядного канала состоит из плоских, расположенных параллельно друг к другу электродов на расстоянии 45 мм, длина электродов составляет 60 мм. Размер сечения шашки рабочего тела: высота 45 мм, длина 34 мм. (Рис. 69). Вдоль оси ординат расположен токоподвод, находящийся под потенциалом электрода 1. К электродам 1 и 2 приложена разность потенциалов 1450В в результате чего возникает электрическое поле сложной конфигурации. Срабатывание свечи пódжига имитируется «внезапным» появлением у заряженного отрицательно электрода №1 (зона отмечена окружностью на Рис. 69) N -ного количества электронов, которые ускоряются электрическим полем в направлении положительно заряженного электрода №2. Для упрощения, будем рассматривать носители зарядов, как совокупность частиц, не взаимодействующих друг с другом. Будем считать, что электроны, вытянутые электрическим полем из первичного сгустка плазмы, созданного срабатыванием свечи пódжига, ускоряются вдоль плоскости симметрии разрядного канала, при этом не происходит разделение зарядов, так как такое же количество электронов одновременно поступает в первичный сгусток из прилежащего электрода. Долетев до электрода №2, электроны замыкают цепь между электродом №1 – и электродом №2, что в дальнейшем приводит к развитию разряда вдоль рабочих поверхностей диэлектрических шашек рабочего тела.

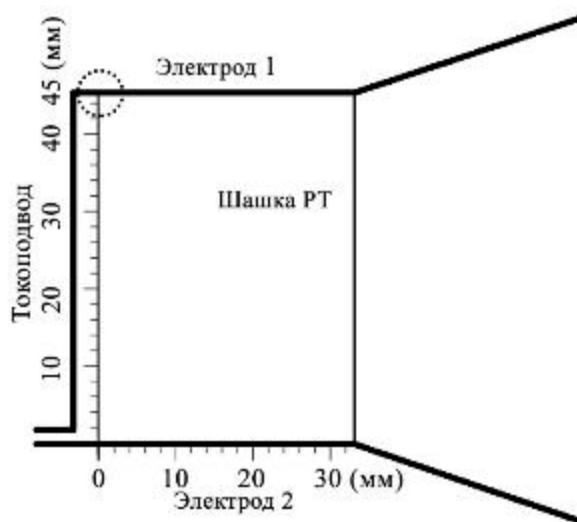


Рис. 69. Схематичное изображение разрядного канала.

Как только некоторое количество электронов достигает электрода №2, с электрода №1 вырывается точно такое же количество, в связи с чем плотность тока будет неизменной, а цепь замкнутой.

Было рассмотрено движение одной заряженной частицы с зарядом q и массой m в скрещенных электрическом и магнитном полях. Напряженность электрического поля будет

различной в каждой точке. Магнитное поле будет возникать при движении заряженной частицы. Следовательно, на частицу будет действовать сила Лоренца, выражаемая формулой.

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{v}\vec{B}(t, \vec{r})] \quad (33)$$

где v - скорость заряда, c - скорость света, e и m - заряд и масса покоя, \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{B} - магнитная индукция.

Заряженные частицы движутся в электрическом поле равноускоренно. При этом вектор \vec{F} совпадает по направлению с вектором \vec{E} , т.е. движение осуществляется вдоль силовой линии электрического поля [99].

При появлении магнитного поля движение частиц будет иметь более сложную траекторию. В нашей задаче рассматривается случай, когда электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны.

Уравнение движения электрона, как и любого другого точечного заряда, в электромагнитном поле можно представить формулой:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E}(t, \vec{r}) + \frac{1}{c}[\vec{v}\vec{B}(t, \vec{r})]) \quad (34)$$

Система уравнений в декартовых координатах будет выглядеть следующим образом

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= e \left(E_x + \frac{1}{c} \left(B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) \right) \\ m \frac{d^2y}{dt^2} &= e \left(E_y + \frac{1}{c} \left(B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right) \right) \\ m \frac{d^2z}{dt^2} &= e \left(E_z + \frac{1}{c} \left(B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right) \right) \end{aligned} \quad (35)$$

Рассмотрим движение заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном поле. Координатные оси направим так, чтобы магнитное поле имело составляющую только по одной из координат.

В данном случае система уравнений примет вид

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= e \left(E_x + \frac{1}{c} B_z \frac{dy}{dt} \right) \\ m \frac{d^2y}{dt^2} &= e \left(E_y + \frac{1}{c} B_z \frac{dx}{dt} \right) \\ m \frac{d^2z}{dt^2} &= e E_z \end{aligned} \quad (36)$$

Система рассматривает движение электронов в разрядном канале, который имеет рельсовую геометрию. Благодаря такой форме разрядного канала, напряженность электрического поля внутри будет различной в каждой точке. Для того чтобы посчитать ее будем использовать систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 E_x &= \iiint \frac{\rho(x-x_0)dx dy dz}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \\
 E_y &= \iiint \frac{\rho(y-y_0)dx dy dz}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \\
 E_z &= \iiint \frac{\rho(z-z_0)dx dy dz}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

где ρ - линейная плотность заряженной пластины, x, y, z - координаты, x_0, y_0, z_0 - положение свечи.

Так как по принципу суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots,
 \tag{38}$$

то мы можем разбить нашу модель с рельсовой геометрией на три заряженные пластины, без ограничения общности. Результат моделирования распределения эквипотенциальных линий напряженности электрического поля приведён на Рис. 70.

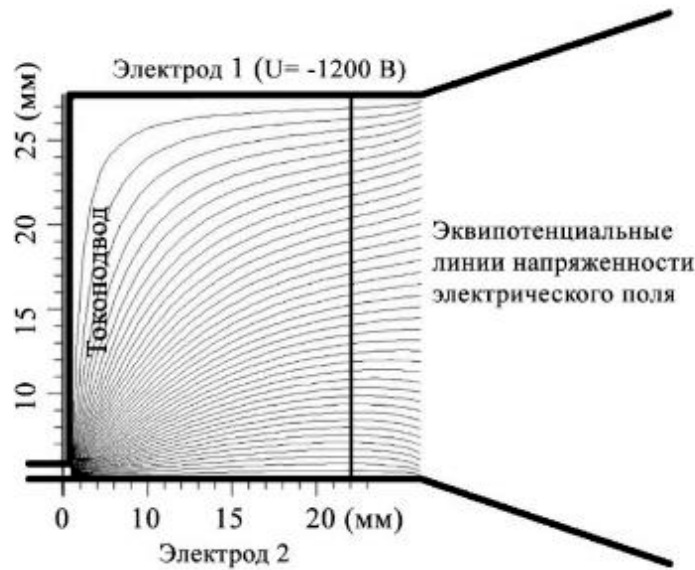


Рис. 70. Распределение эквипотенциальных линий напряженности электрического поля в канале АИПД-95.

Пределы интегрирования выбирались исходя из геометрических размеров разрядного канала.

Был рассмотрен срез по центру разрядного канала, что позволило перейти к плоской задаче. Так как разрядный канал симметричен на всём его протяжении и его геометрические размеры велики, мы можем перейти к плоской задаче.

При возникновении напряженности электрического поля, электроны начинают движение. Возникающее при этом магнитное поле может быть рассчитано с помощью уравнения Био-Савара-Лапласа для движущегося заряда:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I(x)[dL(x-x_0)]}{(x-x_0)^3} \quad (39)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, I - сила тока, L - длина проводника.

3.4.3 Результаты численного математического моделирования. Сравнение с результатами экспериментальных исследований

Расчеты проведены с помощью метода Рунге-Кутты с адаптивным шагом в выбранном диапазоне времени в программной среде Maple. Данная модель позволяет рассчитать движение заряженных частиц в произвольной геометрии с различной напряженностью на электродах. Смоделированное движение электронов в неоднородном электрическом и магнитном полях отражено на Рис. 71.

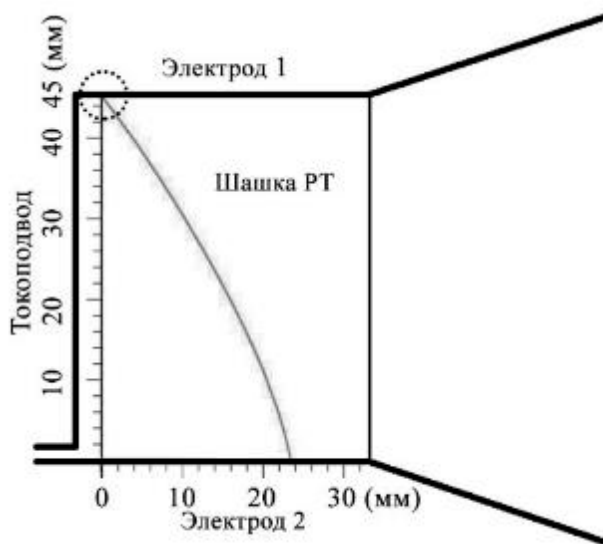


Рис. 71. Траектория движения электронов в разрядном канале АИПД-95.

Полученная кривая с учётом всех принятых допущений моделирует траекторию движения электронов в разрядном канале АИПД на темновой стадии разряда.

На Рис. 72 показано наложение смоделированной траектории движения электронов на фотографию искровой стадии разряда АИПД-95 (цвета инвертированы для удобства отображения), видно достаточно хорошее совпадение результатов расчёта траектории движения электронов и формы токовой привязки в разрядном канале [99, 100].

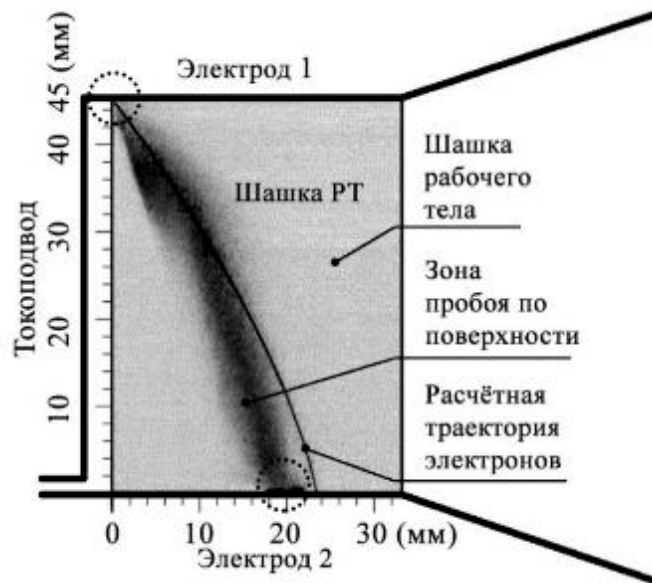


Рис. 72. Изображение расчетной траектории движения электронов на искровой стадии АИПД-95, наложенной на изображение, полученное высокоскоростной фотосъемкой [98, 99].

Пунктирными окружностями отмечены наиболее яркие зоны токовых привязок. В верхнем левом углу разрядного канала расположена зона возникновения электронов.

Процессы, происходящие в разрядном канале, оказывают существенное влияние на интегральные и эксплуатационные характеристики абляционных импульсных плазменных двигателей, существенную роль играют геометрические параметры торцевого изолятора и разрядного канала. Необходимо продолжить исследование темновой и искровой стадий разряда в АИПД, которые являются определяющими для дальнейшего развития разряда и работы двигателя в целом, но уже сейчас результаты расчёта показали хорошее совпадение с экспериментом.

Дальнейшее развитие математической модели начальной стадии разряда в АИПД позволит на этапе проектирования двигателя определять геометрию разрядного канала, позволяющую избежать науглероживание поверхностей шашек рабочего тела, и прогнозировать изменение формы аблируемых поверхностей рабочего тела без проведения трудоемких экспериментальных исследований.

3.5 Исследование условий возникновения карбонизации рабочих поверхностей разрядного канала АИПД

На ранних этапах экспериментальных исследований АИПД рельсотронного типа с боковой подачей рабочего тела (фторопласт-4) было установлено, что на отдельных режимах их функционирования или при определенных размерах разрядного канала на рабочих поверхностях шашек появляется углеродный налет – происходит их так называемая

карбонизация (науглероживание). Причем, карбонизация рабочих поверхностей может носить локальный характер (тип 1), либо занимать большую часть рабочей поверхности шашек (тип 2). При локальном расположении углеродной пленки (Рис. 73) двигатель некоторое время сохраняет свою работоспособность. Однако, поскольку данный участок шашки практически перестает вырабатываться, это приводит к изменению контуров разрядного канала, затруднению подачи рабочего тела в канал, ухудшению характеристик и невыполнению двигателем своего целевого назначения.

Если же углеродный налет появился на большей части поверхности шашек (Рис. 74), характеристики двигателя быстро деградируют, по истечении непродолжительного времени происходит фактически короткое замыкание электродов (катода с анодом), и АИПД прекращает функционировать.



Рис. 73. Шашка рабочего тела АИПД с локальным расположением зоны углеродного налета



Рис. 74. Шашка рабочего тела АИПД с углеродным налетом, занимающим большую часть ее поверхности

Следует заметить, что один раз появившись, углеродная пленка не может быть полностью удалена с поверхности шашки изменением режима работы двигателя (увеличением энергии) или уменьшением объема разрядного канала (путем уменьшения расстояния между шашками). Для того, чтобы повторно использовать такие шашки, необходимо удалить углеродный налет механическим способом.

Ускорительный канал АИПД с боковой подачей рабочего тела (Рис. 75) образован поверхностями электродов – катода 1 и анода 2, шашек рабочего тела 3, 4 и торцевой поверхностью керамического изолятора 5. Его основные, наиболее важные размеры, это: расстояние между электродами (высота канала) H , расстояние между шашками рабочего тела на входе в канал (начальная ширина канала) a , длина шашек (длина закрытой части канала) L .

Эти размеры определяют начальную индуктивность ускорительного канала и его объем, от которого зависит плотность плазмы.

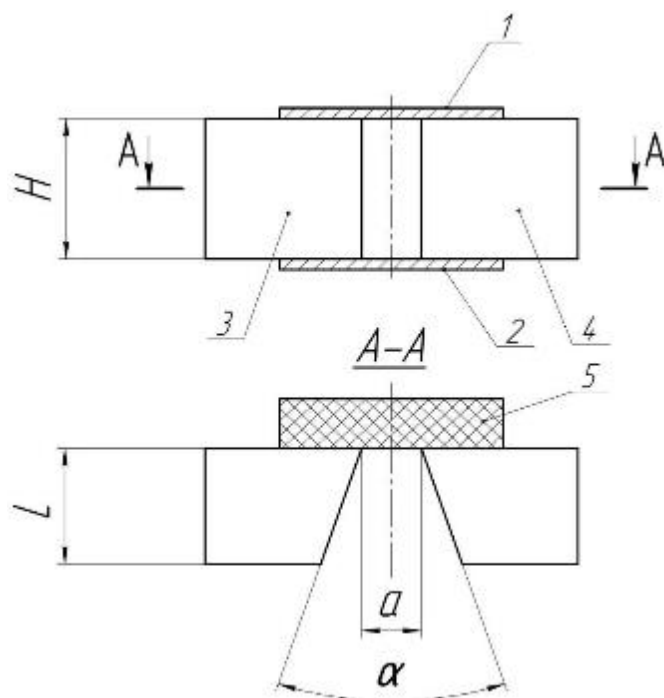


Рис. 75. Основные геометрические размеры ускорительного канала АИПД с боковой подачей рабочего тела

На первых этапах разработки АИПД с разрядным каналом рельсовой схемы, при различных размерах такого канала и разных режимах работы двигателя, на начальном участке рабочей поверхности шашки, примыкающей к поверхности торцевого изолятора, по всей ее высоте образуется углеродный налет. В результате многочисленных экспериментов, проведенных в НИИ ПМЭ МАИ, было установлено, что для его устранения в торцевом изоляторе должно быть углубление, образующее так называемую форкамеру (Рис. 76). Наличие форкамеры обеспечивало формирование устойчивого плазменного шнура в начальной части канала с испаряемыми стенками, что препятствовало осаждению в этой зоне углеродной пленки. Глубина форкамеры b в каждом конкретном случае определялась экспериментально по отсутствию следов углерода (сажи) на начальном участке рабочих поверхностей шашек. Во всех современных АИПД разработки НИИ ПМЭ МАИ используются торцевые изоляторы с форкамерой.



Рис. 76. Торцевой изолятор с форкамерой двигателя АИПД-45-2.

Карбонизация шашек с локализацией зоны является наиболее часто встречающимся типом карбонизации и в основном зависит от величины плотности энергии, выделяющейся в канале. Карбонизация типа 2 встречается реже и обусловлена ошибками в разработке конструкции разрядного канала, вызывающими нестабильность разрядного процесса, его асимметричность – в результате чего происходит неравномерное распределение плотности теплового потока из плазмы между рабочими поверхностями шашек. Также этот тип карбонизации наблюдается при работе двигателя с большой скважностью, фактически в режиме единичных импульсов, причем величина энергии АИПД несущественным образом влияет на данный процесс. Этот вопрос был исследован дополнительно, проведены экспериментальные исследования по изучению влияния начальной стадии разряда на появление карбонизации шашек в данном случае.

В процессе экспериментальной доводки АИПД изменение его интегральных характеристик наиболее легко достигается путем варьирования основных геометрических размеров ускорительного канала. При этом наиболее просто изменяется расстояние a между шашками рабочего тела. На Рис. 77 представлены типичные зависимости единичного импульса тяги Ред., удельного импульса тяги J и тяговой эффективности от начальной ширины канала a . Видно, что больший единичный импульс тяги достигается при меньшей ширине канала и, наоборот, большие удельный импульс тяги и тяговая эффективность – при большей ширине.

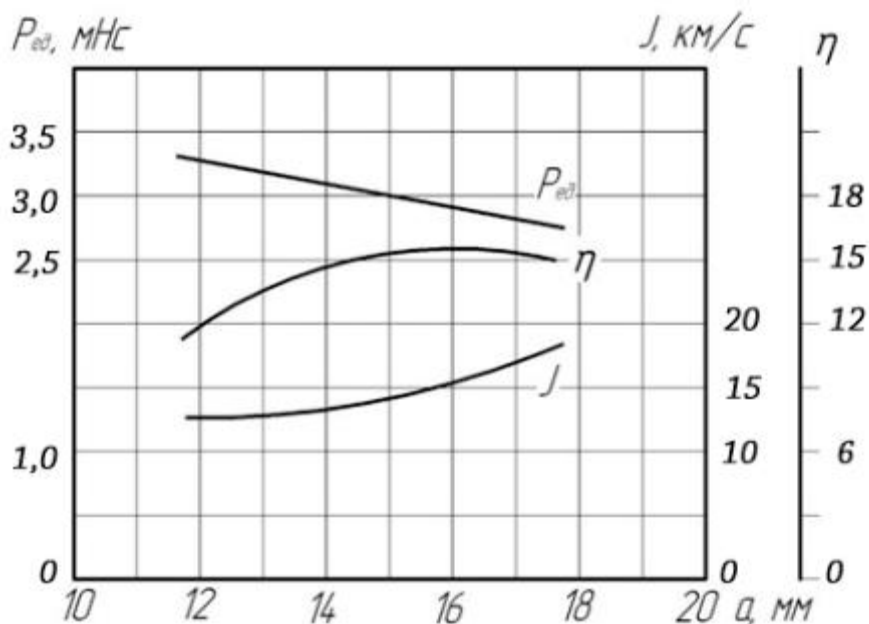


Рис. 77. Зависимость характеристик АИПД от начальной ширины канала

При оптимизации двигателя по удельному импульсу тяги путем увеличения параметра «а», происходит увеличение объема разрядного канала – снижается плотность плазмы и плотность теплового потока на шашки. Поэтому при некотором значении «а» возможно появление углеродной пленки на их рабочих поверхностях.

В связи с тем, что проблема возникновения карбонизации рабочих поверхностей шашек является общей для всех АИПД, использующий в качестве рабочего тела фоторопласт-4, в данной работе исследование зависимости процесса карбонизации шашек от расстояния между ними проводилось на модели АИПД с энергией разряда 70 Дж – АИПД-70. Для изменения расстояния между шашками на двигателе был установлен дистанционно управляемый механизм их перемещения. Внешний вид модели, установленной в вакуумной камере, приведен на Рис. 78. Блок накопителя энергии двигателя состоял из 18 конденсаторов типа MSR25 фирмы «ICAR» (Италия) емкостью 5,6 мкФ каждый.



Рис. 78. Внешний вид экспериментальной модели АИПД-70

Торцевой изолятор модели имел наклон 5° . Форма рабочей поверхности шашек и ее размеры приведены на Рис. 79. Полный угол раскрытия разрядного канала α был равен 40° .

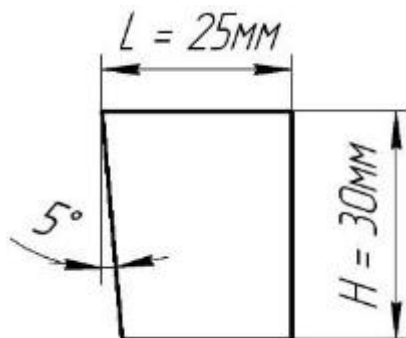


Рис. 79. Форма и размеры рабочей поверхности шашки

В соответствии с выводами по результатам исследования начальной стадии разряда методами высокоскоростной фоторегистрации (см. раздел 3.5) форкамера в торцевом изоляторе была выполнена прямоугольной формы и получила уменьшенную глубину 3 мм (Рис. 80).



Рис. 80. Внешний вид модернизированной форкамеры модели АИПД-70

Предварительно, перед исследованиями процесса науглероживания, шашки проходили приработку в течение порядка 10^5 импульсов срабатывания до стабилизации геометрической формы разрядного канала. Приработка осуществлялась при значении $a = 8$ мм. Данное расстояние измерялось в начальном сечении канала по линии, делящей его высоту пополам (средней линии). Внешний вид канала после приработки показан на Рис. 81. Видно, что рабочие поверхности шашек не имеют следов углеродного налета.



Рис. 81. Внешний вид канала АИПД-70 после приработки шашек

Процесс науглероживания изучался на следующих режимах работы модели: напряжении разряда $U_p = 1200$ В, частоте $f = 0,5$ Гц, $1,0$ Гц и $1,5$ Гц. Суммарная наработка двигателя в каждом эксперименте составляла $5000 - 6000$ импульсов. Исследовался диапазон расстояний между шашками от 10 до 22 мм с шагом 2 мм. В результате было установлено, что первые

очаги карбонизации (около упора, на рисунке установлен на нижнем электроде) при частоте работы двигателя 0,5 Гц появляются при величине $a = 20$ мм (Рис. 82) – «точка карбонизации», а при 22 мм они увеличиваются в размерах. На частотах 1,0 и 1,5 Гц наблюдается та же картина.

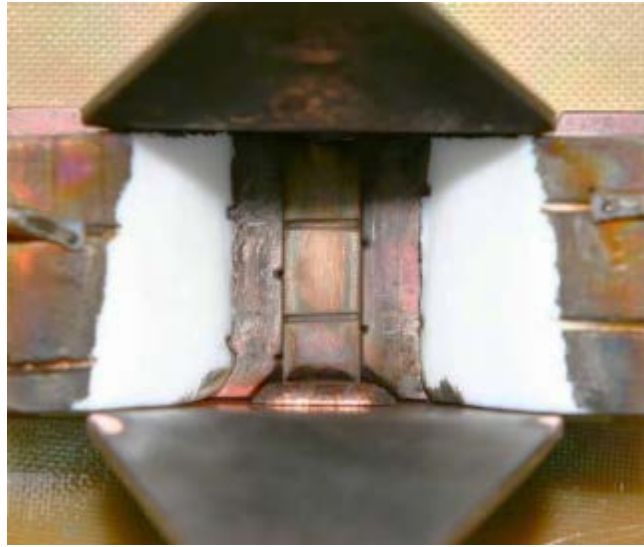


Рис. 82. Внешний вид шашек при расстоянии $a = 20$ мм и частоте работы двигателя 0,5 Гц

Принято считать, что масса плазменного сгустка в разрядном канале пополняется за счет абляции фторопластовых шашек в результате поглощения фторопластом энергии излучения плазмы и конвективного теплообмена с плазмой. Характерной особенностью рабочего процесса АИПД является малая длительность разрядного импульса и, соответственно, процесса ускорения и сравнительно большая длительность паузы. Единственной характеристикой импульса можно считать суммарную подведенную энергию, и она зависит от начальной температуры шашек $T_{ш0}$. В ходе экспериментов было установлено, что при работе в режиме единичных импульсов (не более 1 разряд в 30 сек) при расстоянии между шашками, обеспечивающем максимальное значение тяговой эффективности, возникает карбонизация, тогда как в номинальном режиме работы с частотой 1 Гц, карбонизация не происходит. В связи с чем было сделано предположение, что процесс карбонизации шашек также зависит от их начальной температуры.

Для проверки этой версии на катод и анод модели АИПД-70 были установлены плоские нагреватели, позволяющие изменять $T_{ш0}$. Контроль температуры шашек осуществлялся с помощью датчиков температуры (цилиндрических NTC (Negative Temperature Coefficient) термисторов типа В57869S0302 с погрешностью измерения $\sim 2\%$ в диапазоне температур $+20 \div 140^\circ\text{C}$ и габаритными размерами $\varnothing 2,4 \times 6,5$ мм) установленных внутри шашек на расстоянии 1 мм от их рабочих поверхностей. Для обеспечения плотности теплового контакта между датчиками и контролируемым элементом применялась теплопроводная паста типа

АлСил-3. Регистрация сигналов с датчиков проводилась путем их последовательной коммутации с мультиметром АРРА-103N.

Внешний вид модели с установленными нагревателями и датчиками температуры приведен на Рис. 83.

Идея экспериментов состояла в том, чтобы с помощью предварительного нагрева шашек сдвинуть «точку науглероживания» в сторону больших значений «а». Для этого было выбрано такое расстояние между ними, при котором появляются первые следы науглероживания при работе двигателя без предварительного нагрева шашек при их начальной температуре равной 24°C , а именно $a = 20$ мм (Рис. 84).

На Рис. 85 приведен внешний вид рабочих поверхностей шашек после работы двигателя с предварительным их нагревом до 80°C . Видно, что, как и в случае без предварительного нагрева на рабочих поверхностях шашек присутствует углеродный налет, который занимает даже несколько большую площадь.

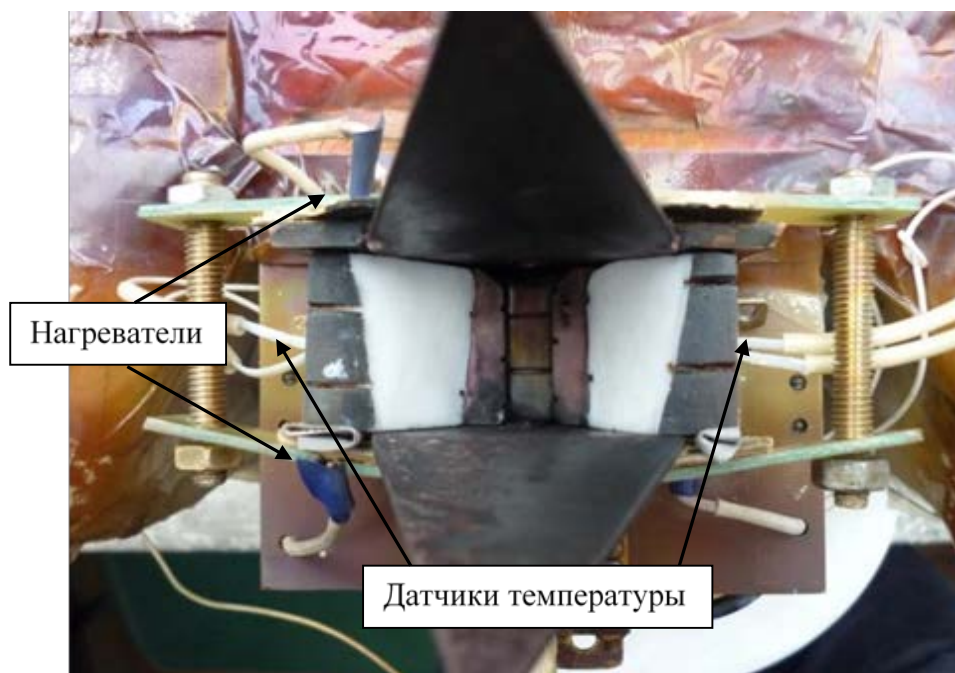


Рис. 83. Внешний вид АИПД-70 с установленными нагревателями и датчиками температуры ($a = 20$ мм)



Рис. 84. Внешний вид шашек после работы АИПД-70 без предварительного нагрева шашек при $a = 20$ мм ($U_p=1200$ В, $f=1$ Гц, $T_{ш0}=24^{\circ}\text{C}$)



Рис. 85. Внешний вид шашек после работы АИПД-70 с предварительным нагревом шашек до 80°C при $a = 20$ мм ($U_p=1200$ В, $f=2$ Гц)

Аналогичные исследования процесса науглероживания шашек (без изменения их начальной температуры) было проведено на модели с разрядной энергией $W = 155$ Дж – лабораторном макете КДУ АИПД-95. Его блок накопителя энергии состоял из 18 конденсаторов типа MKV фирмы «ICAR» (Италия) емкостью 8,2 мкФ каждый. Разрядное напряжение составляло 1450 В. Внешний вид макета приведен на Рис. 86, а на Рис. 87 - его разрядный канал с форкамерой глубиной 2 мм. Исследовался диапазон расстояний между шашками от 16 до 26 мм с шагом 2 мм при постоянной энергии разряда (155 Дж). Измерения величины, также как в АИПД-70, проводились по средней линии канала вдоль поверхности торцевого изолятора.



Рис. 86. Внешний вид лабораторного макета АИПД-95

В результате проведенных экспериментов было установлено, что незначительные следы науглероживания появляются при расстоянии между шашками порядка 26 мм и, как в случае АИПД-70, не устраняются при увеличении мощности двигателя (Рис. 88).

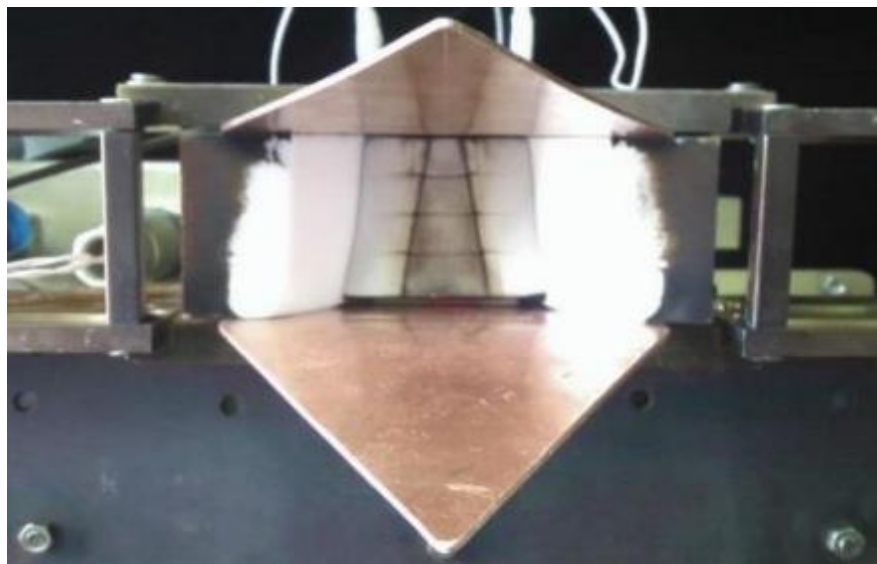


Рис. 87. Внешний вид разрядного канала макета АИПД-95



Рис. 88. Внешний вид рабочих поверхностей шашек макета АИПД-95 при $a = 26$ мм (мощность двигателя 155 Вт)

Таким образом, в результате проведенных исследований процесса науглероживания поверхности шашек на лабораторных моделях АИПД-70 и АИПД-95 было установлено, что при постоянном значении энергии разряда положение «точки карбонизации» определяется только расстоянием между шашками и не зависит от мощности двигателя в исследованном диапазоне ее изменения ($35 \div 140$ Вт) и начальной температуры шашек, процессы и характер карбонизации не зависят от энергии разряда [91], а только от частоты работы АИПД, которая должна быть не ниже 0,1-0,2 Гц в зависимости от энергии разряда.

Экспериментально было установлено, что работа АИПД без карбонизации возможна при расстоянии между шашками, превышающим «точку карбонизации», в случае раздвижения шашек в процессе работы. Также изменение расстояния между шашками РТ в процессе работы двигателя позволило решить задачу управления интегральными параметрами: удельным импульсом тяги, единичным импульсом тяги (варьировать тягу при постоянной мощности) (Рис. 89), а также решить проблему науглероживания при располагаемой мощности ниже расчетной, данный способ был защищён патентом РФ на изобретение №2452142 [92].

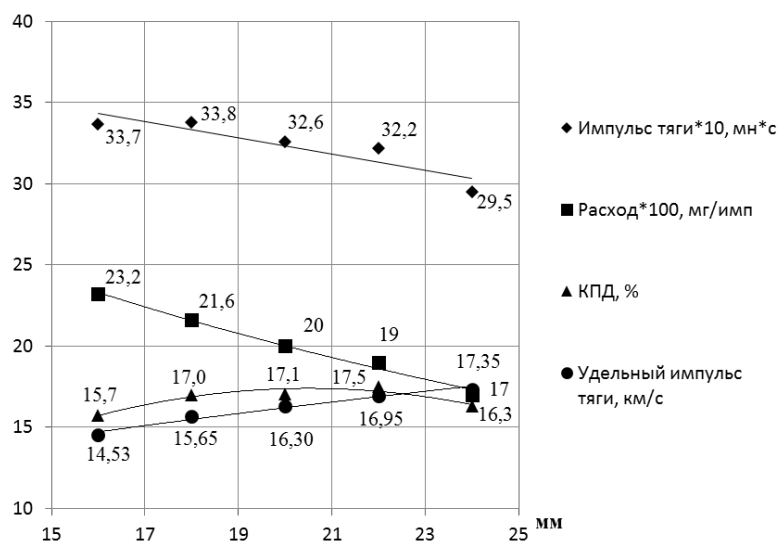


Рис. 89. Зависимость интегральных характеристик лабораторной модели АИПД-95 в зависимости от расстояния между шашками РТ

Эксперименты с лабораторной модели АИПД-95 показали, что работа при сверхшироком зазоре между рабочими поверхностями шашек РТ привело к негативному эффекту – возникновению токовых привязок к краям электродов в местах их скрещивания с ребрами шашек РТ, что привело к образованию выработки в шашках и ускоренной эрозии материала электродов, как показано на Рис. 90.



Рис. 90. Разрядный канал лабораторной модели АИПД-95 после работы при увеличенном зазоре между рабочими поверхностями шашек

Для устранения данного явления были изготовлены электроды шириной 100 мм, что позволило исключить края электродов из зоны развития разряда (Рис. 90).

По результатам экспериментального исследования развития разряда в АИПД, в особенности в его начальной стадии, разработана модернизированная конфигурация торцевого изолятора с форкамерой нового типа, конструкция которой защищена патентом РФ [94]. Для разработчика КДУ АИПД-95 выработаны рекомендации по доработке ЭРДУ АИПД-95. Работы по внедрению данных рекомендаций в конструкцию модернизированной КДУ АИПД-95М рассмотрены в Главе 4.

Глава 4. Практическое применение результатов проведенных исследований

4.1 Анализ влияния конструкции разрядного канала на характеристики АИПД.

4.4.1 Исследование зависимости характеристик АИПД от длины электродов

Для определения влияния геометрических параметров электродов на интегральные параметры АИПД был изготовлен комплект электродов шириной 100 мм и длиной 160 мм.

Исследовательские испытания проводились с использованием макета АИПД-95 с энергией разряда 155 Дж. Напряжение зарядки КНЭ составляла 1450 В, работа на частоте следования импульсов 1 Гц в течение 2 часов (7200 импульсов), расстояние между шашками составляло 16 мм. Производилось по 10 измерений для каждой длины электродов, затем вычислялось среднее значение.

Проводилось измерение среднего расхода РТ, количества импульсов, средней тяги для длин электродов от 160 до 15 мм со средним шагом 20 мм (Рис. 91). Расчетным путем определялись единичный импульс тяги, удельный импульс тяги, КПД.



Рис. 91. Разрядный канал макета АИПД-95 с электродами длиной 160 мм (слева) и 15 мм (справа)

Результаты измерений приведены в Табл. 11 и на Рис. 92.

Табл. 11 Зависимость интегральных параметров макета АИПД-95 от длины электродов

Длина электродов, мм	Импульс тяги, мн·с	Расход, мг/имп	Удельный импульс тяги, км/с	КПД
15	3,51	0,264	13,30	0,149
30	3,47	0,254	13,66	0,151

Длина электродов, мм	Импульс тяги, мН·с	Расход, мг/имп	Удельный импульс тяги, км/с	КПД
40	3,5	0,248	14,11	0,157
80	3,42	0,23	14,87	0,163
100	3,4	0,23	14,78	0,161
120	3,28	0,226	14,51	0,153
160	3,2	0,227	14,10	0,145

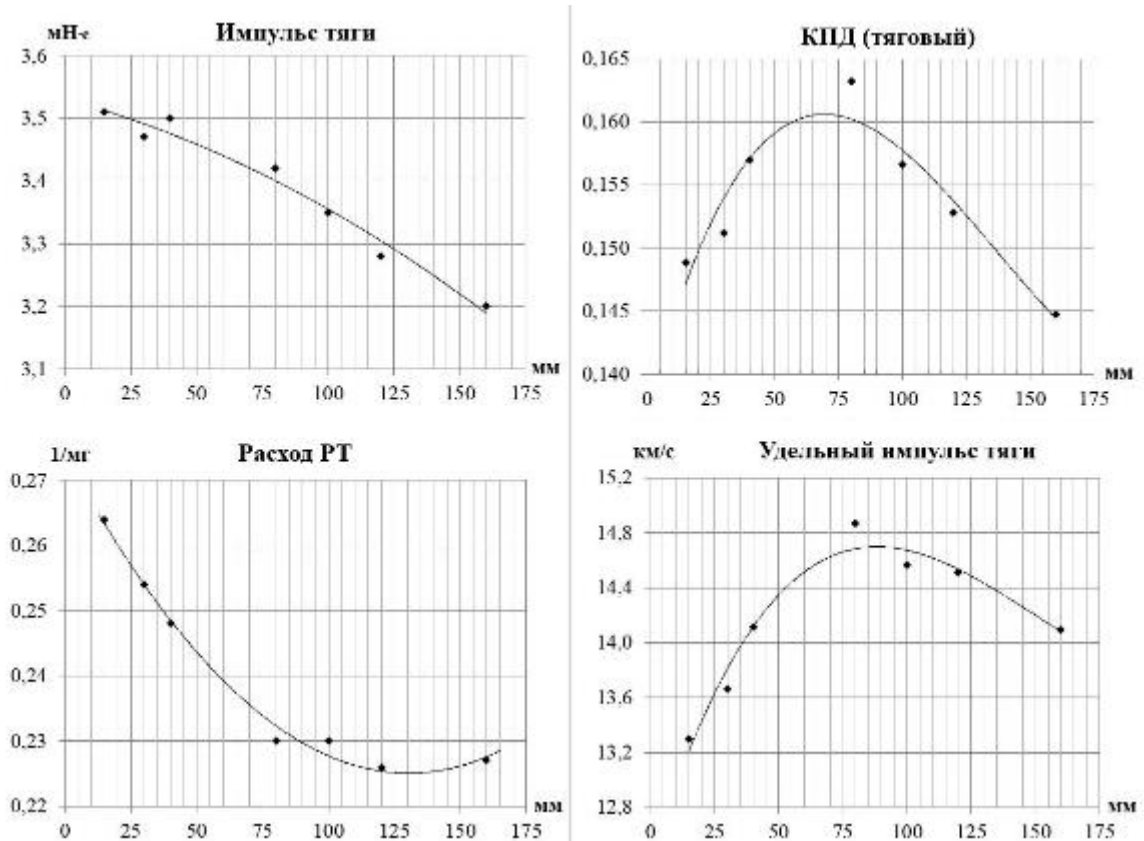


Рис. 92. Характеристики макета АИПД-95
в зависимости от длины электродов

Из полученных данных видно, что максимум КПД и удельного импульса тяги приходится на длину электродов ≈ 80 мм, следовательно, при данной длине электродов ускорение плазмы в разрядном канале происходит наиболее эффективно. При уменьшении длины электродов с 80 до 15 мм наблюдается рост расхода РТ, единичного импульса тяги и, соответственно, снижение удельного импульса тяги. Это объясняется, в основном, ростом токов выноса из канала, что приводит к расходованию РТ не только с рабочих поверхностей шашек, но и с внешних поверхностей шашек (Рис. 93). снижением индуктивности контура.



Рис. 93. Эрозия внешних поверхностей шашек РТ при уменьшении длины электродов до 40 мм

С увеличением свыше 80 мм длины электродов происходит незначительное снижение расхода РТ и существенное снижение импульса тяги. Проведенные ранее на лабораторном образце АИПД с близкой энергией разряда $W=120$ Дж магнитозондовые исследования распределения разрядного тока по длине разрядного канала показали, что в случае разряда длительности >10 мкс существенная доля разрядного тока привязывается к законцовкам электродов, провоцируя, тем самым, рост токов выноса [101]. Поэтому увеличение длины электродов свыше 80 мм приводит к увеличению токов выноса, не участвующих в процессе ускорения плазмы, что приводит к заметному снижению характеристик.

По результатам исследования зависимости характеристик АИПД от длины электродов был сделан вывод, что для каждой энергии разряда АИПД существует некоторая оптимальная длина электродов, при которой удельный импульс тяги и тяговая эффективность двигателя максимальны. Для энергии разряда $W \approx 150$ Дж эта длина составляет 70-80 мм. В дальнейшем это было отражено в рекомендациях, выпущенных НИИ ПМЭ МАИ для модернизации двигательной установки АИПД-95.

4.4.2 Исследование влияния геометрии форкамеры торцевого изолятора на характеристики АИПД

В результате экспериментальной отработки лабораторных моделей АИПД предыдущих поколений было сделано предположение, что форкамера необходима для формирования плазменного жгута до его появления у среза шашек рабочего тела, благодаря чему не возникало науглероживание их рабочих поверхностей. Из-за отсутствия в то время технической возможности заснять процесс формирования плазменного жгута в разрядном канале выводы о правильности сделанного предположения были сделаны на основании множества проведенных экспериментов с торцевыми изоляторами различных конфигураций, в том числе с форкамерами различной глубины и формы. Найдя опытным путём наиболее подходящую конфигурацию

торцевого изолятора с форкамерой, работы по исследованию роли форкамеры далее не проводились, и при создании новых поколений АИПД использовались имеющиеся наработки.

Установка свечи поджига в глубине форкамеры обеспечивает её устойчивую работу и стабильное формирование плазменного жгута. Такой способ расположения свечи поджига был установлен экспериментально.

Устойчивая работа свечи достигается за счёт осаждения углерода на её рабочую поверхность и электроды, который при инициации разряда выступает в роли плазмообразующего вещества.



Рис. 94. Науглероженная свеча поджига

В случае же размещения свечи на некотором расстоянии от форкамеры при работе АИПД происходит недостаточное осаждение углерода на её рабочую поверхность, что приводит к пропускам в работе – срабатывание свечи поджига не приводит к инициации пробоя в разрядном канале. На Рис. 95 показана «чистая» свеча поджига до установки в разрядный канал АИПД и внешний вид рабочей поверхности неправильно установленной свечи после 15 минут работы на Рис. 96. Единичные пропуски в работе АИПД начались спустя ≈ 2 минуты от начала работы, далее частота пропусков росла, и через ≈ 15 минут лабораторная модель перестала запускаться, при этом срабатывание свечи визуально наблюдалось через иллюминатор вакуумной камеры. Работа в первые минуты объясняется присутствием жировых загрязнений на рабочей поверхности свечи, которые являлись поставщиком плазмообразующего вещества и первичным осаждением углерода из плазмы. Однако нахождение свечи поджига на расстоянии от форкамеры приводит к постепенной очистке её рабочей поверхности набегающим потоком плазмы, и через некоторое время вещества, остающегося между электродами свечи становится недостаточно для эффективной инициации межэлектродного пробоя разрядного канала АИПД. На Рис. 96 видно, что одна часть рабочей поверхности и один из электродов не покрыты углеродом.



Рис. 95. Чистая свеча поджига до установки в разрядный канал АИПД



Рис. 96. Свеча поджига после работы в течение 15 минут.

Подводя итог вышесказанному, одна из функций форкамеры – способствовать науглероживанию рабочей поверхности высоковольтной свечи поджига, что необходимо для стабильной работы АИПД.

Далее была поставлена задача на качественном уровне определить степень и характер влияния глубины форкамеры на рабочие характеристики макета АИПД-95. Приведенные в Главе 3 результаты исследований показали возможность использования лабораторных моделей с различными энергиями разряда для исследования физических процессов, происходящих в разрядном канале АИПД, на качественном уровне. Поэтому при проведении экспериментов использовалась лабораторная модель АИПД-70с энергией разряда 70, которая имела в комплекте готовые торцевые изоляторы с форкамерами глубиной 4 мм и 12 мм, и использовалась при исследовании условий возникновения карбонизации рабочих поверхностей шашек РТ (раздел 3.7).

Глубина форкамеры влияет на толщину торцевого изолятора, и, как следствие на расстояние от катодной шины, проходящей вдоль задней поверхности торцевого изолятора, поэтому исследуемые образцы торцевых изоляторов устанавливались таким образом, чтобы шашки РТ находились на одном и том же расстоянии до катодной шины.

Отправной точкой стал разрядный канал с торцевым изолятором с форкамерой цилиндрической формы, глубиной 4 мм (Рис. 97), который успешно использовался в разработках АИПД в последние годы (АИПД последнего поколения).



Рис. 97. Торцевой изолятор с форкамерой глубиной 4 мм.

Модель работала с частотой 1 Гц. На Рис. 98 показано наложение осциллограмм двух последовательных срабатываний АИПД-70. Красной окружностью отмечено начало синхроимпульса, зеленая осциллограмма – ток разряда свечи поджига (задержка относительно синхроимпульса 300 ± 10 нс), вертикальные оранжевые прямые обозначают темновую стадию первого разряда, вертикальная синяя прямая установлена в момент окончания темновой стадии второго разряда, максимальный разброс длительностей темновой стадии - 2,1 мкс.

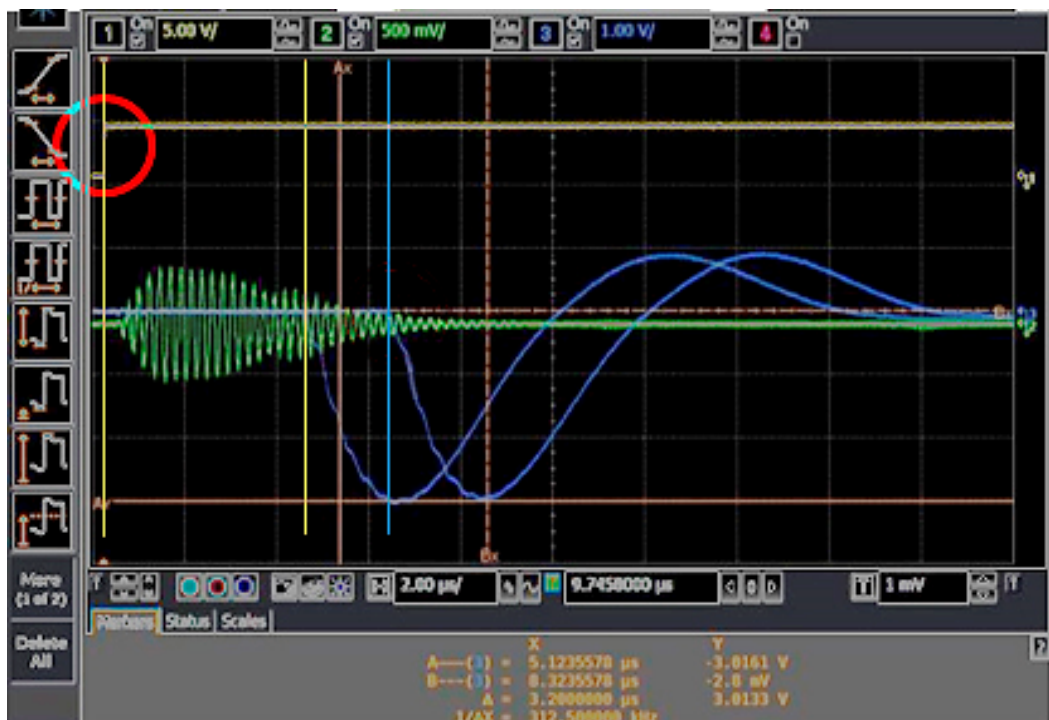


Рис. 98. Осциллограммы двух последовательных разрядов лабораторной модели АИПД-70

Процесс развития начальной стадии разряда лабораторной модели АИПД-70 показан на Рис. 99.

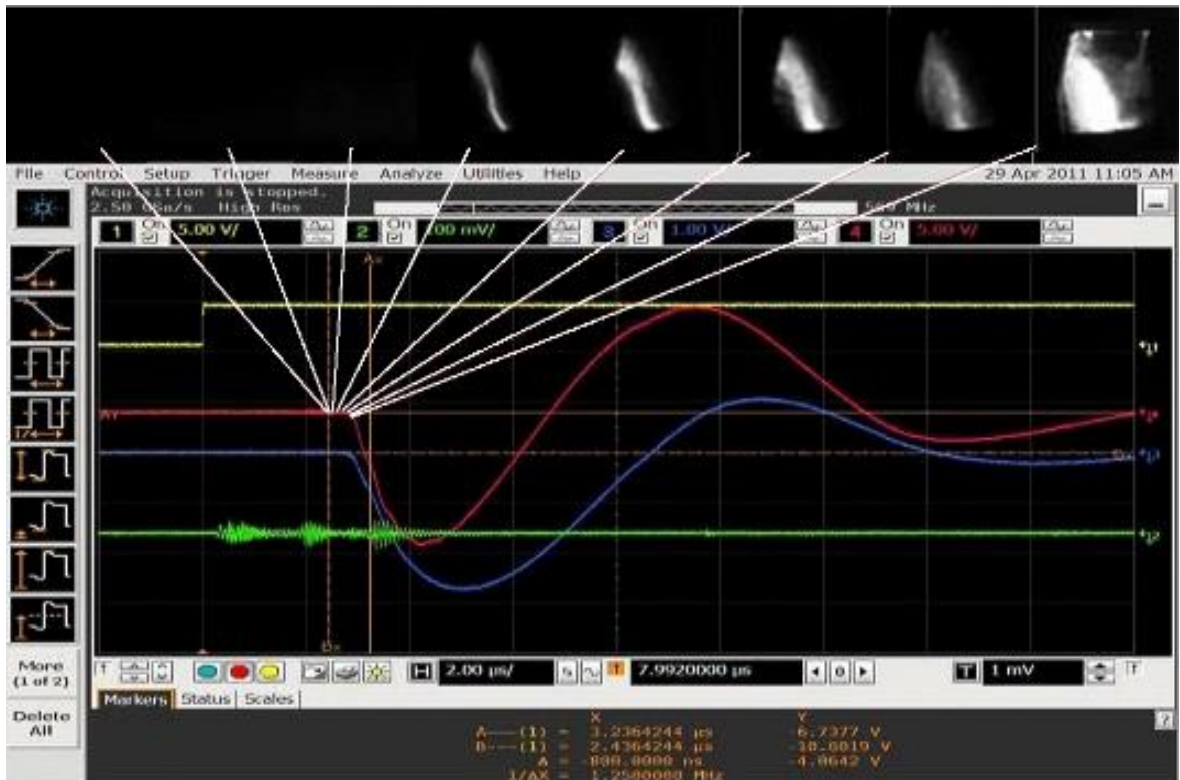


Рис. 99. Начальная стадия разряда лабораторной модели АИПД-70. Торцевой изолятор с форкамерой цилиндрической формы глубиной 4 мм.

Исследование было повторено с торцевым изолятором с форкамерой глубиной 12 мм (Рис. 100).



Рис. 100. Внешний вид разрядного канала лабораторной модели АИПД-70, утановлен торцевой изолятор с форкамерой глубиной 12 мм.

Разброс длительностей темновых стадий разрядов вырос с ≈ 2 до ≈ 4 мкс (Рис. 101).

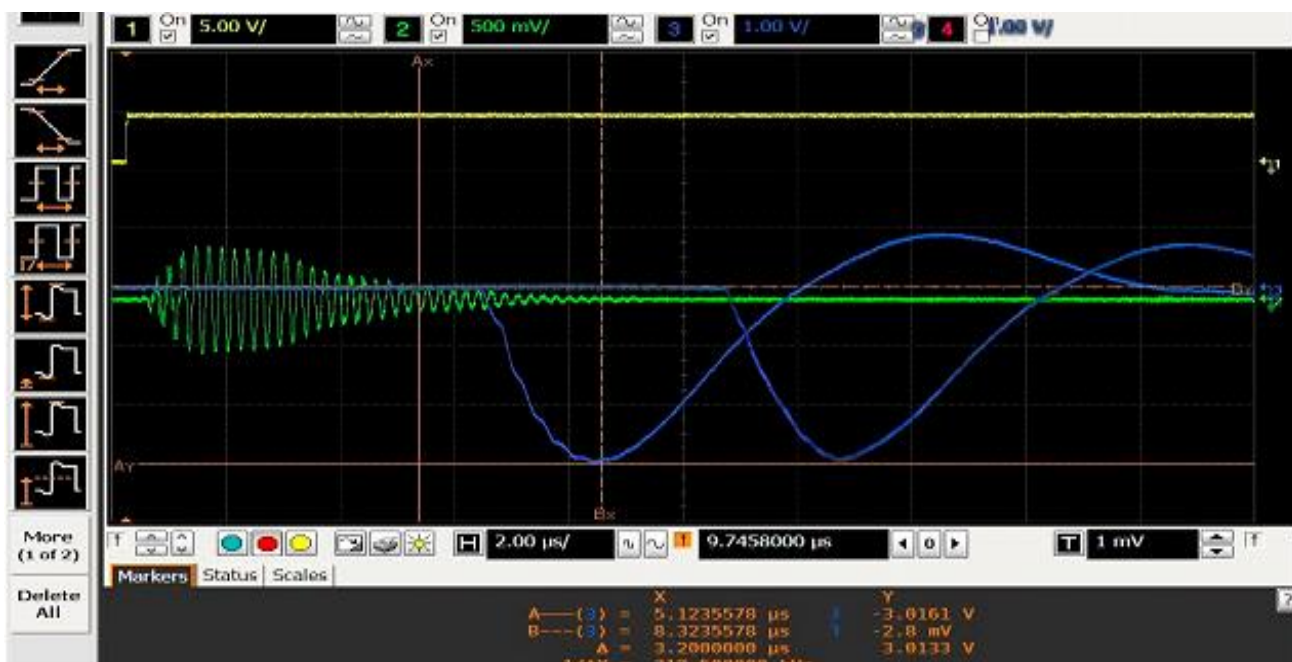


Рис. 101. Разброс длительностей темновой стадии на частоте 1-2 Гц вырос до 4 мкс.

Далее была произведена фотосъемка с максимальной светочувствительностью с началом спустя 30 мкс после затухания осциллограммы тока разряда. На Рис. 102 видно затухающее свечение в разрядном канале. Это означает, что большое количество возбужденных частиц остается в разрядном канале на протяжении длительного времени. Такая «остаточная атмосфера» заполняет весь объем разрядного канала, и в том числе форкамеру торцевого изолятора. С увеличением объема форкамеры растёт разброс в длительностях темновых стадий разряднов, или временных задержек перехода от темновой к искровой стадии разряда. К сожалению, имеющиеся технические диагностические средства не позволили провести ни количественные ни качественные прямые измерения длительности существования «остаточной атмосферы» после окончания разряда. Однако, экспериментально было установлено, что в случае работы с единичными разрядами, когда между срабатываниями проходит более 30 секунд, разброс уменьшался до минимального значения в 1 мкс.

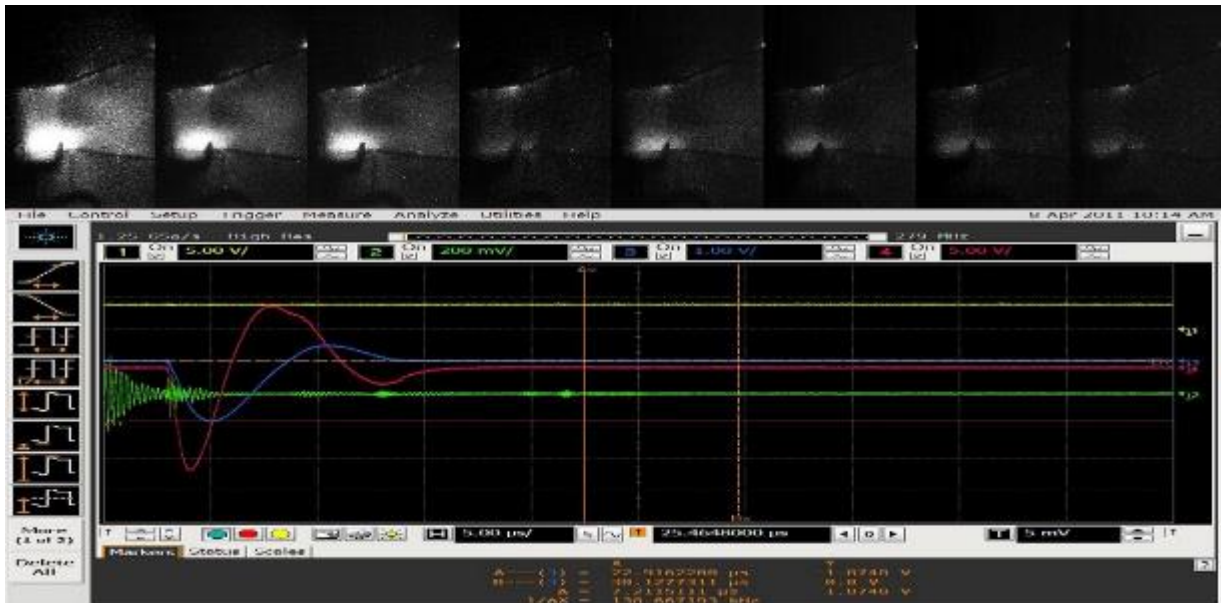


Рис. 102. Свечение «остаточной атмосферы» в разрядном канале.

Таким образом, показано, что увеличение глубины форкамеры в торцевом изоляторе АИПД привело к росту временных задержек перехода от темновой к искровой стадии разряда, что указывает на их прямую зависимость от глубины форкамеры.

Следующим шагом было изготовление торцевого изолятора без форкамеры (Рис. 103).



Рис. 103. Разрядный канал АИПД-70 с торцевым изолятором без форкамеры

Модель, как и в предыдущих случаях, работала на частоте 1 Гц. Измеренный разброс задержек перехода от темновой к искровой стадии разряда составил $\sim 0,2$ мкс.

В ходе испытаний проводилось измерение средней тяги; наработка лабораторной модели АИПД-70 составляла 21600 импульсов для каждого из трёх вариантов торцевого изолятора, после чего производилось взвешивание шашек РТ и расчёт интегральных характеристик. Результаты приведены в таблице Табл. 12. и на Рис. 104.

Табл. 12 Результаты испытаний лабораторной модели АИПД-70 с торцевыми изоляторами с форкамерами различной глубины.

№	Глубина форкамеры, мм	Единичный импульс тяги, мн·с	Расход, мг/имп	Удельный импульс тяги, км/с	КПД, %
1	12	1,58	0,121	13,1	15,2
2	4	1,56	0,122	12,8	14,5
3	0	1,7	0,11	15,45	19,2

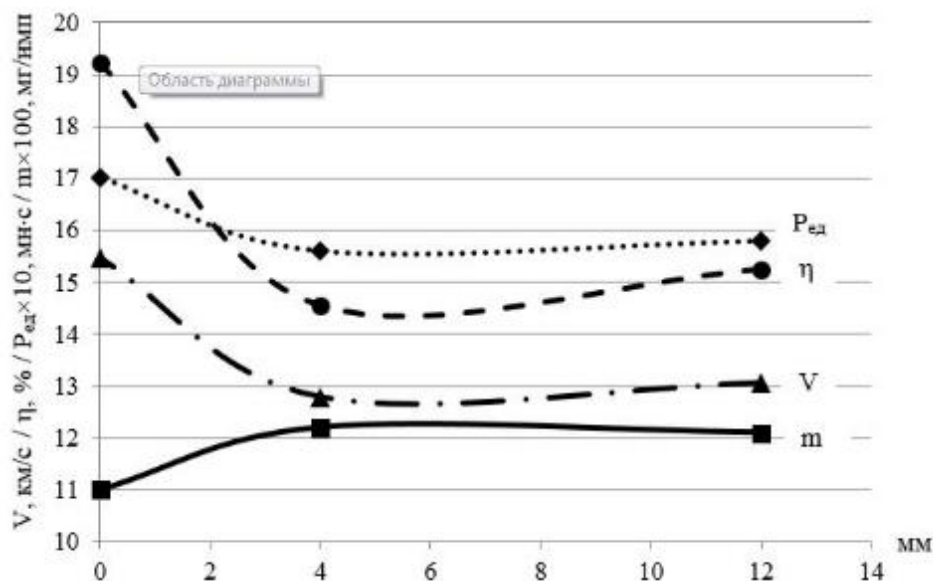


Рис. 104. Характеристики лабораторной модели АИПД-70 с торцевыми изоляторами с форкамерами различной глубины

Результаты испытаний убедительно показывают, что уменьшение глубины форкамеры вплоть до полного отказа от неё приводит к росту единичного импульса тяги при снижении расхода рабочего тела. Но стоит заметить, что с уменьшением глубины форкамеры также уменьшается толщина торцевого изолятора, что приводит к приближению зоны электрического разряда к катодной шине. Таким образом, основной вклад в улучшение характеристик может оказывать магнитное поле, образующееся вокруг шины во время протекания по ней разрядного тока.

Для проведения исследования влияния толщины торцевого изолятора, а фактически, расстояния до катодной токоподводящей шины, образующей заднюю стенку разрядного канала, на характеристики, в разрядном канале лабораторной модели АИПД-70 устанавливались торцевой изолятор и с глубиной форкамеры 1 мм и свеча поджига на расстояниях от катодной шины, приведённых в таблице Табл. 13.

Табл. 13 Влияние катодной токоподводящей шины на характеристики лабораторной модели АИПД-70

	Глубина форкамеры	Расстояние от свечи до катодной шины, мм	Импульс тяги, мН·с	Расход, мг/имп	Удельный импульс тяги, км/с	КПД, %
1	1 мм	4	1,69	0,108	15,65	19,3
2		8	1,67	0,110	15,18	18,6
3		14	1,63	0,113	14,42	17,2
4		24	1,6	0,112	14,28	16,7

Для сравнения аналогичная серия испытаний была проведена с п с использованием торцевых изоляторов с форкамерами различной глубины, результаты которой приведены в Табл. 14.

Табл. 14 Влияние глубины форкамеры на характеристики лабораторной модели АИПД-70

	Глубина форкамеры	Расстояние от свечи до катодной шины, мм	Импульс тяги, мН·с	Расход, мг/имп	Удельный импульс тяги, км/с	КПД, %
1	0	4	1,7	0,110	15,45	19,2
2	4	8	1,58	0,121	13,05	16,3
3	12	14	1,56	0,121	12,89	15,9
4	12	24	1,51	0,122	12,38	14,7

Тенденция по улучшению интегральных параметров по мере приближения к катодной шине сохранилось, но при этом отчётливо выявилось негативное влияние глубины форкамеры на параметры АИПД, что наиболее заметно на расстоянии свыше 12 мм от катодной шины (Табл. 14).

Испытания лабораторной модели АИПД-70 с торцевым изолятором без форкамеры позволили выявить эффект, который при длительной работе может привести к выходу из строя АИПД. Спустя $2 \cdot 10^4$ импульсов стало заметно искривление кромки шашки РТ (Рис. 105), которое более длительной работе будет, что приведёт большему уносу массы РТ с шашки, неравномерному расходу.

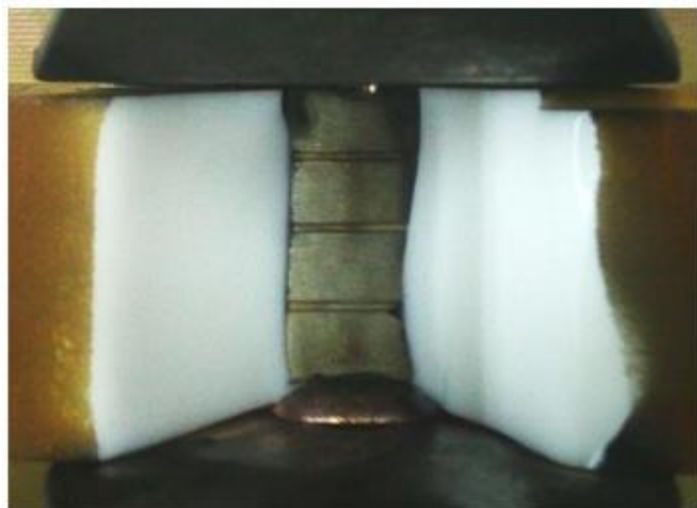


Рис. 105. Разрядный канал АИПД-70 с торцевым изолятором без форкамеры после 21600 импульсов.

Для проверки был изготовлен торцевой изолятор без форкамеры для макета АИПД-95 (Рис. 106).



Рис. 106. Внешний вид разрядного канала макета АИПД-95 и его торцевого изолятора без форкамеры.

После наработки $2,2 \cdot 10^4$ импульсов был обнаружен тот же эффект – неравномерное срабатывание шашек. Для его устранения было сделано углубление 1 мм трапецидальной формы, призванное стабилизировать форму кромки шашки за счёт эрозии под воздействием плазмы (Рис. 107, Рис. 108).

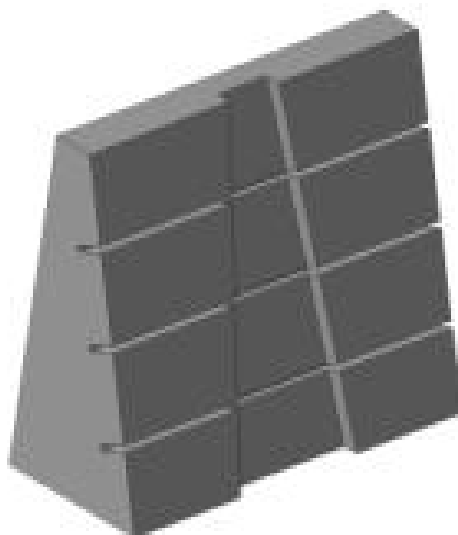


Рис. 107. Внешний вид торцевого изолятора [94].



Рис. 108. Разрядный канал АИПД-95 с форкамерой трапецеидальной формы.

Через 10^4 импульсов произведена фотосъемка. На изображении отчетливо видно, что кромка практически выровнялась.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что примененная конструкция форкамеры обеспечила стабилизацию формы кромок шашек РТ, а также осаждение углерода на поверхность свечи поджига, необходимого стабильной инициации основного разряда.

4.2 Применение результатов исследования начальной стадии разряда и проблемы карбонизации разрядного канала в конструкциях АИПД нового поколения

Результаты исследования начальной стадии разряда в АИПД потребовали существенного изменения геометрии разрядного канала, в особенности, торцевого изолятора с форкамерой.

Форкамера, представляющая собой некоторый свободный объем в торцевом изоляторе, в котором устанавливается свеча поджига разряда, была предложена в НИИ ПМЭ МАИ еще в самом начале развития схемы рельсотрона с боковой подачей плазмообразующего вещества для борьбы с карбонизацией рабочих поверхностей шашек [63]. Глубина форкамеры зависит от длительности начальной стадии разряда: чем продолжительнее разряд, тем большая требуется глубина форкамеры, чтобы на срез шашек рабочего тела выходил уже сформировавшийся разряд, способный обеспечить на поверхности шашек необходимый для эффективной абляции поток лучистой энергии. Применение форкамеры позволило решить проблему карбонизации и создать первые работоспособные образцы АИПД с боковой подачей плазмообразующего вещества. Вместе с тем, было известно, что слишком большая глубина форкамеры приводит к завышенной начальной индуктивности разрядного контура, что негативно сказывается на электродинамическом к.п.д. процесса ускорения плазмы.

Позднее было обнаружено, что торцевой изолятор и форкамера с вертикальными стенками не гарантируют от карбонизации участков шашек рабочего тела, примыкающих к аноду. Был предложен торцевой изолятор с наклонными стенками. Чтобы значительно не увеличивать глубину форкамеры, угол наклона стенки торцевого изолятора первоначально был принят небольшим - 5° к вертикали.

Таким образом, сложилась типовая для АИПД 2000-х годов конфигурация торцевого изолятора, пример которой показан на Рис. 109. На рисунке видно, что торцевой изолятор имеет форму сегмента усеченного конуса высотой h с углом наклона образующей к вертикали $\delta=5^\circ$. Форкамера образована полуцилиндром с вертикальными стенками, таким образом, глубина форкамеры a вблизи катода равна ее полуширине $\frac{1}{2}b$, а вблизи анода $a=\frac{1}{2}b+h\cdot\text{tg } \delta$.

Изготовление торцевых изоляторов указанного типа из керамики ВК94-1 было налажено в АО «Плазма», и они были установлены во всех АИПД 2000-гг, таких как АИПД-50, АИПД-120, АИПД-45-2, АИПД-155, АИПД-95 [6, 7].

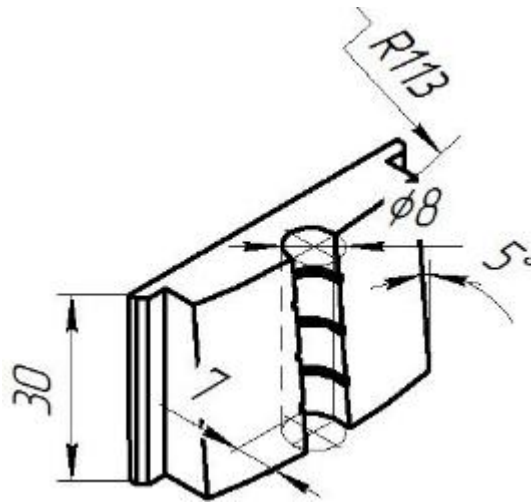


Рис. 109. Торцевой изолятор АИПД-45-2 (энергия разряда $W \sim 60$ Дж, $h=30$ мм, $\delta=5^\circ$, $b=8$ мм, $a=4 \dots 7$ мм)

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования начальной стадии разряда в АИПД, приведенные в гл.3, показали, что первоначальный пробой разрядного промежутка происходит под углом к вертикали, близким к 15° . Если придать соответствующий угол наклона торцевому изолятору, то карбонизация шашек рабочего тела не наблюдается даже при полном отсутствии форкамеры. Это позволит увеличить электродинамический к.п.д. процесса ускорения плазмы, избежав потери энергии в объеме форкамеры. Кроме того, уменьшение опасности карбонизации шашек дает возможность увеличить расстояние между шашками, тем самым уменьшить плотность плазмы и, как следствие, увеличить скорость ее истечения. Это позволит повысить удельный импульс тяги двигателя при неизменной площади рабочей поверхности шашек, либо при сохранении удельного импульса тяги увеличить площадь рабочей поверхности шашек и, как следствие, повысить массу запасаемого рабочего тела и суммарный импульс тяги двигателя. Вместе с тем, эксперименты на лабораторных моделях АИПД показали, что форкамера совсем небольшой глубины, $1 \dots 2$ мм, все же полезна, так как позволяет точно зафиксировать положение ребра между задней и торцевой (рабочей) гранями шашки рабочего тела.

Как результат проведенных работ, была предложена новая конфигурация торцевого изолятора, пример которой для той же энергии разряда $W \sim 60$ Дж приведен на Рис. 110. Угол наклона образующей конической поверхности торцевого изолятора к вертикали увеличен с 5° до 15° , форкамера повышенной ширины имеет минимальную глубину и наклонена к вертикали под тем же углом.

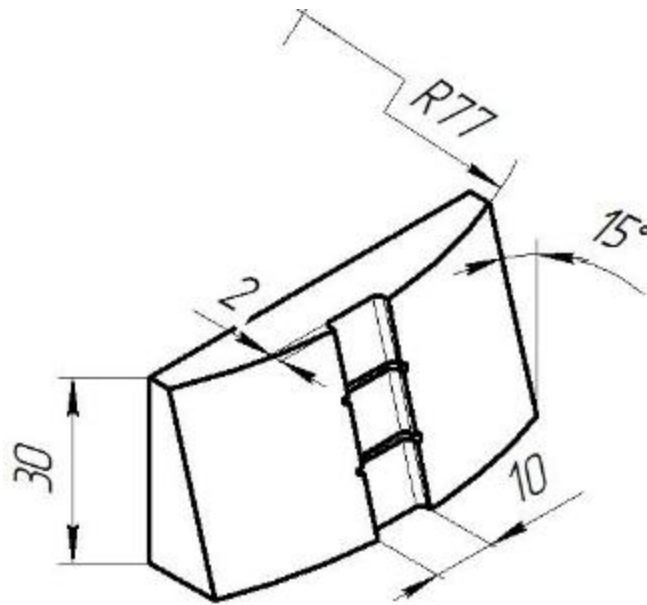


Рис. 110. Торцевой изолятор АИПД-250 и АИПД-350
(энергия разряда $W \sim 50 \dots 60$ Дж, $h=30$ мм, $\delta=15^\circ$, $b=10$ мм, $a=2$ мм)

Испытания показали, что чем больше геометрические размеры имеет разрядный канал, тем больший эффект дает применение новой конфигурации торцевого изолятора. В настоящее время она нашла применение на АИПД средней (50... 100 Дж) и большой (более 100 Дж) энергии разряда.

Примером АИПД средней энергии может служить АИПД-45-2, созданный в НИИ ПМЭ МАИ для поддержания и коррекции орбиты МКА научного назначения МКА-ФКИ (ПН2). Данный аппарат с корректирующей двигательной установкой АИПД-45-2 был выведен на околоземную орбиту в 2014 г. Схема разрядного канала АИПД-45-2 показана на Рис. 111. Видно, что торцевой изолятор имеет типовую для двигателей 2000-х годов конфигурацию.

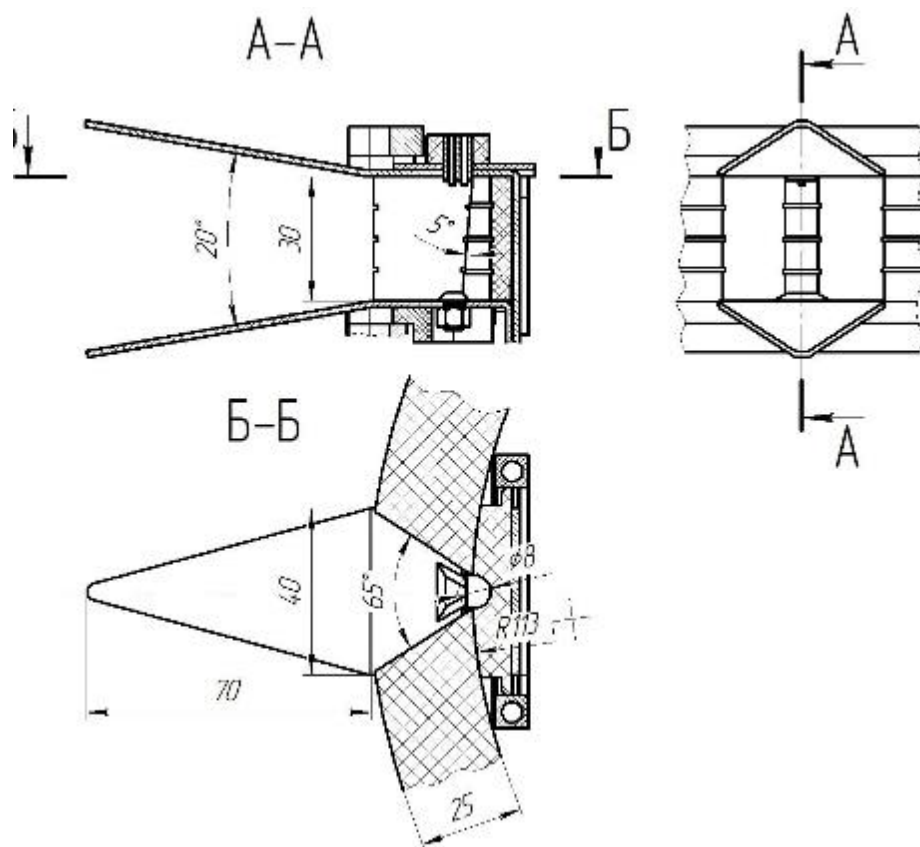


Рис. 111. Схема разрядного канала АИПД-45-2

В 2017 и 2020 г.г. в НИИ ПМЭ МАИ были созданы и прошли наземные испытания двигатели АИПД-250 и АИПД-350 нового поколения, но того же класса энергии разряда, тяги и потребляемой мощности. Двигательная установка на базе АИПД-250 имеет следующие отличительные особенности:

- применен разрядный канал с новой конфигурацией торцевого изолятора;
- в блоке накопителя энергии применены новые импульсные конденсаторы АО «Нюкон», удельная энергоемкость которых увеличена с 23 Дж/кг до 30 Дж/кг;
- установлен разработанный НТИЦ «Техком» новый блок СПУ с цифровым управлением, масса которого уменьшена с 1,5 кг (ЭРДУ АИПД-45-2 и АИПД-155) до 1,0 кг.

Кроме того, использованы новые электронные компоненты, такие как свечи поджига и разрядники, разработанные в АО «Плазма». Все это позволило существенно уменьшить массу и габариты ЭРДУ. Схема разрядного канала АИПД-250 с новой конфигурацией торцевого изолятора и новой свечой поджига представлена на Рис. 112. Более поздний АИПД-350 (наземные испытания в 2020 г.) с меньшей энергией разряда (50 Дж) имеет разрядный канал такого же типа.

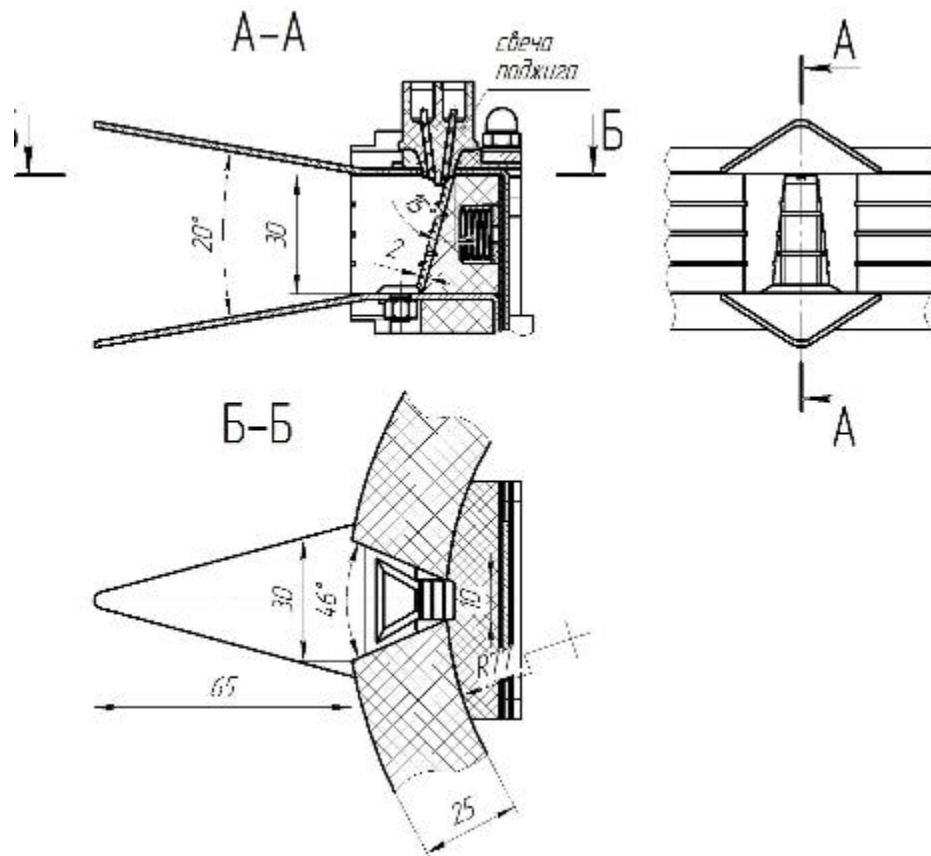


Рис. 112. Схема разрядного канала АИПД-250 и АИПД-350

Наземные испытания ЭРДУ АИПД-250 были проведены в 2017 г. Результаты испытаний, и для сравнения, характеристики лётного образца предыдущего поколения ЭРДУ АИПД-45-2, приведены в Табл. 15.

Табл. 15 Сравнительные характеристики ЭРДУ АИПД-45-2 и АИПД-250

Тип ЭРДУ	АИПД-250	АИПД-45-2
Энергия разряда, Дж	62	55
Потребляемая мощность, Вт	60...120	75...150
Ресурс по запасу рабочего тела, ч	3600	3860
Удельный импульс тяги, м/с	12000	11000
Средняя тяга, мН	1,2...2,4	1,45...2,9
Суммарный импульс тяги, кН·с	15,6	20
Масса вырабатываемого рабочего тела, кг	1,3	1,8
Полная масса ЭРДУ с запасом рабочего тела, кг	8,2	10,5
Цена тяги, Вт/мН	50	52
Отношение тяги к массе ЭРДУ, мкН/кг	296	274
Эффективный удельный импульс тяги, м/с	1900	1900

Из Табл. 15 следует, что при приблизительно той же энергии разряда удельный импульс тяги двигателя нового поколения увеличился с 11000 м/с до 12000 м/с, что можно объяснить только лучшей организацией рабочего процесса, в частности лучшим использованием ускорения плазмы в начальной стадии разряда.

Фотография разрядного канала АИПД-250 после окончания наземных испытаний приведена на Рис. 113. На фото, а также на виде спереди схемы, представленной на Рис. 112, видно, что при угле наклона торцевого изолятора 15° постоянная по высоте ширина форкамеры не вполне соответствует задним ребрам рабочих поверхностей шашек. При относительно небольших размерах разрядного канала, характерных для АИПД с малой и средней энергией разряда это несоответствие не критично, но при больших размерах канала может привести к образованию затененных участков шашек и к последующей их карбонизации. Ширина форкамеры должна быть переменной по высоте, так чтобы она соответствовала форме выработки шашек рабочего тела.



Рис. 113. Разрядный канал АИПД-250
после окончания наземных испытаний

АИПД большой энергии разряда ($W > 100$ Дж) получили меньшее распространение, так как в своей области тяги и потребляемой мощности (150 В и более) вступают в конкуренцию с успешно развивающимися стационарными плазменными и ионными двигателями, такими как, например, СПД и ВЧИД. Примером АИПД большой энергии разряда является корректирующая двигательная установка (КДУ) АИПД-95, разрабатываемая АО «НИИЭМ» совместно с НИИ ПМЭ МАИ для МКА научного назначения «Ионосфера-М» [102].

Схема разрядного канала первой версии АИПД-95, проходившей испытания в НИИ ПМЭ МАИ в 2012 г., представлена на Рис. 114. Видно, что торцевой изолятор АИПД-95 имеет типовую для АИПД 2000-х годов конфигурацию с углом наклона образующей конической

поверхности к вертикали 5° и полуцилиндрической вертикальной форкамерой, как показано на Рис. 115.

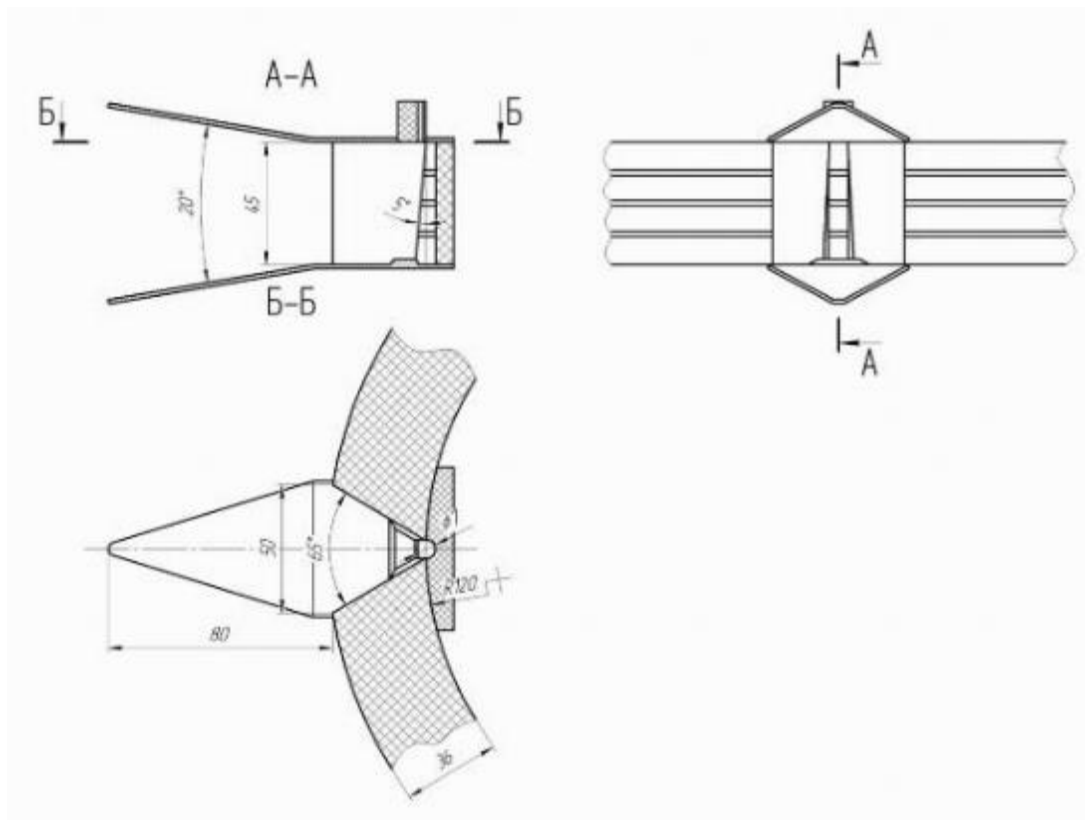


Рис. 114. Схема разрядного канала АИПД-95

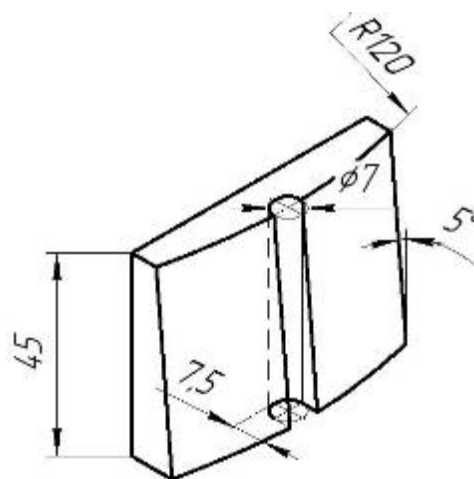


Рис. 115. Торцевой изолятор АИПД-95

Испытания показали, что тяговые и расходные характеристики ЭРДУ АИПД-95 в основном соответствуют техническому заданию, но наблюдается карбонизация рабочих и задних поверхностей шашек, приводящая к периодическому пробою разрядного контура. Следует отметить, что проблема карбонизации шашек обостряется с ростом энергии разряда, так как при повышении емкости и индуктивности разрядного контура разряд развивается медленнее, ток достигает максимума за пределами разрядного канала, и необходимый для

абляции поток лучистой энергии на поверхности шашек уменьшается. Кроме того, форма форкамеры совершенно не соответствовала выработке шашек, как показано на Рис. 116. Двигателю АИПД-95 требовалась доработка, но в 2013 г. проект «Ионосфера» был приостановлен Роскосмосом.

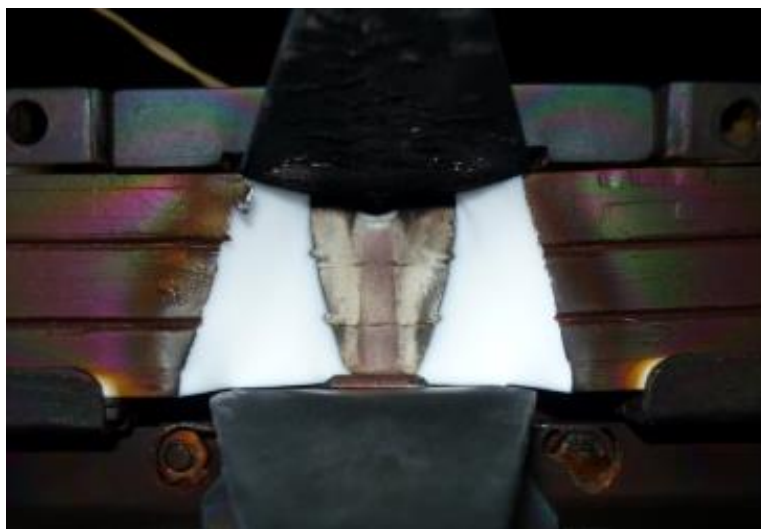


Рис. 116. Разрядный канал экспериментального образца АИПД-95 после окончания наземных испытаний ($3 \cdot 10^4$ импульсов)

В 2018 г. финансирование проекта «Ионосфера» было возобновлено и началась разработка модернизированных МКА «Ионосфера-М» и двигательной установки для него КДУ АИПД-95М. При разработке модернизированного варианта заказчиком было выдвинуто требование по повышению суммарного импульса тяги с 50 кН·с до 60,5 кН·с с целью обеспечения увода аппарата с орбиты по истечении срока его активного существования. Для выполнения этого требования при модернизации АИПД-95 с целью увеличения запаса рабочего тела площадь поперечного сечения шашек была увеличена $15,3 \text{ см}^2$ до $18,0 \text{ см}^2$, как показано на Рис. 117.

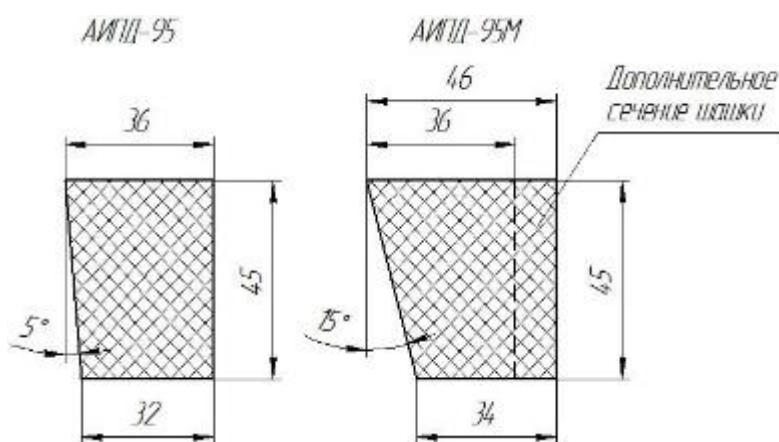


Рис. 117. Сравнительные размеры поперечного сечения шашек рабочего тела АИПД-95 и АИПД-95М

Указанная доработка могла привести к дальнейшему обострению проблемы карбонизации, так при увеличении площади рабочих поверхностей шашек плотность падающей на них лучистой энергии неизбежно падет. Учитывая это обстоятельство, а также результаты испытаний АИПД-95, в НИИ ПМЭ МАИ были выработаны следующие рекомендации по доработке КДУ АИПД-95:

1. Обеспечить зазор между шашками рабочего тела и контактирующей с ними поверхностью торцевого изолятора не более 0,1 мм. Это позволит избежать науглероживания упомянутого зазора и уменьшит вероятность утечки тока по поверхности изолятора, что может привести к отказу изделия.

2. Изготовить торцевой изолятор и шашки рабочего тела с углом наклона к вертикали 15° . Данная доработка обеспечит равномерную по высоте выработку шашек рабочего тела и является обязательной при использовании в БНЭ конденсаторов с сухим наполнителем типа «Нюкон»*.

3. При изготовлении торцевого изолятора руководствоваться следующими рекомендациями: глубина форкамеры 2-3 мм, форма сечения форкамеры – прямоугольная, ширина форкамеры, измеренная по середине торцевого изолятора – 18-20 мм*.

4. Обеспечить такую ширину электродов разрядного канала, чтобы соблюдалось расстояние не менее 5 мм от грани, образованной фронтальной и рабочей поверхностями шашек РТ до края электрода*. Данное требование обусловлено необходимостью исключить привязки разряда к этому месту, что вызывает интенсивную местную эрозию электродов и шашек рабочего тела и снижает эксплуатационные характеристики двигателя.

5. При доработке разрядного канала обеспечить длину электродов от линии перегиба до края – 80 мм*. Этим достигается оптимизация переменной составляющей индуктивности разрядного канала.

6. При доработке разрядного канала обеспечить расстояние между шашками РТ, измеренное по середине разрядного канала вдоль поверхности торцевого изолятора – 18-20 мм*. Это позволяет, при отсутствии науглероживания шашек, получить максимально высокие удельные характеристики двигателя в обеспечение достижения требуемого суммарного импульса тяги.

7. Разместить разрядники ПИГН.646783.002 (свечи поджига) максимально близко к поверхности торцевого изолятора.

* Рекомендации по пп.2-7 основаны на результатах исследовательских испытаний в НИИ ПМЭ МАИ экспериментального торцевого изолятора с углом наклона 15° на имитаторе двигательного блока АИПД-95.

8. Предусмотреть установку защитной крышки над заливкой КНЭ для защиты от науглероживания при испытаниях и повышения радиационной стойкости КДУ АИПД-95 от воздействия электронного и протонного излучений ЕРПЗ, протонов СКЛ.

9. Предусмотреть гальваническую развязку защитных экранов от корпуса АИПД. Это позволит существенно уменьшить токи выноса и паразитные привязки разрядного тока на элементы конструкции АИПД. Данная рекомендация основана на опыте разработки и испытаний двигательных установок АИПД-45-2 и АИПД-155 в НИИ ПМЭ МАИ.

10. Рассмотреть возможность применения в блоках инициирования разряда новых разрядников РУ-187, разработанных в АО «Плазма».

В соответствии с рекомендациями НИИ ПМЭ МАИ в 2019 г. НИИЭМ был разработан и изготовлен модернизированный вариант КДУ АИПД-95М. Конфигурация нового торцевого изолятора для АИПД-95 показана на Рис. 118. Видно, что в отличие от предыдущих образцов, форкамера АИПД-95М имеет переменную ширину от 10 до 20 мм, что должно соответствовать наблюдавшейся при испытаниях форме выработки шашек рабочего тела.

Схема разрядного канала АИПД-95М, модернизированного в соответствии с рекомендациями НИИ ПМЭ МАИ представлена на Рис. 119.

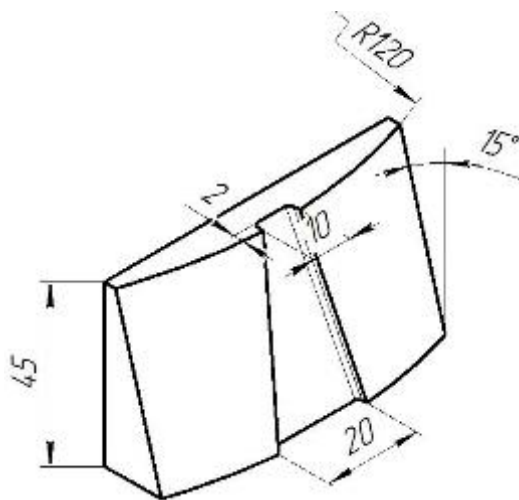


Рис. 118. Торцевой изолятор АИПД-95М

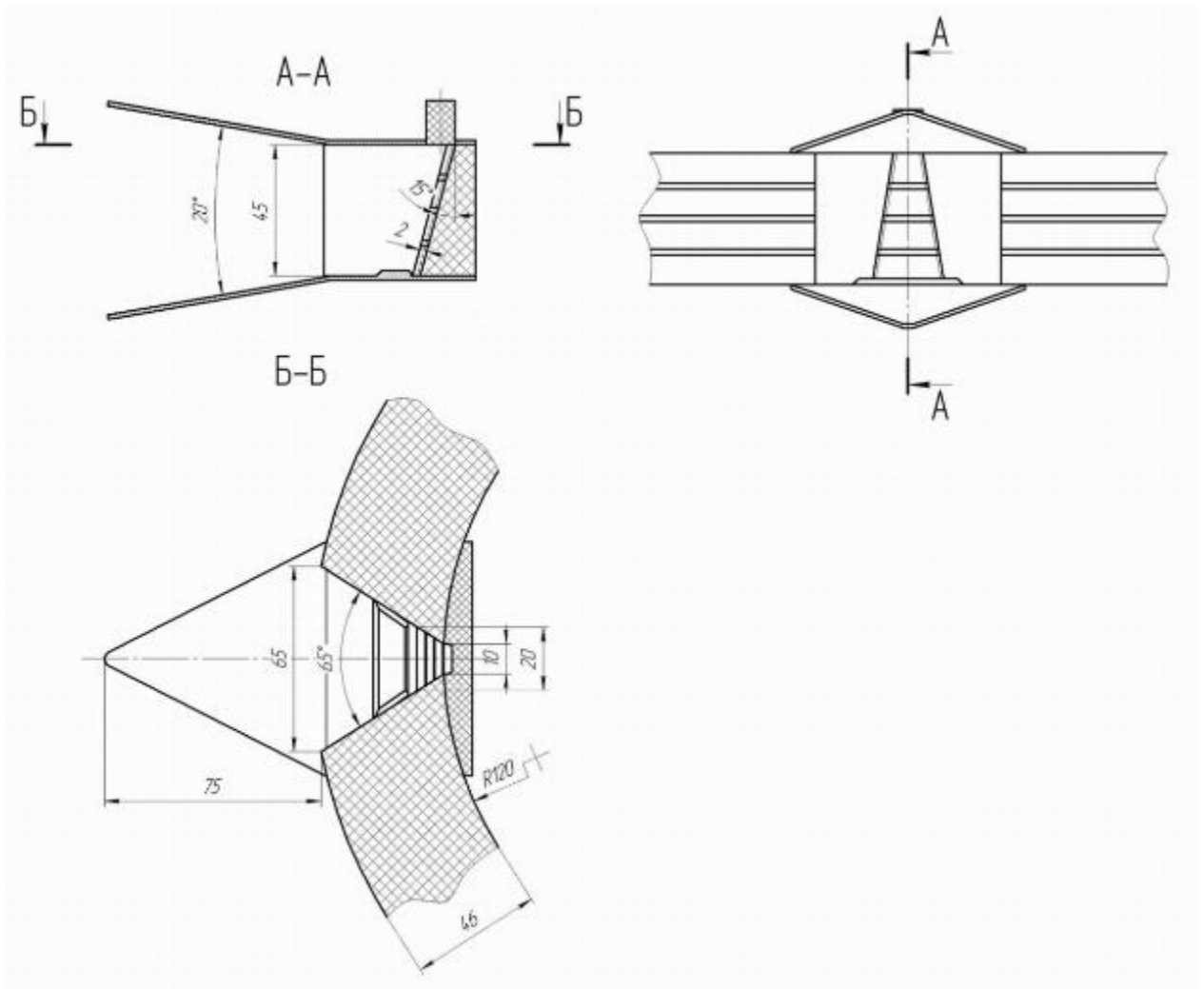


Рис. 119. Схема разрядного канала АИПД-95М

Результаты проведенных в 2020-21 гг. в НИИ ПМЭ МАИ наземных испытаний модернизированной КДУ АИПД-95М и, для сравнения, предыдущего образца АИПД-95 приведены в Табл. 16.

Из Табл. 16 следует, что требование заказчика по увеличению суммарного импульса тяги АИПД-95 было успешно выполнено. При этом удалось решить проблему карбонизации рабочих поверхностей шашек рабочего тела, что доказывает приведенная на Рис. 120 фотография разрядного канала АИПД-95, выполненная после окончания наземных испытаний. Видно отсутствие карбонизации рабочих поверхностей шашек, а также хорошее соответствие боковых стенок форкамеры форме выработки шашек после $4 \cdot 10^4$ импульсов.

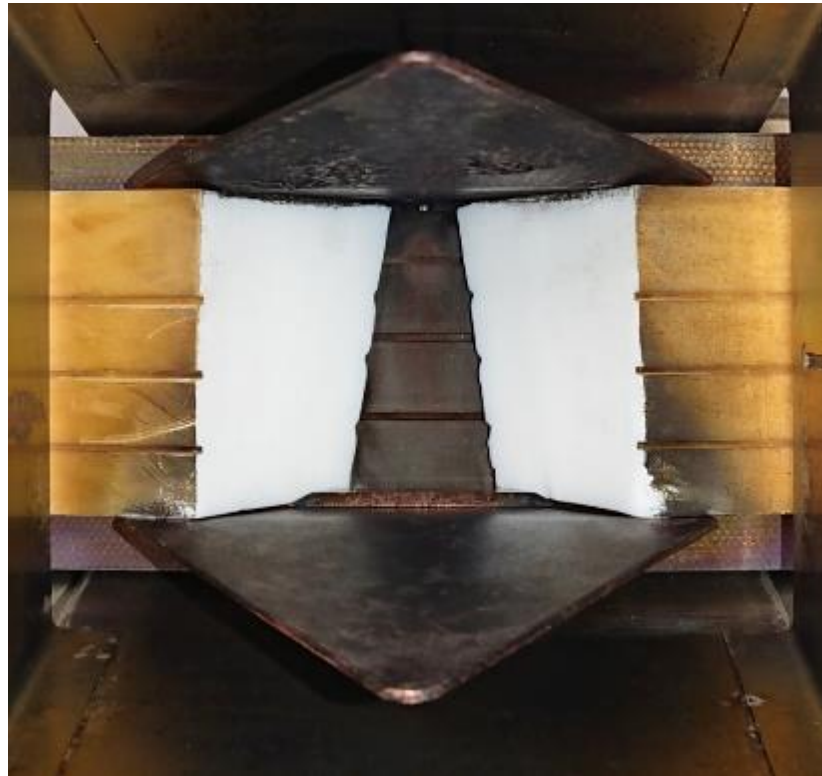


Рис. 120. Разрядный канал модернизированного образца КДУ АИПД-95М после окончания наземных испытаний ($4 \cdot 10^4$ импульсов)

Табл. 16 Сравнительные характеристики КДУ АИПД-95 и модернизированной КДУ АИПД-95М

Наименование КДУ	АИПД-95	АИПД-95М
Энергия разряда, Дж	155	155
Потребляемая мощность, Вт	170	180
Удельный импульс тяги, м/с	13100	13600
Средняя тяга, мН	2,6	3,0
Суммарный импульс тяги, кН·с	50	60,5
Масса вырабатываемого рабочего тела, кг	3,3	4,5
Полная масса ЭРДУ с запасом рабочего тела, кг	20	20,6

Заключение

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации, выделяемого из федерального бюджета для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации (VII очередь, постановление Правительства РФ №220 от 09.04.2010). Соглашение №075-15-2019-1894 от 03.12.2019.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ текущего состояния разработок, тенденций развития и областей применения АИПД. Сформулированы основные проблемы АИПД, требующие решения.

2. Произведён анализ существующих типов ТИУ, пригодных для измерения тяг ЭРД, в результате которого сделан обоснованный выбор типа ТИУ для использования в ходе экспериментальных исследований. Разработано усовершенствованное ТИУ со сниженным уровнем помех в регистрируемом сигнале, позволившее провести достоверные измерения тяг испытанных АИПД. Разработана математическая модель ТИУ струнного типа, подтвердившая достоверность измерения тяги, создаваемой АИПД.

3. Проведены исследования развития разряда в разрядном канале АИПД с электромагнитным механизмом ускорения посредством оптических и магнитозондовых измерений, а на начальной стадии разряда, посредством использования высокоскоростной фотосъемки, позволившей впервые зафиксировать зарождение и развитие искровой стадии разряда, определяющей угол развития дуговой стадии разряда, что позволило выявить зависимость между начальной стадией разряда и конфигурацией разрядного канала АИПД.

4. Приближенная математическая модель начальной (предпробойной) стадии разряда АИПД подтвердила основные результаты экспериментальных исследований.

5. Проведено исследование условий возникновения карбонизации рабочих поверхностей шашек РТ, в результате которого установлено отсутствие заметного влияния температуры шашек на процессы карбонизации, определено критическое расстояние, при котором возникает карбонизация, отмечена важность учёта фактора «остаточной атмосферы» в разрядном канале, а также выработаны рекомендации по доработке разрядного канала КДУ АИПД-95.

6. Проведены исследования влияния конструкции разрядного канала на характеристики АИПД, в результате которых определена оптимальная длина электродов, разработана новая

конструкция торцевого изолятора, позволившая увеличить удельный импульс тяги лабораторной модели АИПД-70 на 20%.

7. Полученные результаты исследования апробированы на ЭРДУ АИПД-250 и КДУ АИПД-95. Применение в конструкции ЭРДУ АИПД-250 разработанного торцевого изолятора позволило повысить удельный импульс тяги на 9%, снизить цену тяги на 4%. Применение в конструкции КДУ АИПД-95 разработанного торцевого изолятора позволило при сохранении габаритов разрядного канала и ЭРДУ в целом повысить суммарный импульс тяги на 20%, среднюю тягу на 15% при сохранении удельного импульса тяги и предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела.

Список сокращений и условных обозначений

- АБН – керамический нитрид бора
- АИПД – абляционный импульсный плазменный двигатель
- БИР – блок инициации разряда
- БИР – блок иницирования разряда
- БНЭ – блок накопитель энергии
- ВЧИД – высокочастотный ионный двигатель
- ДАС – двигатель с анодным слоем
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
- ДУ – двигательная установка
- ИД – ионный двигатель
- ИПД – импульсный плазменный двигатель
- КА – космический аппарат
- КД – коллоидный двигатель
- КДУ – корректирующая двигательная установка
- КНЭ – конденсаторный накопитель энергии
- КПД – коэффициент полезного действия
- МАИ – Московский авиационный институт
- МКА – малоразмерный космический аппарат
- МСА – международная стандартная атмосфера
- НИИ ПМЭ МАИ – Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института
- НИИЭМ – Научно-исследовательский институт электромеханики
- НПО – научно-производственная организация
- РТ – рабочее тело
- РФ – Российская Федерация
- САС – срок активного существования
- СИР – система инициации разряда
- СПД – стационарный плазменный двигатель
- СПД – стационарный плазменный двигатель
- СПУ – система питания и управления
- США – Соединенные Штаты Америки
- ТИУ – тягоизмерительное устройство
- ТКД – термokatалитический двигатель
- ТСД – торцевой сильноточный двигатель

ТХД – торцевой холловский двигатель

ЭДД – электродуговой двигатель

ЭМИПД – электромагнитный импульсный плазменный двигатель

ЭНД – электронагревный двигатель

ЭРД – электроракетный двигатель

ЭРДУ – электроракетная двигательная установка

ЭТД – электротермический двигатель

ЭТИПД – электротермический импульсный плазменный двигатель

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

Список литературы

1. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютер. технологий, мех.-мат. и геогр. / . – Минск: БГУ, 2012. – 159 с.
2. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П., Золотой С.А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т. 114. № 1. С. 15-26.
3. Ахметжанов Р.В., А.В. Богатый, 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.
4. Akhmetzhanov R., Bogatyy A., Derkachev A., Popov G., Semenikhin S. Development of electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI. // Proceedings of the International Astronautical Congress. IAC. 2018.
5. Bogatyy A.V., Dyakonov G.A., Elnikov R.V., Popov G.A. Application of Low-Power Pulse Plasma Thrusters in Thrust Units of Small Spacecrafts. In: Jain L.C., Favorskaya M.N., Nikitin I.S., Reviznikov D.L. (eds) // Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. V.217. pp 141–154. doi: 10.1007/978-981-33-4826-4_11.
6. Н.Н. Антропов, А.В. Богатый, Г.А. Дьяконов, Н.В.Любинская, Г.А. Попов, С.А.Семенихин, В.К. Тютин, М.М. Хрусталеv, В.Н. Яковлев. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 5. –С.30-40.
7. Antropov N.N., Bogatyy A.V., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Khrustalev M.M., Yakovlev V.N. A New Stage in the Development of Ablative Pulsed Plasma Thrusters at the RIAME // Solar System Research. 2012. Vol. 46. No. 7. p.531-541. doi: 10.1134/S0038094612070064.
8. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Даньшов Ю.Т., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Харламов В.С., Яковлев В.Н. Корректирующая двигательная установка с абляционным импульсным плазменным

- двигателем для малых космических аппаратов // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2013. № 5. С.33-37.
9. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Марьяшин А.Ю., Халапян К.Г. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2013. т.133. С. 19-26.
 10. Н.Н. Антропов, Г.А. Дьяконов, Н.В. Любинская, С.А. Семенихин, В.К. Тютин, М.М. Хрусталеv. Расчетные и экспериментальные исследования в обоснование разработки АИПД с энергией 20 Дж // Известия Академии наук, сер. Энергетика. 2015. № 2. С.108.
 11. Antropov N.N., Bogatyu A.V., Boykachev V.N., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Yakovlev V.N. Development of Russian Next-Generation Ablative Pulsed Plasma Thrusters // 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application. Procedia Engineering. 2017. 185, pp. 53–60. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.291.
 12. Антропов Н.Н., А.В. Богатый, 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. 2008. №3 (52). С. 28-34
 13. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Современное состояние работ по созданию ЭРДУ с АИПД в НИИ ПМЭ МАИ // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 3. С. 96-109.
 14. Dyakonov 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. doi: 10.1088/1757-899X/868/1/012025.
 15. В.А. Щепетилев. Разработка электрореактивных двигателей в институте атомной энергии им. И.В. Курчатова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 2017. Том 40. №2. С.5-18.
 16. А.С. Архипов, В.П. Ким, Е.К. Сидоренко. Стационарные плазменные двигатели Морозова. –М. МАИ, 2012. -292 с.
 17. Ким В.П., Семенкин А.В., Хартов С.А. Конструктивные и физические особенности двигателей с замкнутым дрейфом электронов. -М., МАИ, 2016. -159 с.
 18. Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. –М., «Машиностроение», 2008. -280 с.

19. Antropov N.N., Akhmetzhanov R.V., Bogatyu A.V., Grishin R.A., Kozhevnikov V.V., Plokhikh A.P., Popov G.A., Khartov S.A. Experimental Research of Radio-Frequency Ion Thruster // *Thermal Engineering*. 2016. Vol. 63. No. 13. P. 957-963. doi:10.1134/S0040601516130036.
20. Akhmetzhanov R. V., Bogatyu A. V., Petukhov V. G., Popov G. A., Khartov S. A. Radio-Frequency Ion Thruster Application for the Low-Orbit Small SC Motion Control // *Advances In The Astronautical Sciences*. 2017. Vol. 161, p. 979-988.
21. Кульков В.М., Обухов В.А., Егоров Ю.Г., Белик А.А., Крайнов А.М. Сравнительная оценка эффективности перспективных типов электроракетных двигателей в составе малых космических аппаратов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. №3 (34). С.187-195.
22. Antropov N.N., Popov G.A., Yakovlev V.N., Darnon F., Kazeev M.N., Akimov V.N., Ogloblina I.S., Nagel Yu A. Application of Pulsed Plasma Thrusters for Small Satellites // *Proceedings of the 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion*. 2000.
23. 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.
24. Vorobev A.L., Elnikov R.V. Analysis of the Structure of Families of Locally Optimum Solutions to the Problem of the Interplanetary Transfer of a Spacecraft with a Low-Thrust Engine // *Cosmic Research*. 2018. V. 56. N. 5. P. 365-372. doi:10.1134/S0010952518050076.
25. Богатый А.В., Ельников Р.В., Назаренко И.П., Попов Г.А., Семенихин С.А. Перспективные импульсные плазменные двигатели и их применение в составе двигательных установок малых космических аппаратов // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2018. № 3. С. 119-125.
26. Bogatiy A.V., El'nikov, R.V., Nazarenko, I.P., Popov, G.A., Semenikhin, S.A. Advanced Pulsed Plasma Thrusters and Their Application as a Part of Small Spacecraft Propulsion Systems // *Russian Aeronautics*, 2018, 61(3), P. 445–451. doi:10.3103/S1068799818030194
27. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. - Москва: ФГУП "НПП ВНИИЭМ", 2009. 309 с.
28. Иванов Д.С., Ивлев Н.А., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С. Результаты летных испытаний системы ориентации микроспутника «Чибис-М» // *Космические исследования*. 2014. том 52. № 3. С.218-228.
29. Пец Л. А., Симонов А. И., Храбров В.А. Как создавали первые ЭРД // *«Земля и Вселенная»*. 2005. № 6. С. 57-60.

30. Zakrzewski C, Benson S., Sanneman P., Hoskins A. On-Orbit Testing of the EO-1 Pulsed Plasma Thruster // AIAA 2002-3973. 2002. doi: 10.2514/6.2002-3973.
31. Berkery J., Choueiri E. Laser Discharge Initiation for Gas-fed Pulsed Plasma Thrusters // 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2001. doi: 10.2514/6.2001-3897.
32. Schönherr T., Han G., Gürbüz C., Koizumi H., Komurasaki K. First Experiments Towards an Atmosphere-Breathing PPT // 34th International Electric Propulsion Conference. 2015.
33. Szelecka A., Kurzyrna J., Daniłko D., Barral S. Liquid micro pulsed plasma thruster // Nukleonika. v.60(2). 2015. doi: 10.1515/nuka-2015-0057.
34. Marques R.I., Gabriel S.B., Costa F. de S. High Frequency Burst Pulsed Plasma Thruster Research at the University of Southampton // IEPC-2007. Paper No. 300.
35. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорением рабочего тела // Труды МАИ. 2012. № 52. С. 20.
36. Космические двигатели: состояние и перспективы. М.: «Мир», 1988. -454 с.
37. N. Antropov, G. Dyakonov, O. Lapaev, G. Popov. Laboratory Investigation of Pulsed Plasma Thrusters with Gas Valves // Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol.187 / Micropropulsion for Small Spacecraft. 2000. p.369-377.
38. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: «Мир», 1975. -525 с.
39. Александров В.А. и др. Импульсные плазменные ускорители. Харьков: ХАИ, 1983. - 244 с.
40. Michels C.J. and Ramins P. Performance of coaxial plasma gun with various propellants // In Proceedings of an International Symposium on Plasma Guns, Physics of Fluids Supplement. 1964. Part II, Vol. 7(11). P.71–74. doi: 10.1063/1.1711095.
41. Ling W., Koizumi H., Schönherr T. Use of Liquid Propellants in Pulsed Plasma Thrusters for Small Satellites // 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe. Japan. 2015.
42. Rezaeiha A., Schönherr T. Review of Worldwide Activities in Liquid-Fed Pulsed Plasma Thruster // Journal of Propulsion and Power. 2014. vol 30(2). P. 253-264. doi:10.2514/1.B34807.
43. Vondra R., Tomassen K., Solbes A. Analysis of Solid Teflon Pulsed Plasma Thruster //Journal of Spacecraft and Rockets. 1970. Vol. 7. doi: 10.2514/3.30181.
44. Козубский К.Н., Корякин А.И., Мурашко В.М. История космических стационарных плазменных двигателей и их применение в России, США и Европе. Новые вызовы для стационарных плазменных двигателей. К 40-летию первых космических испытаний стационарных плазменных двигателей // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Выпуск № 60.

45. Solbes A., Vondra R. Performance Study of a Solid Fuel-Pulsed Electric Microthruster // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1973. Vol. 10. No 6. doi: 10.2514/3.61898.
46. Vondra R., Tomassen K. Performance Improvements in Solid Fuel Microthrusters // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1972. Vol. 9. No 10. doi: 10.2514/3.61794.
47. Богатый А.В., Семенихин С.А. Карбонизация рабочих поверхностей шашек импульсного источника плазмы // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования*. 2021. № 1. С. 102-106. doi: 10.31857/S1028096021010064.
48. Bogatyi A.V., Semenikhin S.A. Carburization of the Working Surfaces of Bars of a Plasma Pulse Source // *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques*. v.15(1). p. 89-93. doi: 10.1134/S1027451021010067.
49. Zhang H., Li D., He F., Chen X. Development of an indirect thrust stand based on a cantilever beam // *AIP Advances*. 11(3). 2021. doi:10.1063/5.0041530.
50. Chakraborty S., Courtney D., Shea Ht. A 10 nN resolution thrust-stand for micro-propulsion devices // *Review of Scientific Instruments*. 86. 2015. doi: 10.1063/1.4935471.
51. Williams T., Callens R. Performance Testing of a Solid Propellant Pulsed Plasma Microthruster // *AIAA*. 1972. doi: 10.2514/6.1972-460.
52. Guman W., Palumbo D. Plasma Propulsion System for North - South Stationkeeping // *IEPC Key Biscayne. Fl.* 1976. doi: 10.2514/6.1976-999.
53. Guman W. Design Solid Propellant Pulsed Plasma Thrusters // *11-th IEPC. New Orleans. La.* 1975. doi: 10.2514/6.1975-410.
54. Guman W., Begun M. Exhaust Plume Studies of a Pulsed Plasma Thruster // *13-th JEPC. San Diego. CA.* 1978. doi: 10.2514/6.1978-704.
55. Vondra R., Tomassen K. A Flight Qualified Pulsed Electric Thruster for Satellite Control // *10-th EPC. Lake Tahoe. NE.* 1973. doi: 10.2514/3.62141.
56. Vondra R. The MIT Lincoln Laboratory Pulsed Plasma Thruster // *10-th IEPC. Key Biscayne. FL.* 1976.
57. Dolbec R. Measurements on a LES-7 Prototype Pulsed Plasma Thruster // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1970. Vol. 7. No. 7. doi: 10.2514/3.30065.
58. Tomassen K. Radiation from Pulsed Electric Thrusters // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1973. No. 10. p.679-680. doi: 10.2514/3.27802.
59. Burton R., Turchi P. Pulsed Plasma Thruster // *Journal of Propulsion and Power*. 1998. Vol.14(5). p.716-735. doi: 10.2514/2.5334.
60. Rudolph L., Jones R. Pulsed Plasma Thruster Contamination Studies // *14-th IEPC. Princeton.* 1979. doi: 10.2514/6.1979-2106.

61. Antropov N., Popov G., Kazeev M., Khodnenko V. APPT for LEO Applications // 40-th JPC Conference. Lauderdale. Fl. 2004.
62. Vondra R., U.S. Air Force Programs in Electric Propulsion // 14-th IEPC. Princeton. 1979. doi: 10.2514/6.1979-2123.
63. Rudikov A., Antropov N., Popov G. Pulsed Plasma Thruster of the Erosion Type for a Geostationary Artificial Earth Satellite // Acta Astronautica. 1995. 35(9). p.585-590. doi:10.1016/0094-5765(95)00025-U.
64. Akimov V., Nagel Yu., Ogloblina I., Antropov N., Pokryshkin A., Rudikov A. Analysis of PPT Potentialities in Solving the Satellite Orbit Control Tasks // 25-th IEPC. Cleveland. 1997.
65. Spanjers G., Mcfall K., Gulczinskii F., Spores R. Investigation of Propellant Inefficiencies in a Pulsed Plasma Thruster // 32-nd Joint Propulsion Conference. Lake Buena Vista. 1996. doi: 10.2514/6.1996-2723.
66. Antropov N., Gomilka L., Diakonov G., Krivonosov I., Popov G., Orlov M. Parameters of Plasmoids Injected by PPT // 33-rd JPC. Seattle. 1997. doi: 10.2514/6.1997-2921.
67. Arrington L., Haag T., Pencil E., Meckel N. A Performance Comparison of Pulsed Plasma Thruster Electrode Configurations // 25-th IEPC. Cleveland. 1997.
68. Turchi P. Direction for Improving PPT Performance // 25-th IEPC. Cleveland. 1997.
69. Spanjers G., Malak J., Leiweke R., Spores R. The Effect of Propellant Temperature on Efficiency in a Pulsed Plasma Thruster // Journal of Propulsion and Power. 1997. 14(4):11. doi: 10.2514/2.5312.
70. Pencil E., Kamhawi H. Evaluation of Alternate Propellants for Pulsed Plasma Thrusters // 27-th IEPC. Pasadena. 2001.
71. Scharlemann C., York T., Alternative Propellants for Pulsed Plasma Thrusters // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis. 2002. doi:10.2514/6.2002-4270.
72. Kazeev M., Popov G., Antropov N., Dyakonov G., Orlov M., Posokhin V., Tyutin V., Yakovlev V. Dynamics and Distribution of Electron Density in the Channel of Pulsed Plasma Thruster // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis. 2002. doi: 10.2514/6.2002-4119.
73. Spanjers G., Malak J., Leiweke R., Spores R. The Effect of Propellant Temperature on Efficiency in the Pulsed Plasma Thruster // Journal of Propulsion and Power. 1997. 14(4):11. doi: 10.2514/2.5312.

74. Krivonosov I., Orlov M., Popov G., Yakovlev V. Influence of Energy Storage Capacitance on PPT Characteristics // 1-st International Conference on small Spacecraft. Korolev. Russia. 1998.
75. Antropov N., Diakonov G., Orlov V., Popov G., Tyutin V., Yakovlev V., Posokhin V., Alexeev Yu., Kazeev M., Darnon F. High Efficiency Ablative Pulsed Plasma Thruster Characteristics // 3-rd International Conference on Spacecraft Propulsion. Cannes. 2000.
76. Пат. 2253953 Российская федерация, МПК H05H1/54, F03H1/00. Импульсный плазменный ускоритель и способ ускорения плазмы / Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н., заявитель и патентообладатель НИИ ПМЭ МАИ. – № 2003128090/06, заявл. 22.09.2003, опубл. 10.06.2005, Бюл. №16.
77. Popov G., Antropov N., Dyakonov G., Orlov V., Tyutin V., Yakovlev V. Experimental Study of Plasma Parameters in High-Efficiency Pulsed Plasma Thrusters // 27-th IEPC. Pasadena. 2001.
78. Antropov N., Diakonov G., Lyubinskaya N., Orlov M., Popov G., Trubnikov P., Tyutin V., Yakovlev V., Isayev V., Pugachev Yu., Shelkov N. Correction Propulsion System with Ablative Pulsed Plasma Thrusters for Unified Space Platform "Vulkan" // 3-rd International Conference on Small Spacecraft. Korolev. Russia. 2004.
79. Avatinyan G.A., Shelkov N.P., Antropov N.N., Diakonov G.A., Yakovlev V.N. Orbit Correction Propulsion System Alternatives for «Vulkan» Small Spacecraft // Proceedings of the 3rd International Conference & Exhibition «Small Satellites: New Technologies, Miniaturization. Efficient Applications in the 21st Century», vol. III, Symposium I «Small Satellite Power Supply and Attitude Control Systems». Russia. 2002. p. 297-302.
80. Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Семенихин С.А. Экспериментальные методы повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды МАИ. 2017. № 93. С.9.
81. Пат. 2202773 Российская федерация, МПК G01L5/00, G01M15/00. Устройство по определению тяги и составляющих вектора тяги электрореактивного двигателя и способ испытаний / Гниздор Р.Ю., Гопанчук В.В., Козубский К.Н., Линник В.А., Кудрявцев С.С., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие Российского космического агентства "Опытное конструкторское бюро "Факел". – № 2001100751/28, заявл. 09.01.2001, опубл. 20.04.2003.
82. Bogatyı A.V., Semenikhin S.A. Selection of the Thrust Measurement System for a Pulsed Plasma Thruster // XLIV ACADEMIC SPACE CONFERENCE: AIP Conference Proceedings. 2021. 2318, 040008. doi:10.1063/5.0035783.

83. Пятницкий Л.Н. Лазерная диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1976, 424 с.
84. Душин Л.А., Павличенко О.С. Исследование плазмы с помощью лазеров. М.: Атомиздат, 1968, 144 с.
85. Зайдель А.Н., Островская Г.В. Лазерные методы исследования плазмы. Л.: Наука, 1977, 221 с.
86. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1979, 452 с.
87. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968 г. – с. 96.
88. Carazo A.V. Piezoelectric Transformers for Space Applications // MRS Online Proceeding Library Archive 785. 2003. doi:10.1557/PROC-785-D6.8.
89. Bostick W.H. Experimental Study of Ionized Matter Projected across a Magnetic Field // Physical Review. 1956. vol. 104. Issue 2. p.292-299. doi: 10.1103/PhysRev.104.292.
90. Бобров Ю.К., Дьяков А.Ф., Сорокин А.В., Юргеленас Ю.В. Физические основы электрического пробоя газов. М.: Издательство МЭИ. 1999. -400с.
91. Bogatyy A.V., D'yakonov G.A., Semenikhin S.A. Mechanisms for the Formation of Parasitic Propellant Consumption in an Ablative Pulsed Plasma Thruster // Cosmic Research. 2019. 57(5). p. 310–316. doi: 10.1134/S0010952519050010.
92. Пат. на изобретение 2452142 С1 Российская Федерация, МПК H05H 1/54, F03H 1/00, Способ работы импульсного плазменного ускорителя / Богатый А.В., Дьяконов Г.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU). — № 2010149145/07; заявл. 02.12.2010; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.
93. Методы исследования плазмы / под редакцией В. Лохте-Хольтгревена, М.: Мир, 1971, 552 с.
94. Пат. на изобретение 2516011 С1 Российская Федерация, МПК F03H 1/00, H05H 1/54, Эрозионный импульсный плазменный ускоритель / Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Попов Г.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU). — № 2012147328/07; заявл. 08.11.2012; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
95. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач, М.: «Наука», 1978.

96. Antropov N., Diakonov G., Orlov M., Tyutin V., Yakovlev V. Development and Refinement of Highly Efficiency 150 J APPT // Proceedings of the 28th International Electric Propulsion Conference. Toulouse. France. 2003.
97. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления, М.: «Наука», 1979.
98. Antipov A.A., Bogatyu A.V., Semenov A.A. Investigation of the Initial Stage of the Discharge in an Ablative Pulsed Plasma Thruster // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. 12(5). p. 1037–1040. doi:10.1134/S1027451018050208.
99. Антипов А.А., Богатый А.В. Моделирование движения заряженных частиц в абляционном импульсном плазменном двигателе в начальной стадии разряда // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 3. С. 42-49.
100. Antipov A.A., Bogatyu A.V. Simulation of the motion of charged particles in an ablative pulsed plasma thruster at the initial stage of the discharge // Procedia Engineering, Vol. 18. p. 61-68. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.292.
101. Popov G.A., Antropov N.N. Development of Next Generation APPT at RIAME // 30th International Electric Propulsion Conference. Florence. Italy. 2007.
102. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Кожевников В.А., Ходненко В.П. Космический комплекс «Ионозонд» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2019. т.170. № 3. С.40-48.