

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

На правах рукописи

Нечаев Иван Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ АБЛЯЦИОННОГО  
ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

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 – 2018

## Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Современное состояние исследований и разработок АИПД.....	12
1.1 Развитие разработок импульсных плазменных двигателей. ....	12
1.2 Физические модели рабочих процессов и методы расчета параметров АИПД.....	23
1.3 Рабочие характеристики современных АИПД.....	33
Глава 2. Анализ тенденций развития и разработок АИПД.....	37
2.1 Структура массы АИПД и возможности улучшения массогабаритных характеристик .....	37
2.2 Методы повышения удельного импульса тяги .....	53
Глава 3. Исследование характеристик одноступенчатых АИПД с асимметричным исполнением разрядного канала.....	55
3.1 Экспериментальный стенд .....	55
3.2 Оценка погрешностей и достоверности экспериментальных результатов.....	59
3.3 Базовый вариант двигателя. ....	62
3.4 Экспериментальное исследование АИПД с асимметричным разрядным каналом .....	63
3.5 Фотодиагностика АИПД с асимметричным разрядным каналом.....	71
Глава 4. Экспериментальное исследование моделей АИПД с модернизированными токопроводами.....	80
4.1 Экспериментальное исследование АИПД с двойным обратным токопроводом.....	80
4.2 Расчётный анализ процессов, происходящих в АИПД с двойным обратным токопроводом.....	88

4.3 Результаты экспериментального исследования лабораторной модели АИПД с двойным обратным токопроводом.....	94
4.4 Магнитозондовые измерения.....	98
4.5 Схемы двухступенчатых АИПД.....	142
4.6 Базовый вариант лабораторного образца двухступенчатого АИПД. ....	147
4.7 Результаты экспериментов с двухступенчатыми моделями АИПД.....	149
Заключение. ....	155
Список сокращений и условных обозначений.....	157
Список использованных источников .....	159

# Введение

## Актуальность избранной темы

В настоящее время электроракетные двигатели (ЭРД) в основном применяются как исполнительные органы системы управления движением космических аппаратов (КА). Наиболее широко ЭРД используются в качестве двигателей коррекции в составе геостационарных КА и низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В случае российских КА ДЗЗ – это ЭРД типа СПД-50 (проект «Канопус-В»)[1]. В последние годы ЭРД также начали использоваться как маршевые двигатели для довыведения КА на геостационарную орбиту (ГСО). Это позволяет увеличить массу спутника на ГСО в 1,5 – 2 раза по сравнению с массой спутника, выведенного на орбиту по классической схеме. ЭРД также с успехом используются и в проектах по достижению удаленных объектов в дальнем космосе, например, на американском КА DS-1, японском КА Hayabusa и других.

Рост практического интереса к малым космическим аппаратам (МКА) массой от нескольких до сотен килограмм также обуславливает расширение сферы использования ЭРД. Характерной чертой этих аппаратов является их малоразмерность. Вследствие уменьшения размеров теоретически открываются более обширные возможности для запуска спутников. КА, имеющие небольшие геометрические размеры, относительно малые массы, можно запускать группой одним ракетой-носителем или в качестве попутного груза при запуске других грузов, а также применять для выведения на орбиты иные, более лёгкие (а значит более дешёвые ракеты-носители) [2].

Использование МКА особенно актуально из-за стремления снизить стоимость жизненного цикла спутников для различных космических миссий путём совершенствования технологических решений, а, следовательно, уменьшения массы и размеров этих аппаратов. Применение современных технологий, материалов и конструктивных решений позволяет существенно уменьшить габариты электронной аппаратуры спутников, снизить

потребляемую мощность и уменьшить суммарную массу КА. Это дает основание для реализации ряда космических программ за счет применения МКА нового поколения[3]. Некоторые задачи, выполняемые МКА, требуют коррекции орбиты и положения аппарата в космическом пространстве и, следовательно, наличия в составе МКА двигательной установки. ЭРД, благодаря свойственному им высокому удельному импульсу тяги, позволяют, при ограниченной массе МКА, обеспечить аппарату необходимую характеристическую скорость.

Одной из существующих разновидностей ЭРД являются импульсные плазменные двигатели (ИПД) с твердым диэлектрическим рабочим телом – абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД). Их отличительная особенность – достаточно точная величина единичного импульса тяги (ЕИТ) и отсутствие зависимости характеристик от потребляемой мощности при заданной величине энергии в единичном разряде. Поэтому АИПД в основном рассматриваются для использования в составе двигательных установок (ДУ) малых космических аппаратов (МКА) с низкой мощностью бортовой энергетики (200 Вт и менее) для решения задач коррекции, ориентации, изменения орбиты и увода отработавших КА с орбиты[4].

АИПД является простым по конструкции и принципу действия. Он состоит из блока разрядного канала, ёмкостного накопителя энергии, системы хранения и подачи твёрдого рабочего тела, системы питания и управления, блока инициирования разряда, подводящих электрических шин. Работы по созданию АИПД различной размерности в настоящее время ведутся в России в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Работы были начаты на специализированной кафедре МАИ с 1960 года, а затем продолжены в НИИ ПМЭ МАИ. В результате был разработан один из лучших вариантов подобного двигателя (с удельным импульсом тяги от 12 км/с до 18

км/с), в частности модель АИПД-45-2, предназначенный для малого космического аппарата научного назначения МКА-ФКИ-ПН2 и прошедший полный цикл наземных испытаний. В данной работе эта модель принята за эталонную (базовую) и все полученные результаты работы с новыми схемами АИПД с нею сравниваются. Также работы над АИПД и их применением ведутся в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (ранее – Институт атомной энергии им. М.В. Курчатова), Научно–производственной корпорации «Космические системы мониторинга, информационно–управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна (АО Корпорация «ВНИИЭМ»), Акционерном обществе «Научно–исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ»), ранее велись в ФГУП ОКБ «Факел», ФГУП ЦНИИМаш и во многих организациях нашей страны. За рубежом основные центры по исследованию и созданию импульсных двигателей сосредоточены в США, ФРГ, Японии и Китае. При этом из всего спектра направлений исследований АИПД, задача улучшения его характеристик, включая увеличение удельного импульса тяги, при ограниченной потребляемой мощности, является одной из приоритетных [5].

### **Цель работы**

Разработка новых перспективных схем АИПД с повышенным значением удельного импульса тяги и снижение массы конструкции двигательной установки.

### **Задачи исследования**

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

1. Проведён анализ тенденций развития АИПД и способов улучшения его характеристик.
2. Разработаны, исследованы и созданы лабораторные образцы АИПД различных схем и конструкций с улучшенными характеристиками.

3. Проведён расчётный анализ влияния конфигурации разрядной цепи на процесс ускорения в АИПД.

### **Научная новизна**

1. Предложена новая схема АИПД с асимметричным разрядным каналом, имеющая более высокий удельный импульс тяги по сравнению с базовой моделью при фиксированных параметрах накопителя энергии и аналогичных размерах разрядного канала.

2. Предложена новая схема АИПД с двойным обратным токоподводом, имеющим более высокую среднемассовую скорость истечения плазмы по сравнению с базовой моделью.

3. Предложена новая схема двухступенчатого АИПД с одним общим электродом для двух ступеней. На этой модели был получен удельный импульс тяги практически в два раза больший, чем на базовой линейке моделей АИПД в том же диапазоне энергий.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработаны схемы АИПД с асимметричным разрядным каналом, двойным обратным токоподводом и двухступенчатая схема ускорения, позволившие увеличить удельный импульс тяги двигателя. Экспериментальное исследование влияния конфигурации разрядной цепи модели с двойным обратным токоподводом на процесс ускорения в АИПД позволило подтвердить теоретические оценки, полученные расчётным анализом модели с двойным обратным токоподводом. Проведённые исследования позволили увеличить удельный импульс тяги двигателя при асимметричной и схеме с двойным обратным токоподводом – до 15%, а в случае использования двухступенчатой схемы практически вдвое по сравнению с базовой моделью. Результаты, полученные на двухступенчатом образце АИПД, свидетельствуют о том, что двухступенчатая схема ускорения плазмы является перспективной с точки зрения получения высоких среднемассовых скоростей истечения (до 20 км/с и

выше). Даны рекомендации, связанные с уменьшением массы двигательной установки на базе АИПД.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при создании перспективных образцов АИПД.

На разрядный канал с двойным обратным токоподводом [6] и двухступенчатый разрядный канал были получены патентные свидетельства.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

В диссертации применялась совокупность экспериментальных и расчетных методов: экспериментальный метод определения характеристик АИПД, экспериментальный метод определения разрядного тока и магнитного поля в разрядном канале, расчетный метод моделирования разрядного тока и определения среднемассовой скорости истечения в электродинамическом приближении, метод определения угла отклонения струи плазмы при помощи фотофиксации скачка уплотнения плазмы на сверхзвуковом клине из токонепроводящих материалов, метод визуализации развития разряда при помощи фиксации его высокоскоростным фоторегистратором.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования двухступенчатого АИПД новой схемы с одним общим электродом разрядного канала.
2. Результаты исследований АИПД новой схемы с асимметричным разрядным каналом.
3. Результаты исследований АИПД новой схемы с двойным обратным токоподводом, имеющим повышенное значение электромагнитной составляющей тяги.
4. Результаты экспериментальных исследований тягово-энергетических характеристик вышеперечисленных образцов АИПД.
5. Экспериментально подтверждено, что за счёт изменения распределения величины магнитной индукции по длине разрядного канала в

модели АИПД с двойным обратным токоподводом увеличивается значение среднемассовой скорости истечения плазмы.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, научных положений и сделанных выводов подтверждается выбором существующих методик измерений, соответствием измеренных характеристик и величины разрядного тока расчётным значениям, а также непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов.

### **Апробация результатов**

Основные результаты работы обсуждались на семинарах, а также докладывались на российских и международных конференциях: 1) 9-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010» (Москва, Россия, 16-18 ноября 2010 года); 2) 37-я международная молодёжная конференция «37 Гагаринские чтения» (Москва, Россия, 2010 год); 3) 10-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011» (Москва, Россия, 8-10 ноября 2011 года); 4) XXXV академические чтения по космонавтике им. академика С. П. Королёва. (Москва, Россия, 2011 год); 5) XXXVI академические чтения по космонавтике им. академика С.П. Королёва. (Москва, Россия, 2012 год); 6) 11-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012» (Москва, Россия, 13-15 ноября 2011 года); 7) Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике». (Москва, Россия, 2012 год); 8) Первая молодёжная конференция «Инновационная деятельность в науке и технике». (Москва, Россия, 2012 год); 9) XXXVII академические чтения по космонавтике им. академика С.П. Королёва. (Москва, Россия, 2013 год).

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях, получено 2 патента на изобретение.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. 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.

2. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Марьяшин А.Ю., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Халапян К.Г. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электро-механики» 2013. т. 133, №2. С.19-26.

3. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорения рабочего тела // Труды МАИ. Выпуск №52.

URL: [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

4. Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Семенихин С.А. Экспериментальные методы повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды МАИ. Выпуск №93.

URL: [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

5. Патент на изобретение - № 2542354 РФ. Эрозионный импульсный плазменный двигатель/ Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Заяв.: № 2013143895/07, 01.10.2013. Оpubл.: 20.02.2015 Бюл. № 5.

6. Патент на изобретение - № 2664892 РФ. Абляционный импульсный плазменный двигатель/ Дьяконов Г.А., Лебедев В.Л., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Семенихин С.А., Заяв.: № 2017142943, 08.12.2017. Оpubл.: 23.08.2018 Бюл. № 24.

### **Объём и структура работы**

Работа представляет собой рукопись объёмом 166 страниц печатного текста, включая 124 рисунка, 12 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 69 наименований. Она включает в себя введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список использованных источников.

**Первая глава** диссертации посвящена современному состоянию исследований и создания абляционных импульсных плазменных двигателей. В главе проводится обзор литературы по интересующим вопросам, начиная от появления АИПД, и истории их развития. Уделено внимание рабочим процессам, происходящим в двигателе, расчетам параметров современных АИПД.

Во **второй главе** проводится анализ тенденций развития АИПД. Приведена структура массы АИПД на примере конкретных конструкций, оценены возможности улучшения массогабаритных характеристик. Рассматриваются способы повышения удельного импульса тяги АИПД современных конструкций, КПД.

**Третья глава** посвящена исследованию характеристик АИПД с асимметричным исполнением разрядного канала. Дано описание лабораторного стенда и экспериментального оборудования. Осуществлена оценка погрешности и достоверности полученных экспериментальных результатов. Получены тяговые и расходные характеристики базового и модернизированного вариантов двигателя, а также фотодиагностика АИПД с асимметричным разрядным каналом.

В **четвёртой главе** представлены результаты экспериментального исследования АИПД с двойным обратным токоподводом. Выполнен расчётный анализ процессов, происходящих в АИПД данного типа. Проведена магнитозондовая диагностика. Показан положительный эффект применения двойного обратного токоподвода. Представлены результаты экспериментального исследования лабораторной модели АИПД двухступенчатой схемы, как перспективного направления развития АИПД. Предложены различные конструкции двухступенчатого двигателя.

## Глава 1. Современное состояние исследований и разработок АИПД

### 1.1 Развитие разработок импульсных плазменных двигателей.

Идея применять электрическую энергию для получения реактивной тяги обсуждалась ещё К.Э. Циолковским и другими пионерами космонавтики [7-10]. В 1916-1917 гг. Р. Годдард подтвердил опытами возможность реализации этой идеи. В 1929-1933 гг. В.П. Глушко создал экспериментальный электротермический ракетный двигатель (РД). Затем в связи с отсутствием средств доставки КА с ЭРД в космос и проблематичностью создания источников электропитания с приемлемыми параметрами разработки ЭРД были прекращены. Они возобновились в конце 50-х — начале 60-х гг. и были стимулированы успехами космонавтики и физики высокотемпературной плазмы (развитой в значительной степени в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза). К началу 80-х гг. в СССР и США было испытано около 50 различных конструкций ЭРД в составе КА и высотных атмосферных зондов. В 1964 г. впервые испытаны в полёте электромагнитные (СССР) и электростатические (США) ЭРД, в 1965 г. - электротермические РД (США) [11]. ЭРД использовались для управления положением и коррекций орбит КА, для перевода КА на другие орбиты. Значительные успехи в создании ЭРД, достигнутые при их исследовании, показали целесообразность применения ЭРД в реактивных системах управления движением КА, рассчитанных на длительную работу (несколько лет), а также в качестве маршевых двигателей КА, совершающих сложные околоземные орбитальные переходы и межпланетные перелёты. Использование для указанных целей ЭРД вместо химических РД позволяет, за счет существенно большего значения удельного импульса тяги, увеличить относительную массу полезного груза КА, а в некоторых случаях сократить сроки полёта или сэкономить средства для доставки космического аппарата в рабочее положение в космосе.

В России разработкой и исследованием двигательных установок с ЭРД, а также их применением занимались и продолжают заниматься ведущие

предприятия и ВУЗы: НИЦ «Курчатовский институт», ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша, ФГУП ЦНИИМаш, ОКБ «Факел», АО «КБХА», АО «ИСС», КБ «Арсенал», РКК «Энергия», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», «НИИЭМ», КБХА, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, МИРЭА и другие. За рубежом основные центры по исследованию и созданию ЭРД сосредоточены в США, ФРГ, Франции, Великобритания, Японии, Китае, Италии, Украине, Израиле и ряде других стран.

Поскольку исследованием и развитием ЭРД занималось большое количество разнообразных конструкторских и научных школ, это привело к появлению различных видов двигателей разной степени проработанности, которые можно объединить в следующие группы:

- электротермические двигатели (ЭТД), включая электронагревные (ЭНД) и электродуговые (ЭДД);
- холловские ЭРД, включая стационарные плазменные двигатели (СПД) и двигатели с анодным слоем (ДАС);
- ионные двигатели (ИД) с различными механизмами ионизации;
- магнитоплазодинамические двигатели (МПД), включая двигатели с собственным и внешним магнитным полем;
- импульсные плазменные двигатели, включая ИПД с электротермическим, электромагнитным и смешанным механизмами ускорения плазмы.

В данной работе последней группе будет уделено основное внимание ИПД с электромагнитным и смешанным ускорением плазмы – это такие двигатели, которые создают плазму за счёт высоковольтного разряда, ионизируя твёрдое, жидкое или газообразное вещество и ускоряя его в собственном магнитном поле разряда. Эти двигатели могут работать совместно с источниками энергии низкого уровня мощности (от единиц до  $\approx 200$  Вт), обеспечивая в импульсе пиковую мощность  $10^9$  Вт при токе в разрядном контуре до  $\sim 10^6$  А.

Одной из разновидностей ИПД, получившей наибольшее распространение, является абляционный импульсный плазменный двигатель, в котором плазмообразующим веществом является твердый диэлектрик, чаще всего, фторопласт-4. АИПД заслужил интерес к себе за счёт простоты в реализации и уже упомянутой способности работать при малой потребляемой мощности и потому первым был не только испытан в космосе, но и применён в качестве исполнительного органа системы управления КА.

14 декабря 1964 г. на автоматической межпланетной станции «Зонд-2» в качестве исполнительного органа системы ориентации солнечных батарей КА впервые в мире были применены электрические ракетные двигатели (ЭРД), а именно абляционные импульсные плазменные двигатели с электротермическим ускорением плазмы (рисунок 1), созданные в ИАЭ им. И.В. Курчатова (в настоящее время - НИЦ «Курчатовский институт») [12]. В 1968 г. на борту американского спутника LES-6 успешно работал созданный в США АИПД с электродинамическим ускорением плазмы. В обоих случаях в качестве плазмообразующего вещества применялся фторопласт-4.

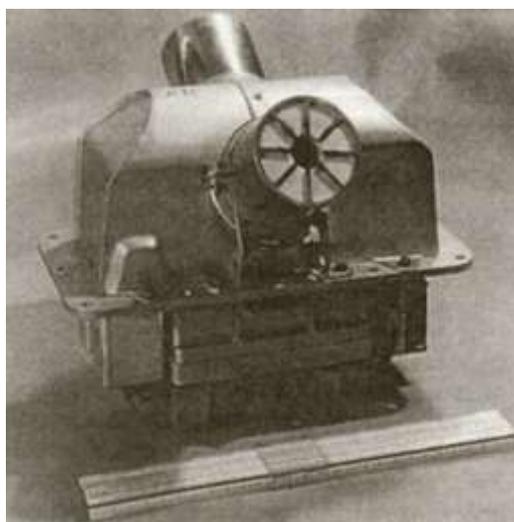
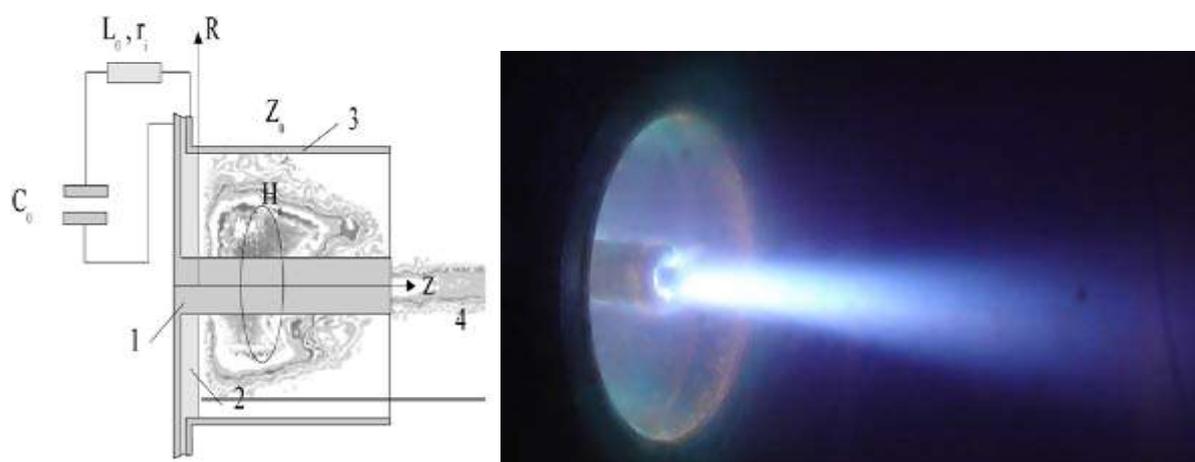


Рисунок 1 – Электрический ракетный двигатель, входящий в систему ориентации АМС "Зонд-2". Испытания двигателя прошли на Земле в 1962 г., в космосе – в декабре 1964 г. [12]

Успешные лётные испытания первых АИПД способствовали дальнейшему развитию работ в этой области.

В НИЦ «Курчатовский Институт» проводились исследования АИПД коаксиальной геометрии с большими энергиями электрического разряда, 100...10000 Дж, и длительностью импульса тока 10...1000 мкс. Схема коаксиального ИПД и фотография разряда приводятся на рисунке 2. Для изучения квазистационарного режима АИПД в широком диапазоне разрядного времени, использовался коаксиальный двигатель с торцевой подачей рабочего тела. Источник энергии для питания двигателя состоял из двух батарей конденсаторов. Время нарастания разрядного тока составляло ~10 мкс. При достижении максимума тока к АИПД подключался второй конденсатор большей емкости. Таким образом, был реализован разряд с большим максимальным током и миллисекундным временем разряда [13]. Было показано, что при этом имеет место устойчивое течение плазмы в течение всего времени импульса.



1- центральный электрод (катод), 2- рабочее тело (тефлон), 3- внешний электрод, 4- поток плазмы, C - ёмкость, L – индуктивность, r – сопротивление электрической цепи источника питания

Рисунок 2 – Схема коаксиального ИПД и фотография разряда[13]

Результаты экспериментов по определению характеристик АИПД высокой мощности приведены в таблице 1. Для всех режимов работы АИПД эффективность передачи мощности из источника к АИПД относительно

высока. В самом начале электрического разряда в ускорительном канале нет никакой осевой симметрии, затем разряд становится симметричным. Динамика плазменного потока и интегральные параметры АИПД высокой мощности описываются в рамках двумерной нестационарной численной модели [14].

Таблица 1 – Характеристики АИПД коаксиальной схемы, разработанного в НИЦ «Курчатовский Институт»[13]

$V_0$ , кВ	$W_{\text{бат}}$ , Дж	Тепловая эффективность	$P_{\text{бит}}$ , мНс	$I_{\text{сп}}$ , с	Расход массы, мг
2	182	0.84	4	3600	0.11
2.5	284	0.83	7.3	3100	0.24
3	410	0.88	11.7	2800	0.41
4	728	0.87	21.8	2800	0.79
4,5	921	0.81	26.4	2700	0.99
10	6000	0.7	100	5000	2.2

где:

$V_0$  – напряжение;

$W_{\text{бат}}$  – энергия батареи;

$P_{\text{бит}}$  – единичный импульс тяги;

$I_{\text{сп}}$  – среднемассовая скорость.

Одна из последних разработок АИПД в США была использована в составе ЭРДУ спутника ДЗЗ Earth Observer 1 (ЕО-1) [15,16]. Внешний вид двигателя приведен на рисунке 3. Двигательная установка ЕО-1 имеет следующие характеристики:

- потребляемая мощность – 60 Вт;
- средняя тяга – 0,86 мН;
- удельный импульс тяги– 10,4 км/с;
- ресурс по числу импульсов–  $5,3 \cdot 10^5$  импульсов;
- суммарный импульс тяги –0,46 кН·с;
- масса – 4,95 кг;

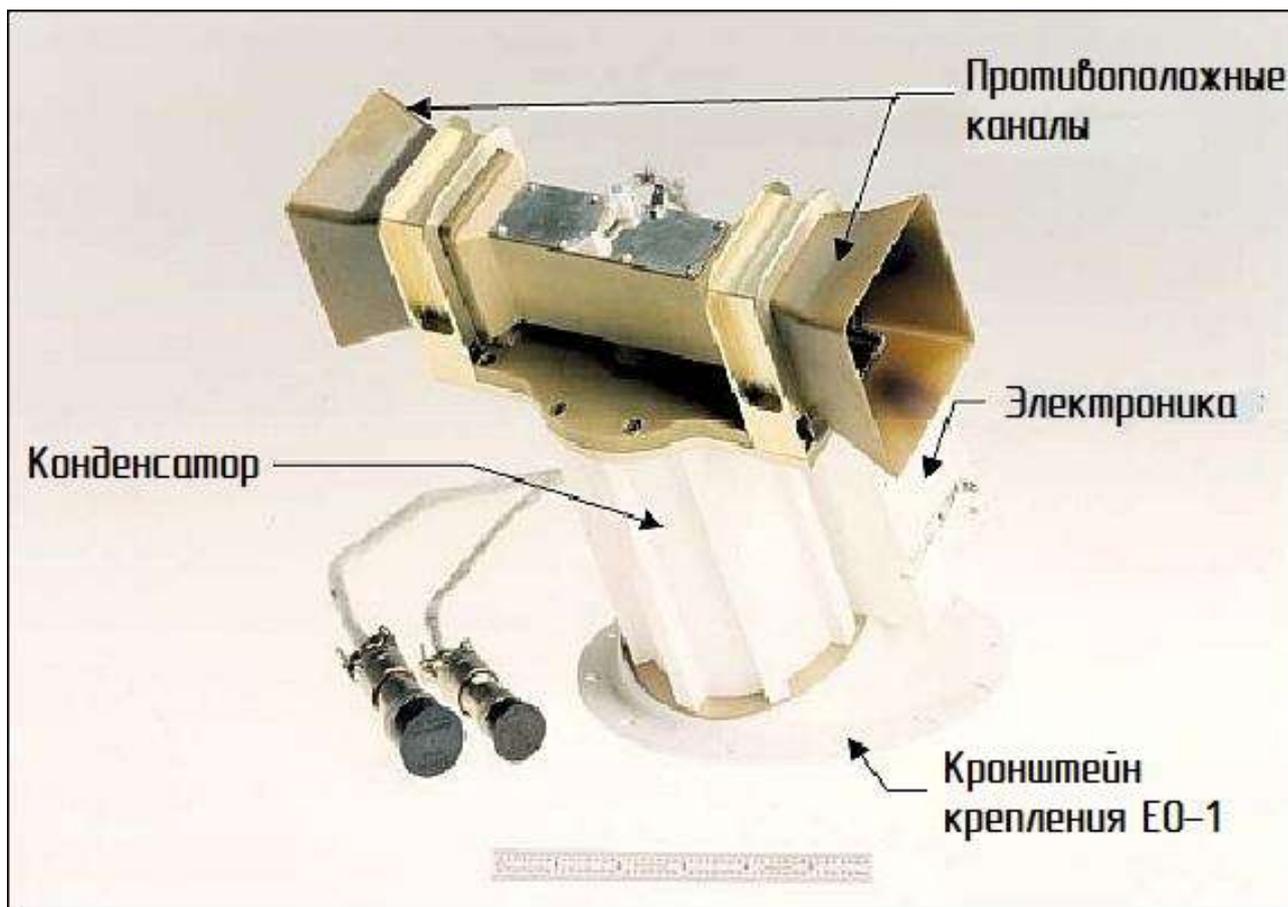


Рисунок 3 –ЭРДУ Earth Observer 1 (EO-1) [16]

Аппарат EO-1 был запущен 21 ноября 2000 г., начал своё активное функционирование с 4 января 2002 г., действовал до 30 марта 2017 г. Двигатель имел рельсовую геометрию с торцевой подачей рабочего тела и, исходя из его низкого суммарного импульса тяги, не мог претендовать на роль двигателя коррекции орбиты КА. Использование торцевой подачи рабочего тела, как при рельсовой геометрии разрядного канала, так и при коаксиальной, не позволяет разработать АИПД с высокими значениями суммарного импульса тяги в условиях ограниченных габаритных размеров двигателя.

Импульсные плазменные двигатели использовались и в качестве инжекторов плазмы при активном зондировании ионосферы Земли [17].

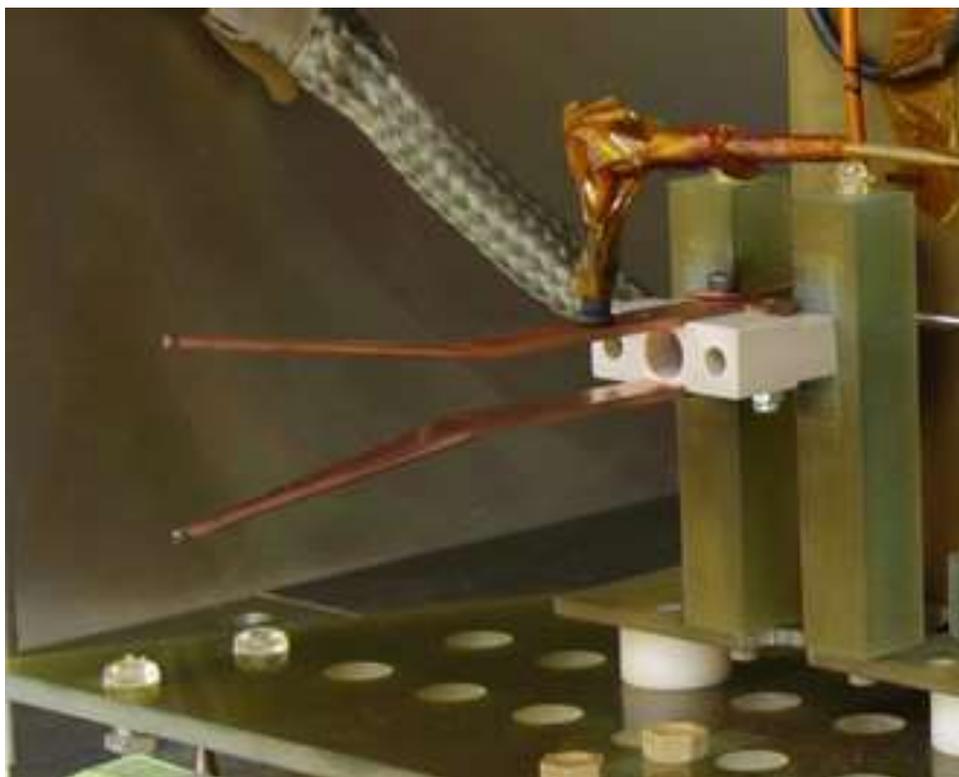


Рисунок 4 – Один из вариантов лабораторной модели с керамическими изоляторами, плоскими шинами и системой подачи газа в межэлектродное пространство, разработанный в Японии [18]

Также активные работы по созданию импульсных плазменных двигателей ведутся в технологическом университете в Токио, один из вариантов созданных разрядных каналов представлен на рисунке 4. Прорабатываются различные конструкции разрядных каналов [18]. Некоторые результаты этих работ были опубликованы на конференции в Севилье в мае 2018 года. На моделях отрабатываются тягово-энергетические характеристики в зависимости от расхода газа и давления, подаваемого в разрядный канал.

Активные работы по созданию многоступенчатых схем ведутся в Китае. Так в 2017 году на конференции в Атланте были представлены доклады по этим работам [19]. Внешний вид работающей модели представлен на рисунке 5. На подобных моделях максимальная среднемассовая скорость плазмы имела величину 21,9 км/с.

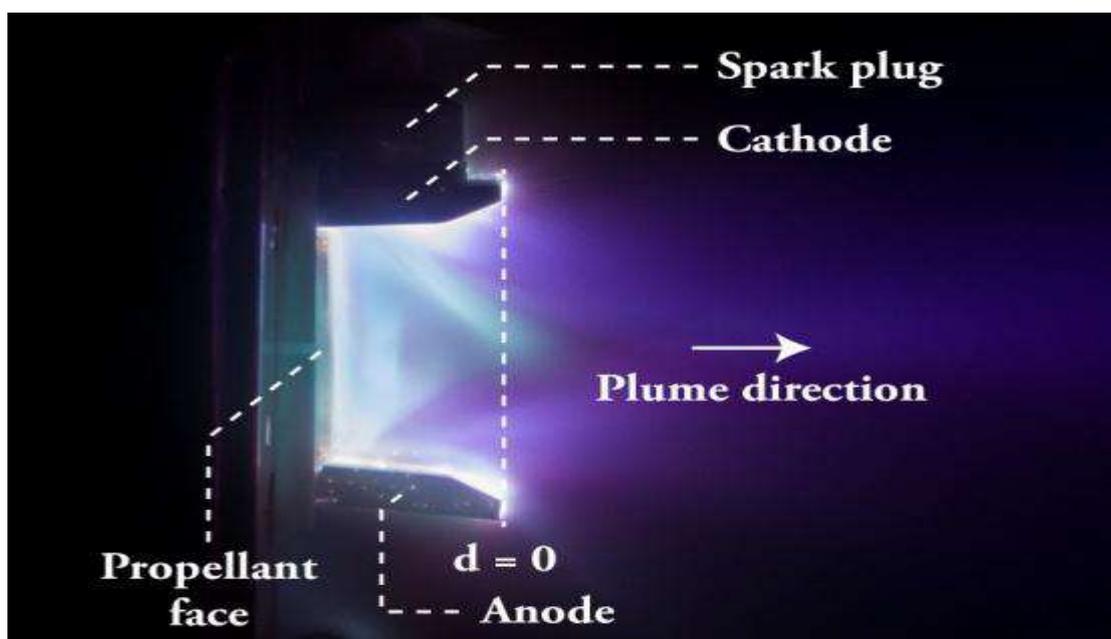


Рисунок 5 – Разработанная в Китае трёхступенчатая модель ИПД в работе [19]

В России в настоящее время активные работы по исследованию и разработке АИПД ведутся в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (НИИ ПМЭМАИ). Здесь в 2006 г. был создан опытный образец корректирующей двигательной установки (КДУ) «АИПД-50» предполагаемый к использованию на универсальной космической платформе "Вулкан"[20]. Его внешний вид изображен на рисунке 6. АИПД-50 имеет следующие характеристики:

- номинальная потребляемая мощность при частоте 2 Гц – 100 Вт;
- тяга при частоте 2 Гц – 3 мН;
- максимальная частота импульсов – 2 Гц;
- тяговая эффективность – 0,25;
- суммарный импульс – 30 кН·с;
- удельный импульс – 16,7 км/с;
- ресурс по числу включений –  $10^7$ ;
- масса (с запасом рабочего тела 1,8 кг) – 8 кг.

Позднее был разработан и изготовлен летный образец ЭРДУ АИПД-45-2 для малого космического аппарата МКА-ФКИ ПН2 НПО им. С.А. Лавочкина, показанный на рисунке 7. В июле 2014 г. ЭРДУ АИПД-45-2 была выведена в

составе МКА-ФКИ ПН2 на околоземную орбиту. К сожалению, лётные испытания АИПД-45-2 провести не удалось из-за преждевременного выхода из строя аппарата МКА-ФКИ-ПН2, но наземные испытания прошли в полном объёме. Тогда же была разработана ЭРДУ большей мощности АИПД-155 для микроспутника «Союз-Сат-О» НИИ КС им. А.А. Максимова и ПО «Полёт». Совместно с АО «НИИЭМ» разработан опытный образец КДУ АИПД-95, предназначенной для МКА «Ионосфера» [21]. В 2015-2017 гг. совместно с АНО «НТИЦ «ТЕХКОМ» разрабатывалась электроракетная двигательная установка ЭРДУ АИПД-250 нового поколения, предназначенная для поддержания орбиты системы коммуникационных малых космических аппаратов.

Появление МКА с массой от десятков до сотен килограмм, перспектива развития наноспутников с размерами  $10 \times 10 \times 10$  см и менее поставило на повестку дня разработку и создание простых и дешёвых высокоэффективных ионных, стационарных и импульсных плазменных двигателей малой мощности, способных функционировать и управлять движением космических аппаратов при потребляемой мощности от десятков до сотен Вт и выше [22].

Для этих целей в НИИ ПМЭ МАИ был разработан ряд микро-АИПД малой мощности [23] с энергией разряда от 4 до 20 Дж – АИПД-8 и АИПД-120, последний изображён на рисунке 8.

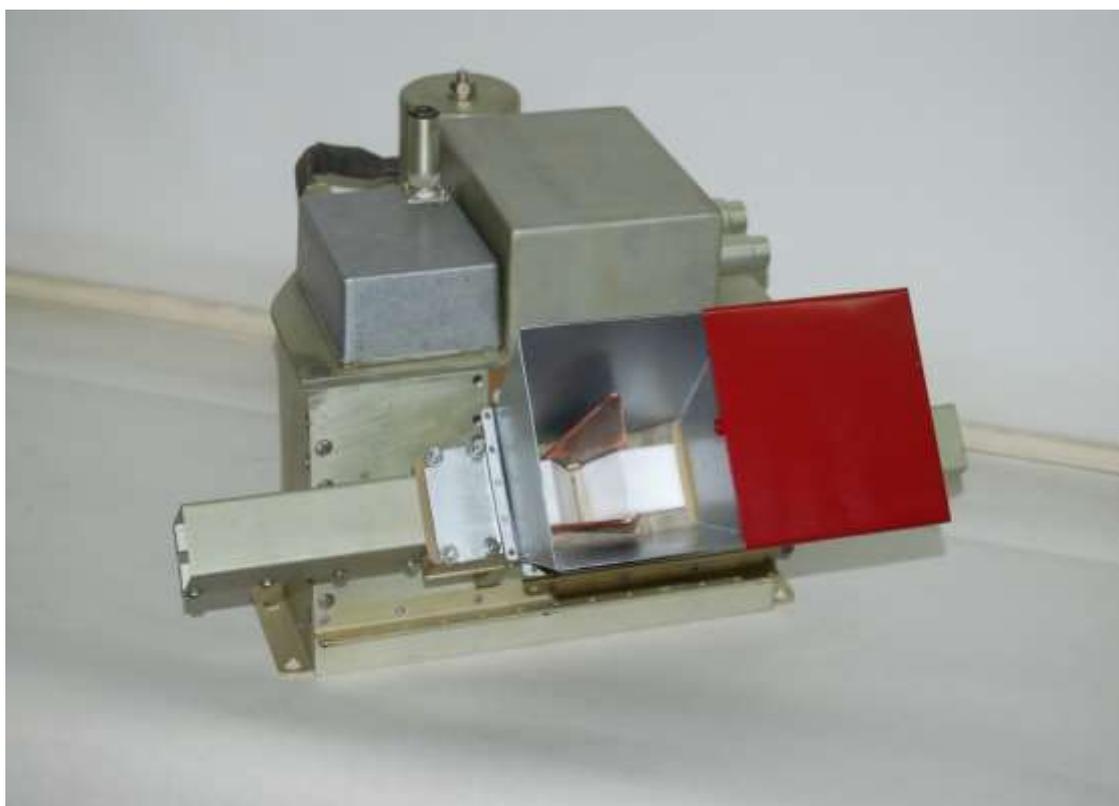


Рисунок. 6 – Абляционный импульсный плазменный двигатель АИПД-50, предназначенный для использования в составе КДУ космической платформы «Вулкан»[20]

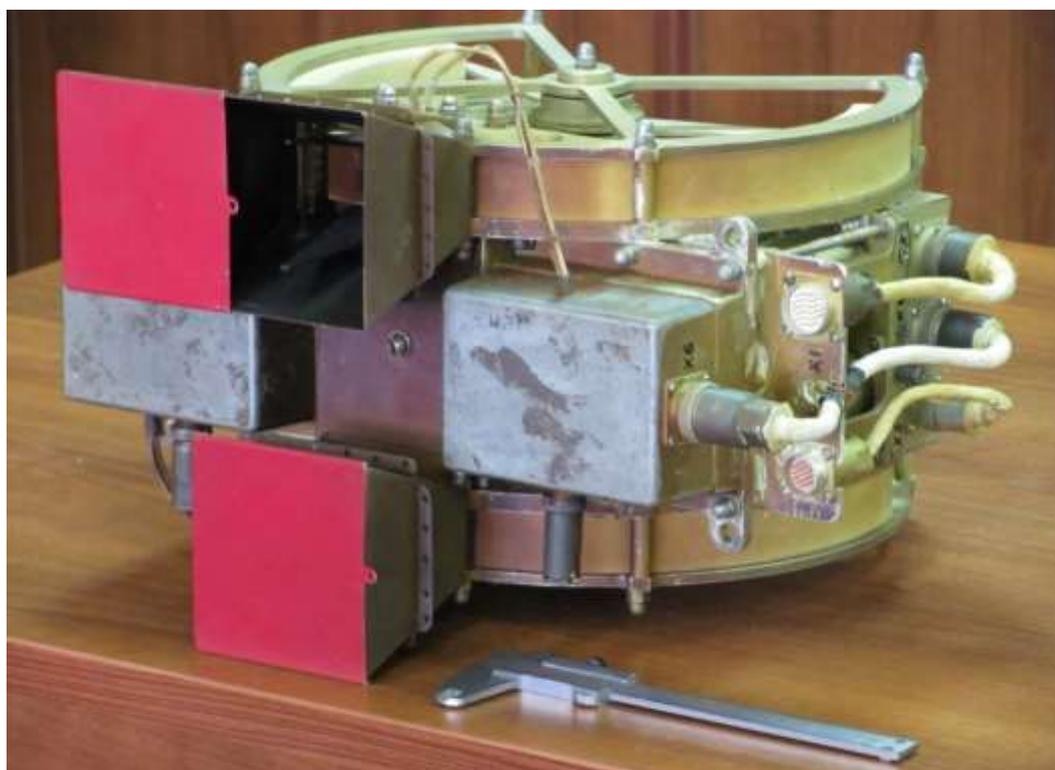


Рисунок 7–Летный образец ЭРДУ АИПД-45-2 для МКА-ФКИ-ПН2

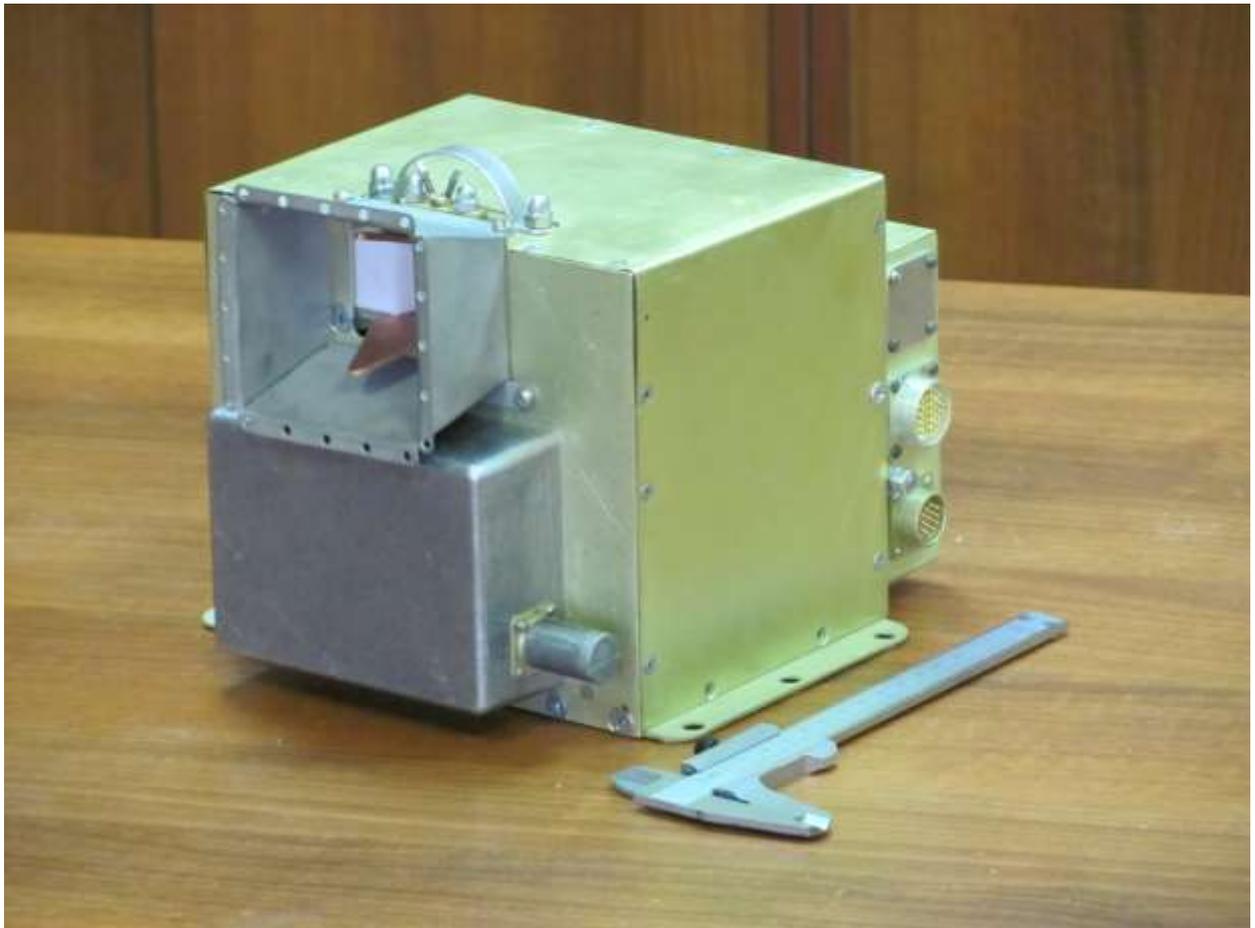


Рисунок 8 – Внешний вид ЭРДУ малой мощности АИПД-120

Применение АИПД относительно большой мощности – более 100 Вт (типа АИПД-155, АИПД-95) имеет под собой рациональную основу только в случае использования их в составе корректирующих двигательных установок на спутниковых платформах массой от 10 до 500 кг.

К оснащённым высокоточной аппаратурой низкоорбитальным КА нового поколения (орбита не выше 300 км) предъявляются более высокие, чем прежде, требования по точности поддержания и стабильности их орбитальных параметров, а также по срокам активного существования. При этом при постоянно растущей плотности полезной нагрузки даже на МКА массой 100 кг трудно ждать выделения на нужды КДУ мощности больше 100 Вт. Это относится и к КА с меньшей массой. Следует также отметить, что имеется целый ряд задач, требующих обеспечения единичного импульса тяги

достаточно малой величины при приемлемых значениях запасаемой массы рабочего тела.

Анализ показал, что с учётом всех вышеприведённых факторов АИПД можно рассматривать как один из лучших вариантов двигателей для КА массой до 100-200 кг в качестве исполнительного органа системы управления движением [24].

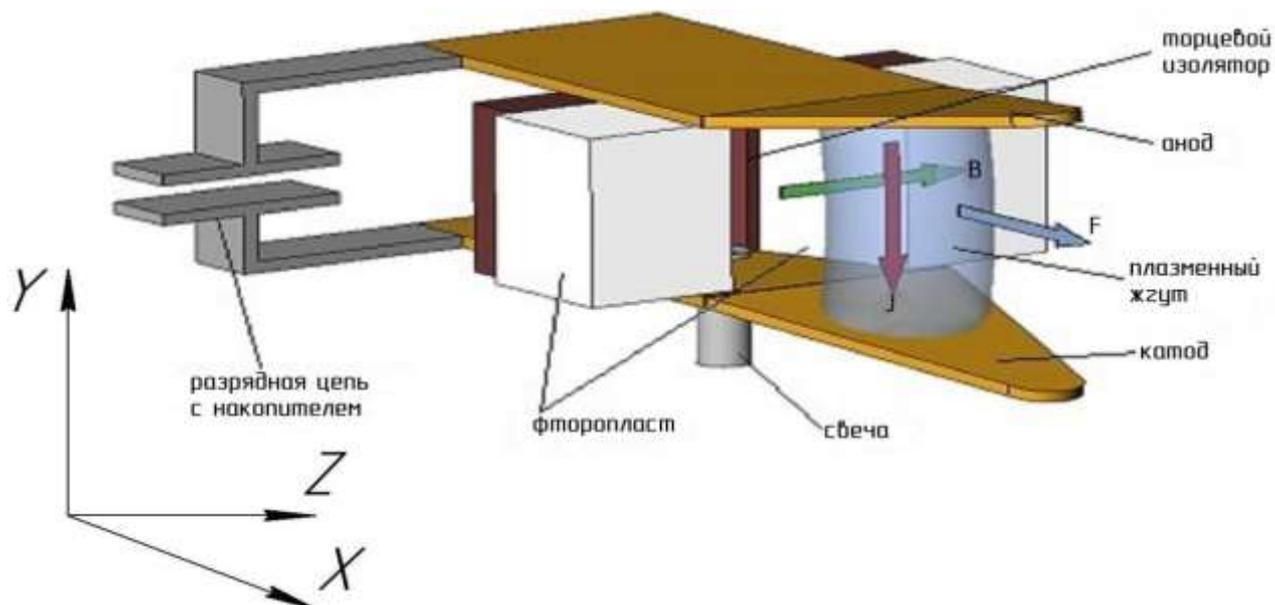
## 1.2 Физические модели рабочих процессов и методы расчета параметров

### АИПД

Принципиальная схема АИПД рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего тела (с целью увеличения его запаса) изображена на рисунке 9. ЭРД состоит из конденсаторной батареи, выполняющей роль накопителя энергии; электродов; торцевого изолятора; фторопластовых шашек рабочего тела (РТ) и свечи, инициирующей разряд. Плоскости электродов, торцевого изолятора и фторопластовых шашек образуют ускорительный (разрядный) канал двигателя (РК). Двигатель работает следующим образом: конденсаторная батарея заряжается от источника энергии, при этом токопроводящие шины электрически связывают её с электродами разрядного канала. Первичный разряд в РК создаётся за счёт специальной свечи. Длительность основного разряда между электродами варьируется от 3 до 15 мкс в зависимости от параметров РК и конденсаторной батареи. Под воздействием электрического тока происходит нагрев и абляция (испарение) тонкого слоя поверхности фторопластовой шашки и ионизация продуктов абляции.

Электрический ток в электродах ускорительного канала приводит к образованию магнитного поля, основная компонента которого  $B_z$  направлена вдоль поперечной оси  $z$ . Эта компонента, взаимодействуя с разрядным током  $j_y$ , создает объемную электромагнитную силу  $f_x = j_y \times B_z$ , направленную вдоль оси потока. Плазма, образовавшаяся при этом, ускоряется электромагнитной силой до скорости  $V = (20...30)$  км/с (скорость первичного пучка плазмы). При

окончании разряда, когда электрический ток уменьшается, более весомыми в ускорении плазмы становятся газодинамические силы с характерной скоростью истечения 3...5 км/с. За счёт такого взаимодействия реализуется смешанный механизм ускорения плазмы: электромагнитный и газодинамический.



$J$  – ток разряда;  $B$  – поперечное собственное магнитное поле;

$F$  – объёмная электромагнитная сила.

Рисунок 9 – Принципиальная схема АИПД рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего вещества (фторопласта)

Основные особенности импульсного ускорения плазмы проявляются уже в простейшем, так называемом «электродинамическом», приближении. В электродинамическом приближении ЭРД (ускоритель) заменяется эквивалентной электрической цепью с подвижным проводником, принципиальная схема которой изображена на рисунке 10. Цепь имеет электрическую емкость  $C$  постоянной величины и сопротивление  $R$ . Индуктивность электрической цепи  $L$  имеет составляющие: постоянную  $L_0$  (начальная индуктивность) и переменную  $\Delta L = b \times x$ , где  $b$  [Гн/м] – погонная индуктивность электродов. Масса  $m$  перемещающегося звена цепи, в реальной модели являющегося плазменным пучком, в первом приближении принимается постоянной, а омическое сопротивление имеет величину, существенно

меньшую индуктивного  $R \ll \omega L$ . Основополагающие закономерности динамики ускорения плазмы в магнитном поле были теоретически и экспериментально исследованы еще в 1957 г. Л.А. Арцимовичем [25].

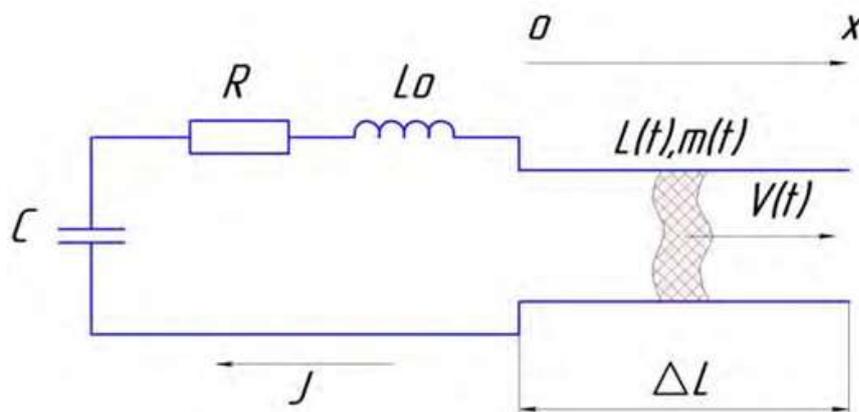


Рисунок 10 – Принципиальная электрическая схема эквивалентной разрядной цепи АИПД

Ускорение подвижного звена в электрической цепи, изображённой на рисунке 11, описывается следующей системой дифференциальных уравнений [26]:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} \cdot J^2 \cdot \frac{dL}{dx} \quad (1.1)$$

$$J = -C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (1.2)$$

$$U = \frac{d(LC)}{dt} \quad (1.3)$$

$$L = L_0 + b \cdot x \quad (1.4)$$

при начальных условиях

$$U(0) = U_0; J(0) = 0; x(0) = 0; \frac{dx}{dt}(0) = 0.$$

где  $J$  – разрядный ток,  $U$  – напряжение,  $t$  – время.

Используя безразмерные переменные  $y = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{b \cdot x}{L_0}$ ;  $\varphi = \frac{U}{U_0}$ ;  $\tau = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C}}$  систему (1.1)...(1.4) можно преобразовать в систему из двух уравнений

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} = q \cdot \left( \frac{d\varphi}{d\tau} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$\varphi = -\frac{d}{d\tau} \left[ (1 + y) \frac{d\varphi}{d\tau} \right] \quad (1.6)$$

При этом начальные условия задаются в виде

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

Решение указанной системы определяется величиной безразмерного параметра  $q$ , носящего название «параметр Арцимовича»

$$q = \frac{b^2 \cdot C^2 \cdot U_0^2}{2 \cdot m \cdot L_0} \quad (1.7)$$

Физический смысл «параметра Арцимовича» заключается в том, что  $q$  является отношением величины объемной электромагнитной силы к величине силы инерции ускоряемого пучка плазмы.

Результаты численного решения уравнений (1.5)- (1.6), взятые из работы [25], представлены на рисунках 11 и 12.

Электродинамический КПД  $\eta$ , показывающий теоретическую эффективность ускорения плазмы в системе уравнений (1)...(4), выражается, если перейти к безразмерным переменным, формулой.

$$\eta = \frac{mV^2}{CU_0^2} = \frac{1}{2q} \left( \frac{dy}{d\tau} \right)^2 \quad (1.8)$$

Зависимость электродинамического КПД от параметра Арцимовича показана на рисунке 13.

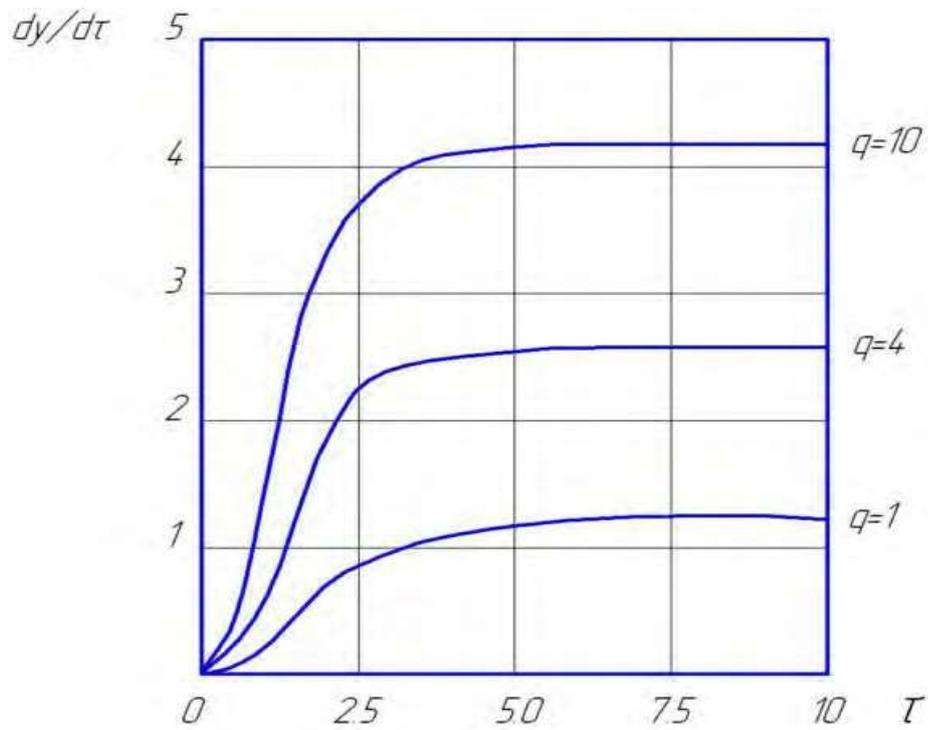


Рисунок 11 – Расчётные зависимости безразмерной скорости  $dy/d\tau$  плазменного сгустка от времени

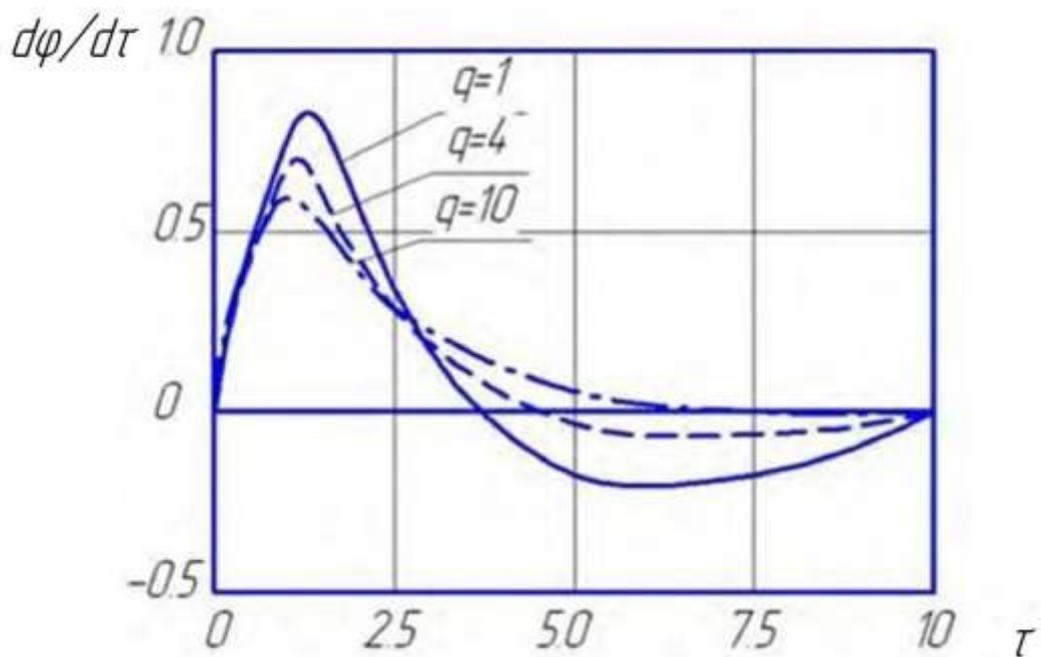


Рисунок 12 – Расчётные осциллограммы безразмерного разрядного тока  $d\phi/d\tau$

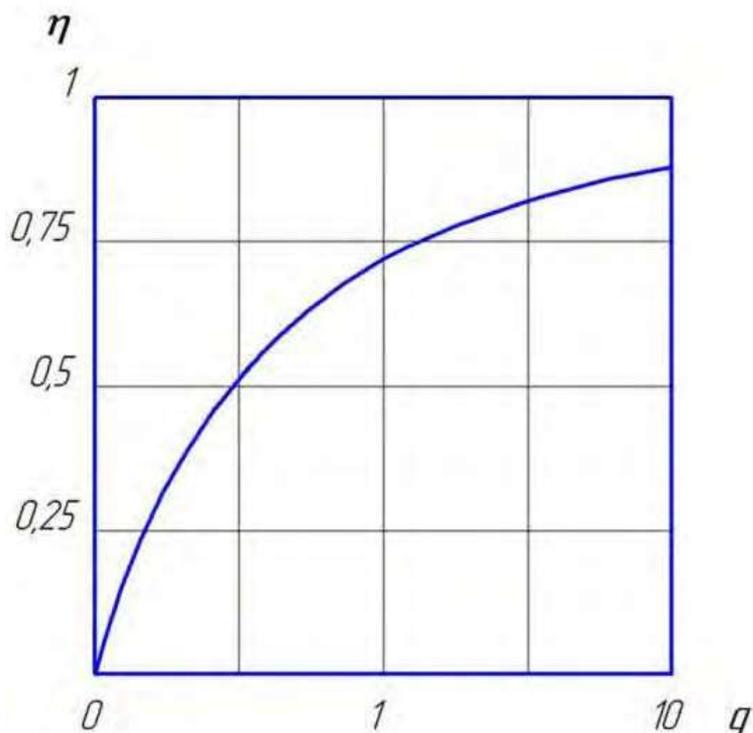


Рисунок 13 – Зависимость электродинамического КПД от параметра  $q$

Из графика, изображённого на рисунке 13, получаем, что электродинамический КПД импульсного плазменного двигателя  $\eta$  зависит от параметра  $q$  и может иметь достаточно большую численную величину. Двигатель, работающий с достаточно высоким электродинамическим КПД, имеет апериодическую или квазипериодическую (с низкой амплитудой второго полупериода) осциллограмму разрядного тока, например, такую, как показано на рисунке 12.

Основным отличием АИПД является то, что разряд в ускорительном канале одновременно выполняет функции дозирования испарённого рабочего тела и разгона (ускорения) плазмы. Экспериментально было показано еще на первом этапе развития абляционных импульсных плазменных двигателей, что интегральный расход РТ за импульс пропорционален энергии разряда  $W$  [26].

$$m \sim k \cdot W = k \cdot \frac{C \cdot U_0^2}{2} \quad (1.9)$$

Здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции двигателя и параметров его работы, в особенности от размеров и геометрии РК,

вида разряда (осциллограммы разрядного тока) и рабочей температуры деталей ускорительного канала. Таким образом, для АИПД параметр Арцимовича [17] выражается следующей формулой

$$q \sim \frac{b^2 \cdot C^2 \cdot U_0^2}{2 \cdot k \cdot \frac{C \cdot U_0^2}{2} \cdot L_0} = \frac{b^2}{k} \cdot \left( \frac{C}{L_0} \right) \quad (1.10)$$

Из этого следует, что электродинамический КПД ИПД зависит от отношения емкости конденсаторной батареи к начальной индуктивности цепи. Определение величины отношения  $C/L_0$ , обеспечивающей высокие удельные характеристики двигателя, требует экспериментальных исследований. Конкретные величины  $C/L_0$  защищены принадлежащим НИИ ПМЭ МАИ патентным свидетельством [27]. В то же время высокий электродинамический КПД является необходимым, но не достаточным условием получения высоких удельных характеристик. Причиной тому является описанная ранее двойная функция разряда в РК – одновременное и самосогласованное дозирование и ускорение испарившегося рабочего тела. На рисунке 14 изображена временная зависимость ввода в разрядный канал мощности (пропорциональна квадрату разрядного тока  $J^2$ ) и массы  $m$  плазмообразующего вещества, полученные в НИИ ПМЭ МАИ при проведении пьезозондовых измерений на одном из лабораторных образцов АИПД [11].

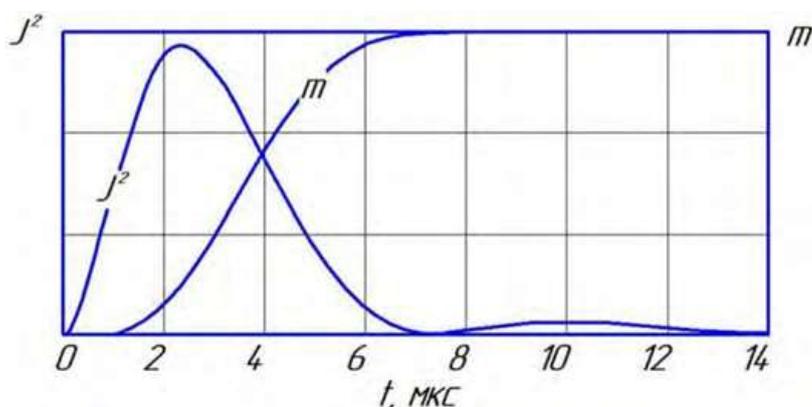


Рисунок 14 – Динамика ввода мощности разряда  $J^2$  и массы  $m$  плазмообразующего вещества в разрядный канал АИПД

Как видно из зависимости  $J^2(t)$ , разряд имеет квазиапероидический вид, что позволяет сделать вывод о принципиальной возможности работы двигателя с высоким электродинамическим КПД. Однако имеет место существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в ускорительный канал. Относительно большая часть массы плазменного пучка поступает в разрядный канал уже при окончании разряда. Эта часть плазменного пучка ускоряется до тепловых скоростей, что значительно понижает удельный импульс и тяговую эффективность двигателя.

Из всего вышеупомянутого можно сделать вывод о том, что новые высокоэффективные АИПД, несмотря на схемную и конструктивную простоту и дешевизну, нуждаются в теоретической и экспериментальной отработке. В зависимости от заданных параметров оптимизации, находится необходимый компромисс между достаточно высоким электродинамическим КПД, согласованием по времени ввода энергии и массы в ускорительный канал и прочими характеристиками АИПД.

Основными интегральными параметрами двигателя, определяемыми на экспериментальном стенде, являются средняя тяга

$$F = p \cdot f \quad (1.11),$$

потребляемая мощность

$$N = W \cdot f \quad (1.12),$$

Расход массы  $m$  за импульс, определяется весовым методом. Здесь  $p$  [Н·с] – единичный импульс тяги;  $f$  [Гц] – частота импульсов,  $W$  [Дж] – энергия в импульсе.

Электроракетный двигатель характеризуют его удельные характеристики:

а) тяговая эффективность (не следует путать тяговую эффективность  $\eta_t$  с тепловым и электродинамическим КПД, последняя, как правило, значительно выше, чем  $\eta_t$ )

$$\eta_t = \frac{p^2}{2 \cdot m \cdot W} \quad (1.13)$$

б) удельный импульс тяги, численно равный среднемассовой скорости истечения плазмы

$$J_{sp} = p/m \quad (1.14)$$

в) цена тяги

$$C_t = N/F \quad (1.15)$$

На ранних этапах исследования АИПД основное внимание уделялось увеличению тяговой эффективности. Было доказано, что в эффективном АИПД нового поколения при энергии, запасаемой в батарее более 100 Дж, величина тяговой эффективности может достигать 25...30% [28].

В то же время не все удельные характеристики ЭРД, указывая на их техническое совершенство, равнозначны для разработки двигательных установок реальных КА. А потому для развития АИПД – на этапе практического применения – необходимо определение основных параметров оптимизации.

Решение поставленных задач электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) определяется, в основном, характеристической скоростью  $V_x$ , которую она сообщает КА массой  $M_{КА}$ . Далее характеристическая скорость определяет суммарный импульс тяги двигательной установки  $P_\Sigma$  (КА считается телом постоянной массы, так как запас рабочего тела ЭРДУ  $M_{РТ}$ , как правило, существенно меньше  $M_{КА}$ ).

$$P_\Sigma = M_{КА} \cdot V_x \quad (1.16)$$

Отсюда получаем, что важнейшим параметром ЭРДУ является суммарный импульс тяги, определяемый удельным импульсом АИПД и запасом рабочего тела

$$P_\Sigma = M_{РТ} \cdot J_{SP} \quad (1.17)$$

Заданный суммарный импульс тяги ЭРДУ получается в равной мере повышением удельного импульса тяги и увеличением запаса рабочего тела. Для увеличения запаса РТ требуется максимально увеличить поперечное сечение шашек рабочего тела, которое оказывается, как правило, выше оптимального для получения максимально высоких удельных характеристик. Поэтому удельные характеристики летных двигателей обычно ниже, чем характеристики их лабораторных прототипов. Это та цена, которую приходится заплатить за максимально высокий суммарный импульс тяги.

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

- массы и геометрических размеров шашек рабочего тела, т.е. от заданного суммарного импульса;
- удельной энергоёмкости применяемых конденсаторов;
- массы и степени резервирования электронных блоков системы питания и управления.

Наиболее важной для практического применения удельной характеристикой ЭРДУ является эффективный удельный импульс тяги  $J_{эфф}$  [ $\text{Н} \times \text{с} / \text{кг} = \text{м} / \text{с}$ ], вычисляющийся как отношению суммарного импульса тяги ЭРДУ к её полной массе, включая запас рабочего тела.

$$J_{эфф} = P_{\Sigma} / M_{ЭРДУ} \quad (1.18)$$

Абсолютная величина тяги, потребляемая мощность и, соответственно, цена тяги играют для ЭРДУ на основе АИПД значительно меньшую роль. В частности, недостаток мощности на борту МКА можно компенсировать понижением частоты импульсов и увеличением времени работы двигателя. Энергия разряда при этом остается той же, соответственно, остаются постоянными и все удельные параметры двигателя. Недостаток тяги также компенсируется увеличением времени работы двигателя.

### 1.3 Рабочие характеристики современных АИПД

Современные АИПД представлены целой линейкой ДУ, которые могут применяться не только как маршевые или корректирующие двигательные установки, но и как источники плазмы для различных экспериментальных исследований.

В НИИ ПМЭ МАИ на основе АИПД создан ряд ЭРДУ для малых космических аппаратов, представленный в таблице 2 [29]. Из них АИПД-45-2, АИПД-155 были доведены до стадии летных образцов. В этой же таблице, для сравнения, приведены характеристики наиболее близкой по потребляемой мощности и выполняемым задачам ЭРДУ на основе стационарного плазменного двигателя СПД-50, установленной на МКА «Канопус-В» [29, 30]. Наиболее важными для практического применения ЭРДУ являются такие ее характеристики как суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma}$ , определяющий характеристическую скорость МКА, потребляемая мощность  $N$  и полная масса ЭРДУ  $M_{\text{ЭРДУ}}$ , включая массу системы питания и управления (СПУ).

Для сравнения ЭРДУ различных типов наиболее показательны их удельные характеристики, такие как:

- цена тяги  $C_T$ , равная отношению средней потребляемой мощности ЭРДУ к ее средней тяге;
- отношение средней тяги ЭРДУ к ее полной массе;
- эффективный удельный импульс тяги  $J_{\text{эфф}}$ , равный отношению суммарного импульса тяги ЭРДУ к ее полной массе.

Таблица 2 – Характеристики ЭРДУ на базе АИПД и СПД-50

Тип ЭРДУ	АИПД-8	АИПД-45-2	АИПД-155	АИПД-95	СПД-50
Энергия разряда, Дж	8	55	88	155	-
Потребляемая мощность, Вт	10...20	75...150	70...140	170	300
Ресурс по запасу рабочего тела, ч	1530	3860	5950	3970	1300
Удельный импульс тяги, м/с	5200	11000	13200	16000	9000
Средняя тяга, мН	0,11...0,22	1,44...2,9	1,4...2,8	3,5	18,0
Суммарный импульс тяги, кН×с	0,6	20	30	50	42
Масса рабочего тела, кг	0,12	1,8	2,4	3,15	5,2
Полная масса ЭРДУ, кг	2,0	10,5	14	20	30
Цена тяги, Вт/мН	91	52	52	49	23
Отношение тяги к массе ЭРДУ, мкН/кг	110	274	200	175	467
Эффективный удельный импульс тяги, м/с	300	1900	2140	2600	1400

Из данных, приведенных в таблице 2, следует, что импульсные плазменные двигатели, уступая стационарным в тяговых показателях, могут иметь меньшие массу и габариты, что численно отражается в более высоком эффективном удельном импульсе тяги. При уменьшении размерности двигательной установки это превосходство растет, так как характеристики стационарных двигателей, в отличие от импульсных, существенно снижаются при уменьшении потребляемой мощности [31]. Однако для повышения конкурентоспособности ЭРДУ на основе АИПД для малых космических аппаратов необходимо дальнейшее улучшение их массогабаритных характеристик.

На рисунке 15 представлена линейка АИПД разработки НИИ ПМЭ МАИ. Видно, что энергия разряда конденсаторной батареи, размерность ЭРДУ однозначно определяется заданным суммарным импульсом тяги.

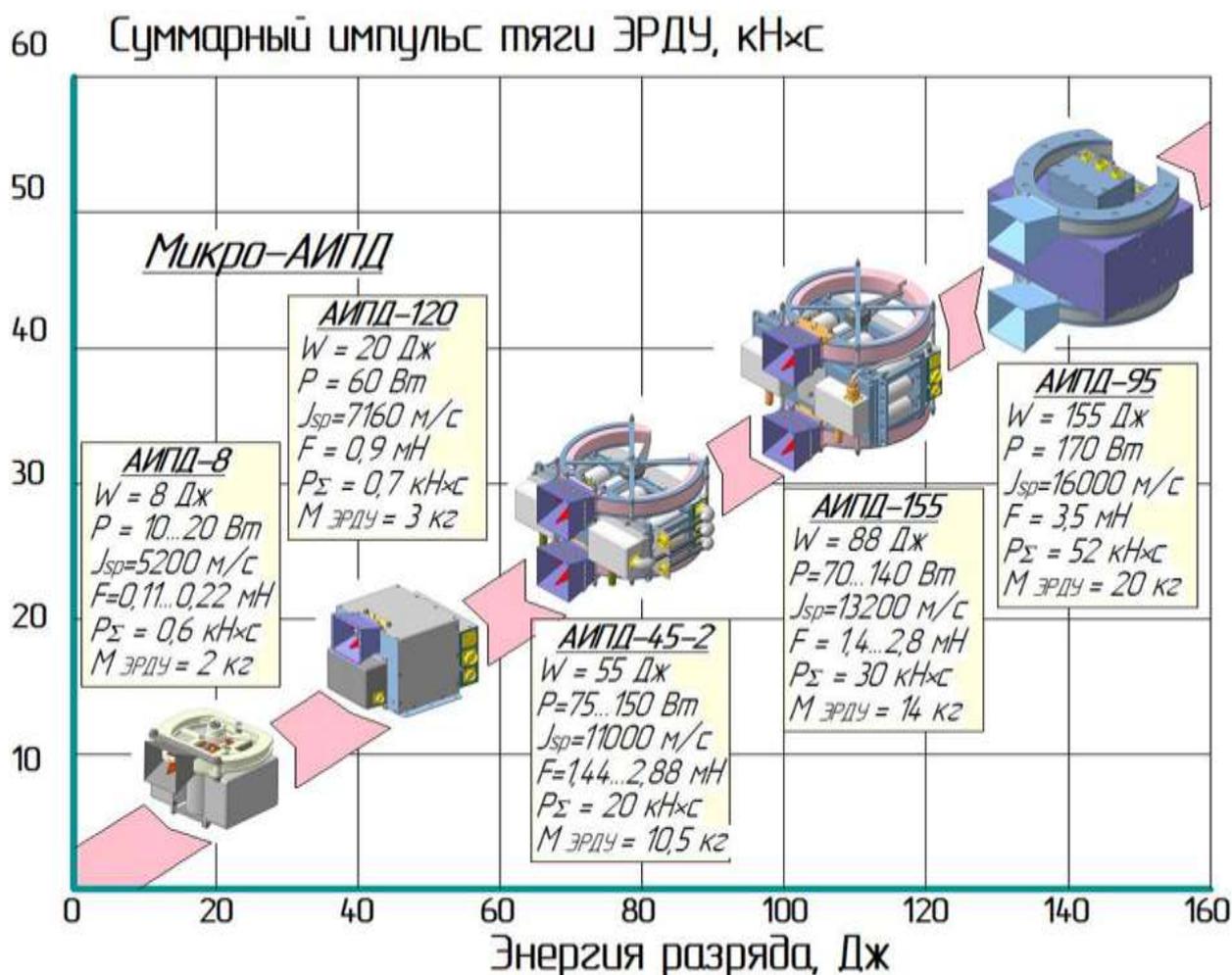


Рисунок 15– Параметры современных АИПД, созданных в НИИ ПМЭ МАИ

В ряде случаев плазменные ускорители на основе АИПД используются как источники низкотемпературной плазмы при решении некоторых прикладных научных задач.

Плазменные двигатели, создаваемые различными отечественными и зарубежными фирмами и институтами, обладают чрезвычайно широким, можно сказать, уникальным диапазоном параметров: температура плазмы – от  $10^4\text{K}$  до  $10^6\text{K}$ ; плотность плазмы – от  $10^{12}$  до  $10^{19}\text{ см}^{-3}$ ; от  $10^2$  до  $10^4\text{ м/с}$ , теплосодержание – от  $10^{-3}$  до  $10^2\text{ Дж/см}^3$ ; тепловой поток – от 10 до  $10^8\text{ Вт/см}^2$ .

Таким образом, в настоящее время разработаны и прошли экспериментальную отработку АИПД и ДУ на их основе в широком диапазоне энергий разряда, с суммарными импульсами тяги, обеспечивающими выполнение целого ряда задач управления движением МКА. Уровень их удельных характеристик повышает конкурентоспособность данного типа двигателей по сравнению с другими ЭРД в условиях ограниченной мощности бортовой энергетики.

## Глава 2. Анализ тенденций развития разработок АИПД

### 2.1 Структура массы АИПД и возможности улучшения массогабаритных характеристик

Современные АИПД представляют собой высокотехнологичное изделие с интегрированными в него новейшими продуктами различных производств, полученными в результате развития науки и техники нового поколения. Разработанные разными производителями различные образцы конденсаторов, электрокомпонентов, материалов и прочих изделий, применяемых при производстве АИПД, представляют достаточно широкий простор для выбора.

В настоящее время в НИИ ПМЭ МАИ ведутся работы по созданию эффективных и при этом более лёгких образцов импульсных плазменных двигателей. На рисунках 16, 17 представлены внешний вид и структурная схема ЭРДУ АИПД-45-2, предназначенной для малого космического аппарата МКА-ФКИ ПН2. [27]. Она рассчитана на суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma} = 20 \text{ кН} \times \text{с}$ , среднюю тягу  $P_{\text{ср}} = 2,9 \text{ мН}$ , потребляемую мощность до  $N = 150 \text{ Вт}$ .

В состав ЭРДУ входят:

- рабочее тело (РТ) и система хранения и подачи рабочего тела (СХПРТ);
- блок накопителя энергии (БНЭ) с одним или несколькими разрядными каналами (РК);
- блок инициирования разряда (БИР);
- блок системы питания и управления (СПУ);
- конструкционные элементы.

При этом с целью повышения надежности ДУ перечисленные элементы могут резервироваться. Двигательная установка выполнена в виде моноблока, поставляемого и устанавливаемого на космический аппарат в сборе. Это позволяет:

- максимально уменьшить массу и габаритные размеры ЭРДУ;
- упростить монтаж и проведение испытаний ЭРДУ;
- исключить из состава ЭРДУ высоковольтные кабели и разъемы.

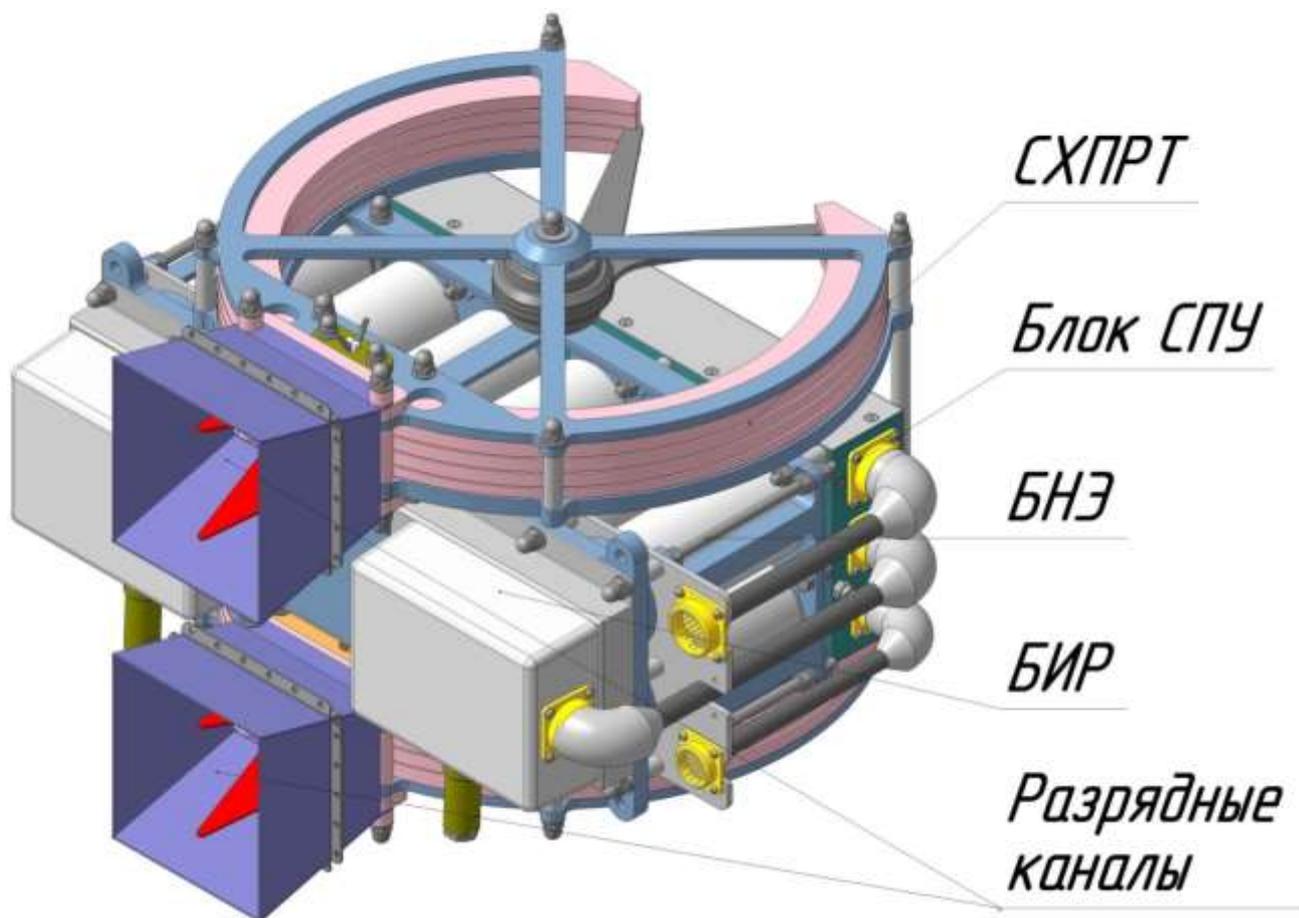


Рисунок 16 – Внешний вид ЭРДУ АИПД-45-2

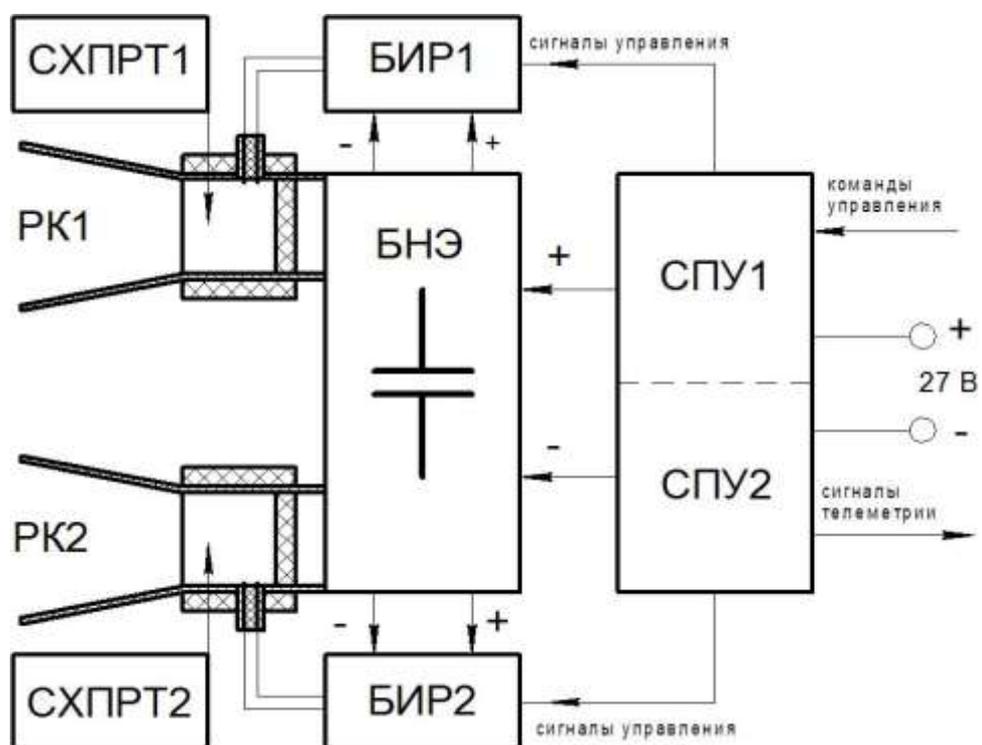


Рисунок 17 – Структурная схема ЭРДУ АИПД-45-2

Опираясь на таблицу 2 и опубликованные данные по ЭРД на базе АИПД, приведём усреднённую структуру массы. Полная масса современного ЭРДУ (на примере лётного образца АИПД-45-2) составляет  $M_{\text{ЭРДУ}} = 10,5$  кг, в том числе:

- масса запаса рабочего тела  $M_{\text{рт}} = 1,8$  кг;
- масса системы хранения и подачи рабочего тела  $M_{\text{СХПРТ}} = 1,8$  кг;
- масса блока накопителя энергии с двумя разрядными каналами  $M_{\text{БНЭ}} = 4,0$  кг;
- масса блоков инициирования разряда (два БИР, работающие на два разрядных канала)  $M_{\text{БИР}} = 0,6$  кг;
- масса блока системы питания и управления  $M_{\text{СПУ}} = 1,5$  кг.

Оставшиеся  $M_{\text{доп}} = 0,8$  кг приходятся на силовые узлы крепления, экраны разрядных каналов, плату разъемов, кабели межблочного соединения и другие, не входящие в основные блоки, элементы конструкции. Наглядно структура полной массы ЭРДУ на основе АИПД показана на рисунке 18.

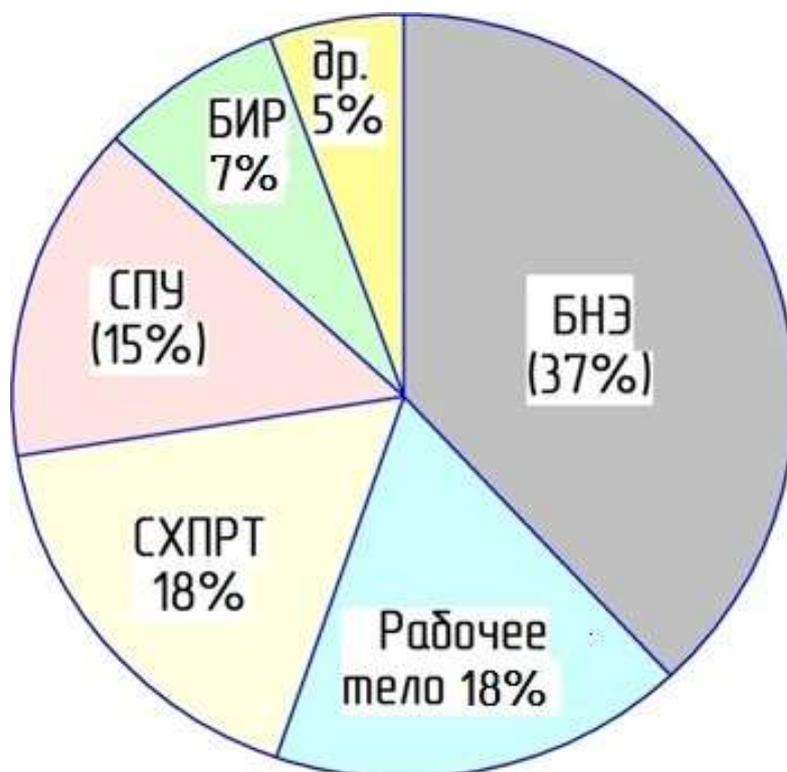


Рисунок 18 – Структура полной массы ЭРДУ на основе АИПД

Как видно из приведённой диаграммы, наибольшую массу в ДУ имеет блок накопителя энергии. Основную массу этого блока составляют конденсаторы. В процентном соотношении от общей массы КДУ, эта величина составляет  $\sim 37\div 38\%$ , несколько меняясь в зависимости от конструкции. При увеличении энергии ДУ масса ошиновки и конструктивных элементов меняется незначительно, в то время как масса батареи возрастает пропорционально  $W$ . Эффективность конденсатора определяется удельной энергоемкостью – отношением энергии, которую он способен запасти, к массе. По мере развития технологий эта величина постоянно росла.

Применение конденсаторов с повышенной энергоемкостью позволило снизить массу блока АИПД-250 на 15-20% по сравнению с предыдущими его прототипами. На первых моделях ИПД, использовавшихся на аппарате Зонд-2, энергоемкость конденсаторов была меньше в несколько раз.

Следует отметить, что усовершенствование БНЭ является наиболее эффективным способом снижения массы КДУ по сравнению с другими вариантами решения этой задачи.

По мере развития АИПД менялась и конструкция системы хранения и подачи рабочего тела. На КДУ аппарата «Зонд-2» применялась коаксиальная схема двигателя (рисунок 1) с кольцевым расположением шашки рабочего тела. Для обеспечения больших суммарных импульсов подобное расположение шашки требует значительного увеличения линейных размеров АИПД. В этом случае более эффективным является использование схемы двигателя рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего тела. Такой двигатель представлен на рисунке 9.

Ее преимуществами, по сравнению с торцевой системой подачи, являются меньшие геометрические размеры при большей массе запасённого рабочего тела. Доля массы конструкции подобной СХПРТ в общей массе АИПД имеет наиболее низкое значение.

Питание и управление двигателем, инициирование разряда осуществляется от блоков БПУ и БИР, соответственно. На АИПД-45-2 блок

питания и управления расположен в противоположной части от разрядных каналов.

Развитие электронной компонентной базы позволило уменьшить габариты и массу этих блоков. В тоже время тенденция повышения требований к надежности и ресурсу, применение дублирования и резервирования цепей приводит к сужению потенциальных возможностей снижения массы БПУ и БИР.

Масса блока СПУ пропорциональна его потребляемой мощности. В настоящее время удельная масса наиболее современных блоков СПУ с двукратным резервированием типа СПУ-50-2 (АИПД-45-2) и СПУ-70-2 (АИПД-155) составляет  $m_{СПУ} \approx 0,01$  кг/Вт. Возможно некоторое снижение массы за счет совершенствования схемных решений, пересмотра некоторых принципов резервирования и применения заливочных компаундов меньшей плотности.

Остановимся наиболее подробно на блоке накопителя энергии. Как уже отмечалось ранее, масса БНЭ в основном определяется массой конденсаторов. Поэтому необходимо стремиться к использованию конденсаторов с наиболее высокой энергоемкостью.

Современные импульсные пленочные конденсаторы с металлизированным диэлектриком обладают высокой удельной энергоёмкостью, способностью самовостанавливаться при микропробоях и имеют ресурс  $10^7 \div 10^8$  циклов заряд-разряд и более.

В последних разработках двигателей НИИ ПМЭ МАИ использовались конденсаторы трёх различных фирм: немецкой «EPCOS» (применялись при создании двухступенчатого АИПД), итальянской «ICAR» (конденсаторы типа MSR25 на текущий момент являются самыми лёгкими из применяемых), отечественной ООО «Нюкон» (применялись при проведении большей части исследований). Технологии, применявшиеся при создании этих конденсаторов, на сегодняшний день являются самими передовыми и продолжают совершенствоваться.

Удельная энергоемкость силового конденсатора  $\omega_C$  определяется отношением запасаемой энергии  $W_C$  к массе конденсатора  $m_C$ . Поэтому для увеличения  $\omega_C$  существует два пути – увеличение  $W_C$  и снижение  $m_C$ . Рассмотрим обе возможности увеличения удельной энергоемкости.

Для получения конденсатора с наименьшей массой требуется использовать материалы и компоненты с минимально возможной плотностью. Конденсаторы производства ООО «Нюкон» изготавливаются по сухой технологии с использованием металлизированной полипропиленовой пленки и обладают эффектом самовосстановления. Металлизация пленки, производится путем термовакуумного напыления и имеет толщину порядка 30-40 нм. Полипропиленовая пленка, которая в конденсаторе ООО «Нюкон» играет роль диэлектрика, имеет плотность  $0,91 \text{ г/см}^3$  наименьшую из всех пленок применяемых в конденсаторостроении. Таким образом, основной элемент конденсатора, который запасает энергию, имеет в настоящее время минимально возможную массу.

Токопроводящие части конденсатора выполнены из меди. Объем конденсатора заполнен компаундом. В его качестве используется полиуретановая смола с плотностью  $1,5 \text{ г/см}^3$ . Столь высокая плотность компаунда объясняется наличием в составе специальных наполнителей, которые обеспечивают его стабильность, необходимую твердость, высокое сопротивление проникновению влаги внутрь конденсатора, негорючесть. Производители компаундов ищут пути улучшения свойств своего продукта и снижения плотности. На рынке стали появляться компаунды, которые отвечают всем высоким требованиям конденсаторостроения и имеют плотность  $1,3 \text{ г/см}^3$ . В дальнейшем, с учетом условий работы конденсатора в вакууме, возможно снижение количества наполнителей в составе компаунда, что теоретически позволяет достигнуть плотности  $1,15 \text{ г/см}^3$ . Остальные компоненты конденсатора, такие как корпус, сердечник, припой для пайки дают очень малый вклад в полную массу конденсатора.

Энергия, которую может запасти конденсатор, определяется электрической емкостью конденсатора и квадратом рабочего напряжения, в данном случае напряжением заряда БНЭ. Увеличение электрической емкости конденсатора, при сохранении неизменной массы и размеров, требует использования более тонкого диэлектрика. Но более тонкий диэлектрик не позволяет увеличить напряжение заряда конденсатора, от величины которого количество запасаемой энергии зависит гораздо сильнее, чем от емкости. Поэтому более выгодным путем увеличения  $W_C$  является повышение напряжения заряда без увеличения толщины диэлектрика. Технология изготовления конденсаторов из металлизированной пластиковой пленки позволяет увеличивать рабочее напряжение диэлектрика путем напыления слоя металлизации со специальным профилем за счет использования эффекта управляемого самовосстановления. По теоретическим оценкам, в данном случае возможно повышение зарядного напряжения на 25% без увеличения толщины диэлектрика. Это позволяет увеличить энергию, запасенную каждым конденсатором, приблизительно на 55%. Дальнейшее повышение зарядного напряжения нецелесообразно, так как это приводит, как показано в работах [29], к существенному снижению удельных характеристик двигателя.

Совокупность всех вышеупомянутых мер по повышению энергосодержания и снижению массы импульсных конденсаторов позволяет увеличить их удельную энергоемкость с уже достигнутых 25-30 Дж/кг до 35 Дж/кг. Так российская фирма ООО «Нюкон», используя пленку более высокого сорта, что позволило при той же плотности снизить ее толщину (величина сопротивления пробоя осталась без изменения), разработала конденсаторы с энергоемкостью 35 Дж/кг. Они прошли успешные испытания в составе КДУ АИПД-250.

Как следует из диаграммы, приведенной на рисунке 18, основными составляющими полной массы ЭРДУ на базе АИПД являются масса БНЭ и масса рабочего тела с системой его хранения и подачи. Вместе они составляют 70-75% ее полной массы. В состав БНЭ, кроме накопительных конденсаторов,

входят разрядные шины, изоляторы, силовые элементы конструкции и компаунд, используемый для заливки высоковольтных цепей. Из опыта конструирования АИПД следует, что масса этих элементов приблизительно пропорциональна суммарной массе конденсаторов  $M_C$ :

- масса разрядных шин, электродов разрядных каналов и других медных элементов разрядной цепи – 20...30% массы конденсаторов  $M_C$ ;

- масса изоляторов, наибольший вклад в которую вносит масса заливочного компаунда – 20...30%  $M_C$ ;

- масса силовых элементов конструкции (БНЭ, как правило, является основным силовым элементом АИПД в целом) – 40...50%  $M_C$ .

Масса БНЭ в целом  $M_{\text{БНЭ}}$  приблизительно равна удвоенной массе конденсаторов и пропорциональна энергии разряда:

$$M_{\text{БНЭ}} \approx (1,0+0,3+0,2+0,5) \cdot W/\omega_C = 2 \cdot W/\omega_C. \quad (2.1)$$

Таким образом, основными направлениями снижения массы БНЭ следует считать уменьшение (оптимизацию) энергосодержания конденсаторной батареи и применение конденсаторов повышенной энергоемкости.

Масса запасаемого рабочего тела  $M_{\text{рт}}$  определяется заданным суммарным импульсом тяги  $P_\Sigma$  и характерным для данного двигателя удельным импульсом тяги  $J_{\text{уд}}$  в соответствии с соотношением:

$$M_{\text{рт}} = P_\Sigma / J_{\text{уд}} \quad (2.2)$$

Наибольшую неопределенность в соотношении (2.2) вносит зависимость удельного импульса от энергии разряда. В настоящее время получить такую зависимость расчетным путем не представляется возможным. Имеющиеся аналитические и численные модели ускорения плазмы в импульсных плазменных ускорителях, например [34], включают варьируемые эмпирические коэффициенты, позволяющие подобрать расчетные осциллограммы тока и напряжения под экспериментально измеренные. Однако накопленный в НИИ ПМЭ МАИ большой опыт разработки и испытаний импульсных плазменных двигателей позволяет выявить простые эмпирические закономерности, общие

для всего ряда летных АИПД и их прототипов, представленных в таблице 2. На рисунке 19 приведена экспериментально полученная зависимость удельного импульса тяги от энергии разряда.

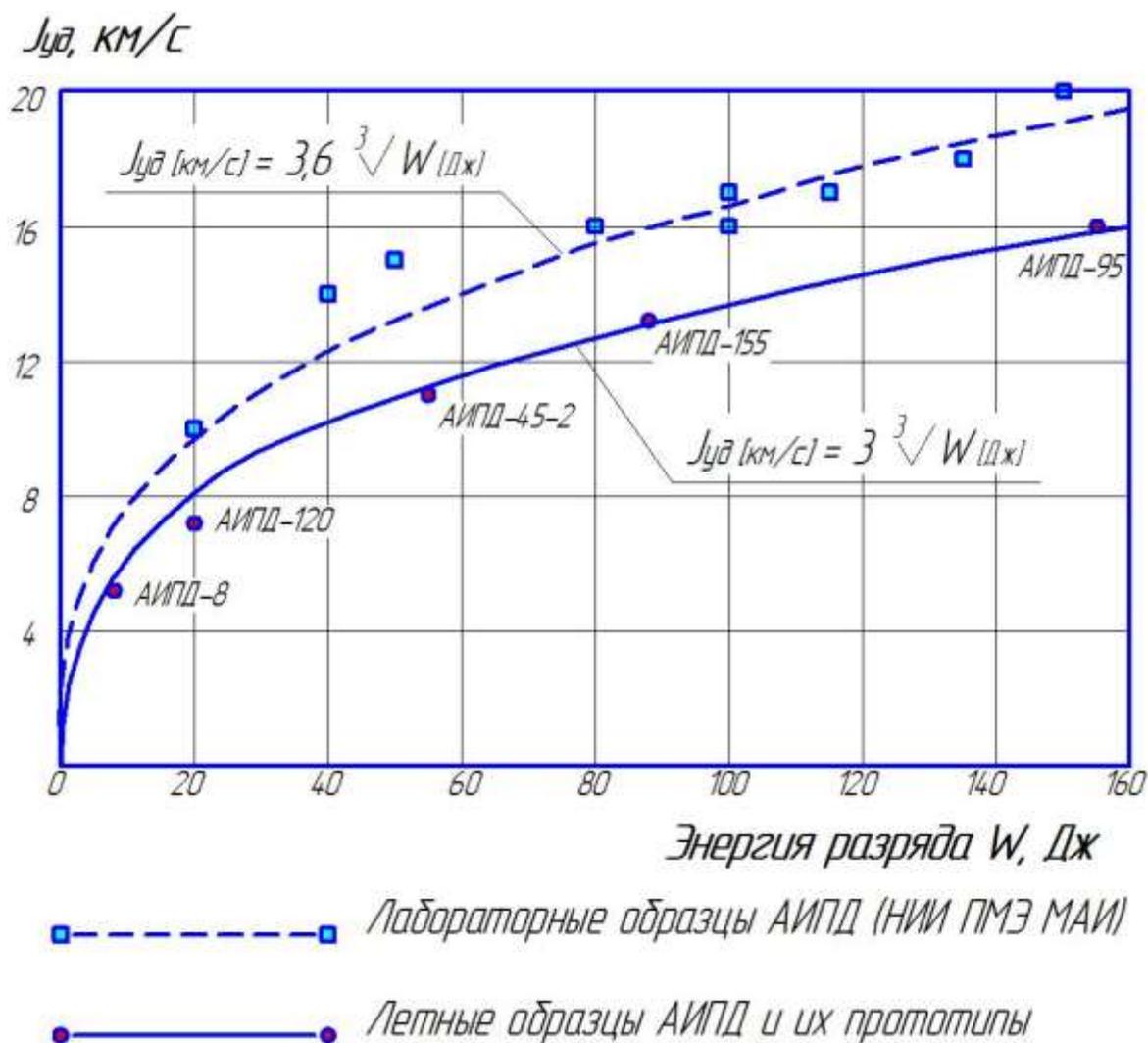


Рисунок 19 – Зависимость удельного импульса АИПД от энергии разряда

Из этих графиков следует, что зависимость  $J_{y\bar{d}}(W)$  для летных образцов АИПД и их прототипов вполне удовлетворительно интерполируется эмпирической формулой:

$$J_{y\bar{d}}[\text{м/с}] = 3000 \cdot \sqrt[3]{W[\text{Дж}]} \quad (2.3),$$

а для лабораторных образцов двигателей формулой:

$$J_{уд} [М/с] = 3600 \cdot \sqrt[3]{W [Дж]} \quad (2.4)$$

Различие в коэффициентах объясняется тем, что лабораторные образцы рассчитываются на получение максимально возможных удельных характеристик, таких как тяговая эффективность и удельный импульс тяги, а летные образцы АИПД, при проектировании, как правило, оптимизируются на достижение наибольшего суммарного импульса тяги. Это приводит к некоторой переразмеренности поперечного сечения шашек рабочего тела, и соответственно, к снижению удельного импульса тяги примерно на 20%.

Как показывает опыт конструирования АИПД, сухая масса системы хранения и подачи рабочего тела, включающая массу направляющих для подачи шашек, рычажно-пружинных механизмов получается приблизительно равной массе запасаемого рабочего тела:

$$M_{СХПРТ} \approx M_{рт} \quad (2.5)$$

Таким образом, масса рабочего тела с системой его хранения и подачи составляет

$$M_{рт} + M_{СХПРТ} \approx 2 \cdot P_{\Sigma} / J_{уд} \quad (2.6)$$

Основными резервами снижения массы рабочего тела и СХПРТ является, как следует из соотношений (2.2) и (2.6), повышение удельного импульса тяги и снижение массы конструктивных элементов СХПРТ.

Так как масса БНЭ пропорциональна энергии разряда, следует рассмотреть возможности снижения  $W$  при условии сохранения средней тяги и суммарного импульса тяги двигательной установки неизменными. При уменьшении энергии пропорционально снижается единичный импульс тяги. В этом случае сохранение заданной средней тяги достигается простым увеличением частоты импульсов. Сложнее сохранить суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma}$ , так как он пропорционален удельному импульсу  $J_{уд}$ , в свою очередь зависящему от энергии разряда. Снижение удельного импульса  $J_{уд}$  влечет за собой пропорциональное увеличение массы запасаемого рабочего тела в соответствии с соотношением (2.2)

Запишем полную массу ЭРДУ в виде

$$M_{\text{ЭРДУ}} \approx M_{\text{констр}} + 2 \cdot W / \omega_C + 2 \cdot P_{\Sigma} / J_{\text{уд}}, \quad (2.7)$$

где  $M_{\text{констр}} \approx 0,25 \cdot M_{\text{ЭРДУ}}$ , (здесь в  $M_{\text{констр}}$  входят СПУ, БИР и другие элементы).

На рисунке 20 представлены результаты оценочных расчетов по формуле (2.7) полной массы ЭРДУ в зависимости от энергии разряда при заданных суммарном импульсе тяги  $P_{\Sigma} = 10 \text{ кН} \times \text{с}$ ;  $30 \text{ кН} \times \text{с}$ ;  $50 \text{ кН} \times \text{с}$  и удельной энергоемкости конденсаторов  $\omega_C = 28 \text{ Дж/кг}$ , что соответствует наиболее легким из применяемых в настоящее время конденсаторам типа MSR25 фирмы ICAR (Италия) и отечественным импульсным конденсаторам фирмы ООО «Нюкон».

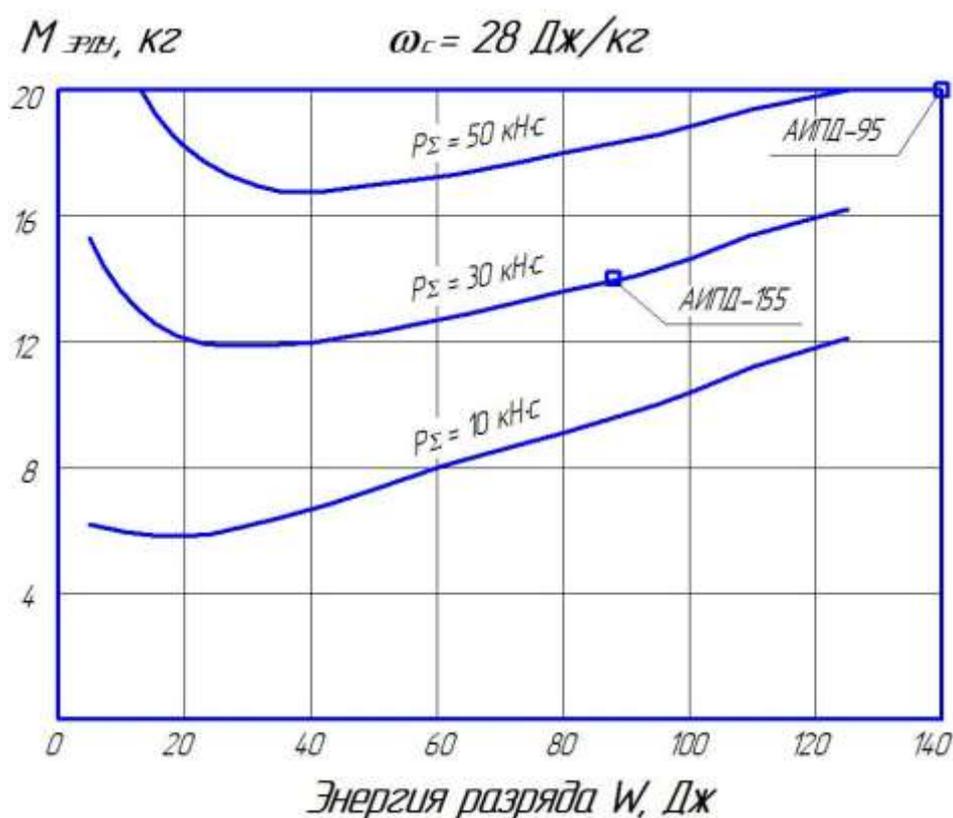


Рисунок 20 – Расчетная зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от энергии разряда

Из формулы (2.7), если найти и приравнять к нулю ее производную, и графиков, представленных на рисунке 20, следует, что энергия

конденсаторного накопителя имеет оптимум по полной массе ЭРДУ, определяемый соотношением

$$W_{\text{опт}} [\text{Дж}] = (\omega_c [\text{Дж/кг}] \cdot P_{\Sigma} [\text{Н} \cdot \text{с}] / 9000)^{3/4} \quad (2.8)$$

Очевидно, что энергия разряда существующих образцов АИПД (на диаграммах показаны точки, соответствующие АИПД-155 и АИПД-95) существенно выше оптимальной с точки зрения получения минимальной массы ЭРДУ. Однако опыт разработки и испытаний АИПД в НИИ ПМЭ МАИ показывает, что снижение энергии разряда сопровождается увеличением цены тяги. Экспериментально полученная зависимость цены тяги  $C_T$  летных образцов ЭРДУ на основе АИПД от энергии разряда представлена на рисунке 21.

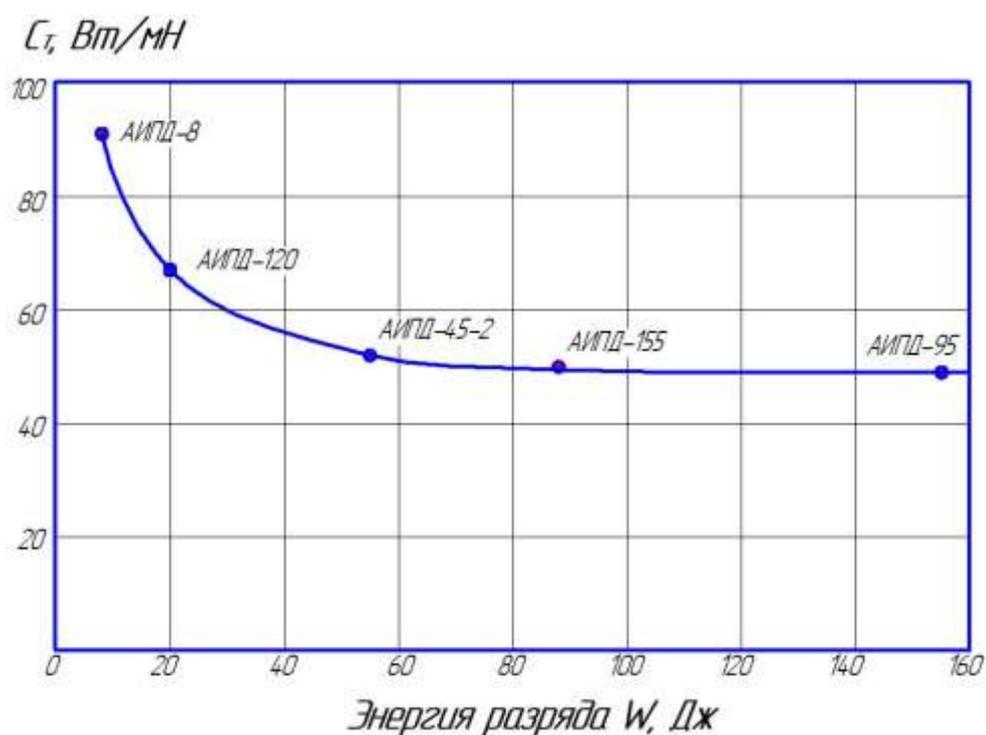


Рисунок 21 – Зависимость цены тяги летных образцов и прототипов ЭРДУ с АИПД от энергии разряда

Видно, что снижение для созданных в НИИ ПМЭ МАИ энергии разряда ниже 40-50 Дж нежелательно, так как сопровождается существенным ростом цены тяги. Кроме того, снижение энергии разряда и соответствующее

увеличение массы запасаемого рабочего тела вызывает трудности с его размещением. Данная проблема решается путем применения многоканальных схем АИПД, когда один блок накопителя энергии работает на несколько разрядных каналов, каждый с собственным запасом рабочего тела. В частности, использование двухканальной схемы в ЭРДУ АИПД-45-2, АИПД-155 и АИПД-95 позволило снизить их полную массу приблизительно на 15%.

На рисунке 22 приведены зависимости полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги для:

- существующих летных образцов АИПД и их прототипов (экспериментальная кривая);

- образцов АИПД с оптимизированной по массе конденсаторной батареей и существующими конденсаторами с удельной энергоемкостью  $\omega_c = 28$  Дж/кг (расчетная кривая);

- образцов АИПД с перспективными конденсаторами с удельной энергоемкостью  $\omega_c = 35$  Дж/кг (расчетная кривая).

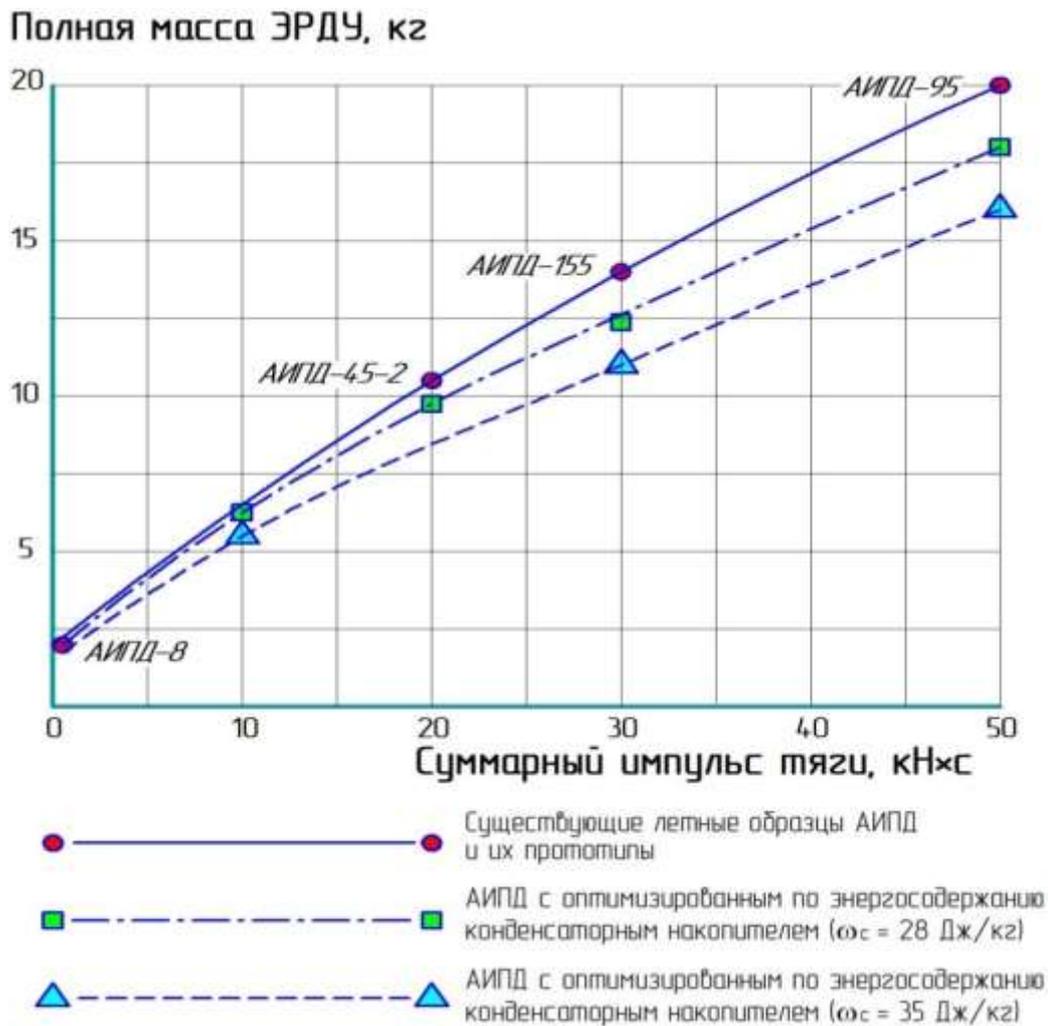


Рисунок 22 – Зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги при различных конденсаторных накопителях

Из этих данных следует, что оптимизация энергосодержания конденсаторной батареи позволяет уменьшить полную массу ЭРДУ на 10–15% при использовании типовых конденсаторов и на 15–20% при применении конденсаторов с повышенной до 35 Дж/кг удельной энергоемкостью.

Рассмотрим возможности снижения массы ЭРДУ путем уменьшения массы рабочего тела в результате увеличения удельного импульса тяги [29]. Представленные на рисунке 23 результаты исследования лабораторных образцов АИПД, оптимизированных по удельному импульсу тяги, показали, что при энергии разряда  $W \sim 50 \dots 100$  Дж существуют принципиальные возможности увеличения  $J_{уд}$  на 15–20%.

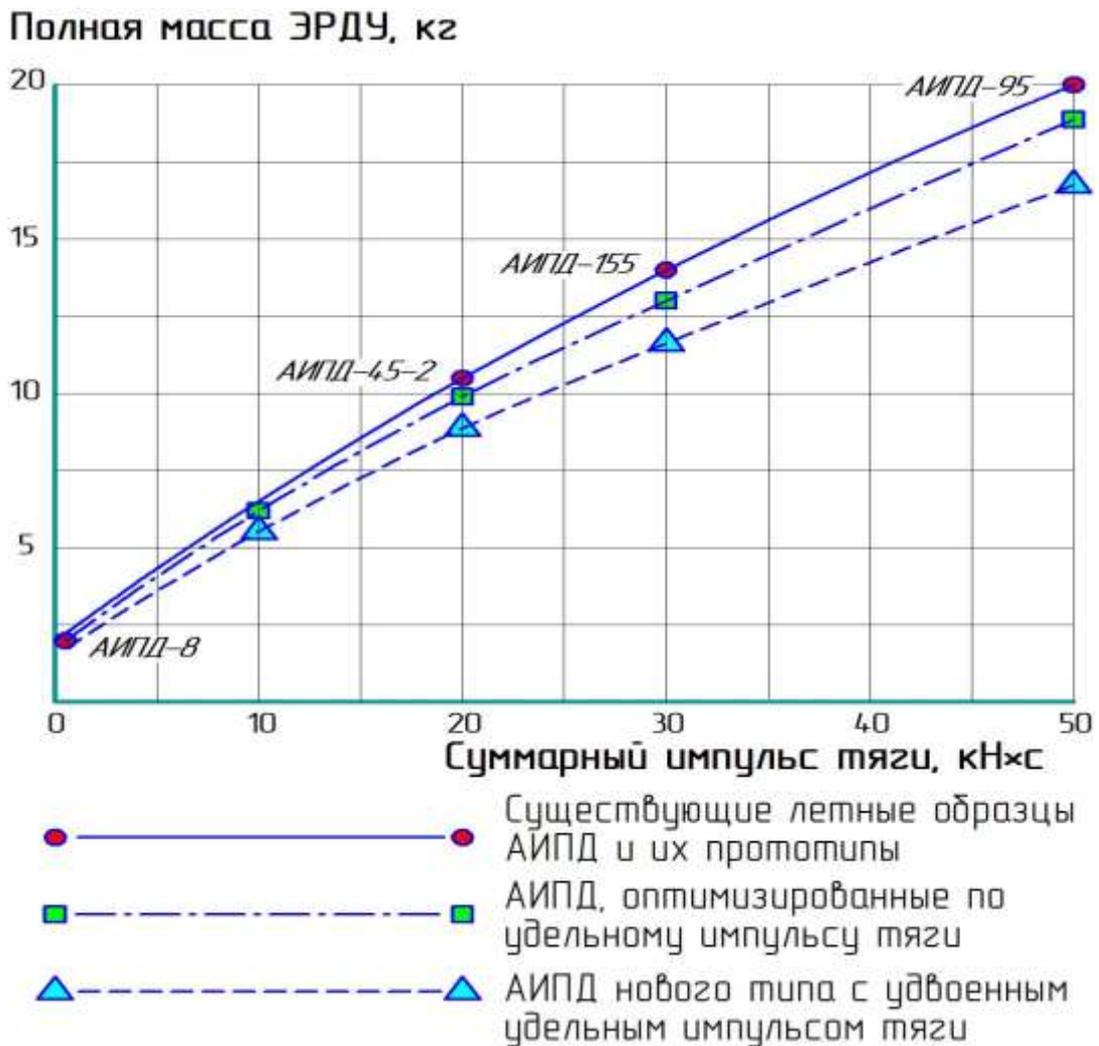


Рисунок 23 – Зависимость полной массы ЭРДУ на базе АИПД от суммарного импульса тяги при различных удельных импульсах тяги

Наиболее существенный эффект дает использование перспективных схем ускорения плазмы.

Особенностью ЭРДУ малой тяги является то, что в их конструкции, как и в конструкции других, относительно легких радиоэлектронных приборов, не испытывающих значительных статических силовых нагрузок, сечения деталей в большей степени определяются не прочностью, а жесткостью, стойкостью к вибрационным, а также тепловым и радиационным нагрузкам. Поэтому при расчете возможностей снижения массы за счет применения новых конструкционных материалов следует принимать во внимание, главным образом, не удельную прочность, а плотность материалов.

Основным конструкционным материалом для силовых узлов и корпусных деталей ЭРДУ на основе АИПД являются алюминиевые сплавы с плотностью  $\rho_{Al} \approx 2,7 \text{ г/см}^3$ . Возможно снижение массы двигательной установки за счет более широкого применения высокопрочных неметаллических материалов, таких как конструкционный стеклотекстолит ( $\rho_{ст} \approx 1,8 \text{ г/см}^3$ ) и углепластики ( $\rho_{уп} \approx 1,5 \text{ г/см}^3$ ).

На рисунке 24 приведены расчетные зависимости полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги для:

- существующих летных образцов АИПД;
- образцов АИПД с максимально возможной заменой деталей из алюминиевых сплавов облегченными деталями из условного материала с плотностью  $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$ .

Из этих графиков следует, что снижение полной массы ЭРДУ в данном случае незначительно.

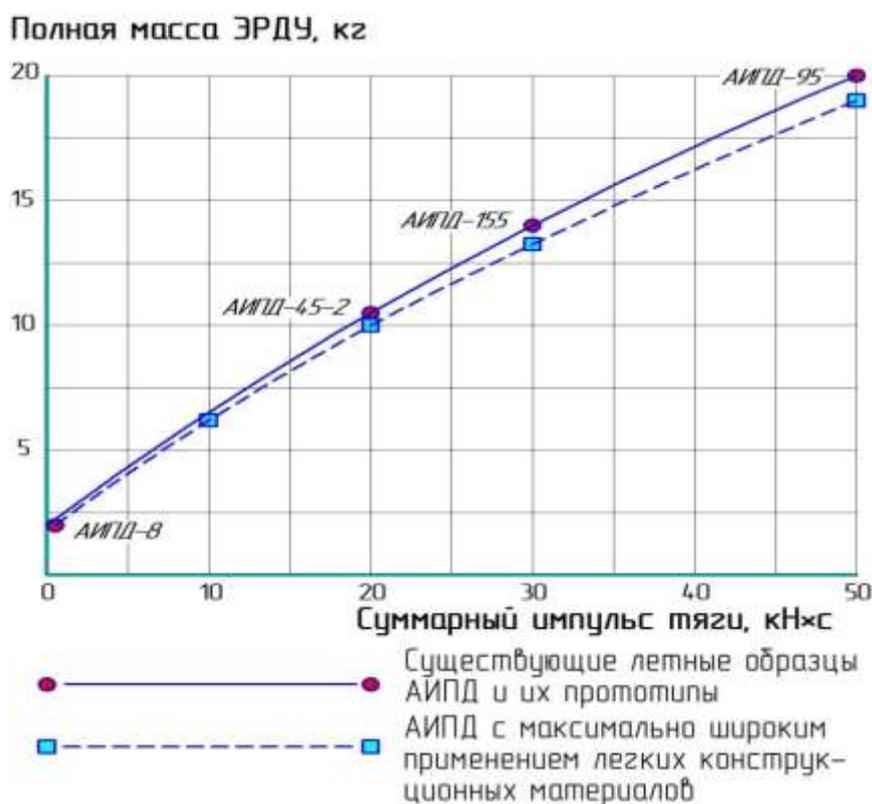


Рисунок 24 – Зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги при использовании алюминиевых сплавов и более легких конструкционных материалов

Таким образом, можно сделать вывод, что основными направлениями улучшения массогабаритных характеристик ЭРДУ на базе АИПД являются:

- уменьшение массы БНЭ за счет оптимизации его энергосодержания и применения конденсаторов с повышенной удельной энергоемкостью;
- снижение массы рабочего тела путем повышения удельного импульса тяги при использовании новых схем ускорения плазмы.

## **2.2 Методы повышения удельного импульса тяги**

Существующая схема ускорения плазмы в АИПД, работающих на фторопласте, практически исчерпала возможности повышения удельного импульса тяги. В первую очередь это обусловлено, как отмечалось ранее, двойной функцией разряда в ускорительном канале – одновременным и самосогласованным дозированием и ускорением рабочего тела.

При этом, как видно по зависимостям  $J^2(t)$  и  $m(t)$  приведенным на рисунке 14, наблюдается существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в ускорительный канал. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился. Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению удельного импульса тяги. Для дальнейшего повышения удельных характеристик АИПД необходимо переходить к новым схемам ускорительного канала. В частности, целесообразно разделить функции дозирования и ускорения рабочего тела. Различные схемы таких двухступенчатых плазменных ускорителей, были предложены еще в 60-х годах [35]. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований принципиально новых лабораторных образцов АИПД двухступенчатой схемы [36, 37].

Существуют и некоторые другие схемные решения позволяющие повысить удельный импульс тяги. Так в процессе исследований в НИИ ПМЭ МАИ лабораторных образцов АИПД было установлено, что достаточно часто

имеет место значительная неравномерность расхода (до 30%) левой и правой шашек рабочего тела двигателя, без существенного ухудшения его характеристик. Наблюдалось даже существенное повышение удельного импульса тяги, особенно в случае науглероживания одной из шашек. То есть, имеет место ускорение рабочего вещества поступающего в разряд преимущественно с одной из шашек, а вторая просто «парит» и продукты ее абляции ускоряются лишь до тепловых скоростей и снижают величину результирующего удельного импульса тяги. Поэтому, можно предположить, что удалив одну из шашек, удастся повысить значение  $J_{уд}$  (асимметричная схема разрядного канала).

Еще одним способом увеличения удельного импульса тяги АИПД является повышение значения электромагнитной составляющей тяги двигателя. Увеличить эффективность ускорения плазмы электромагнитной силой можно повысив величину магнитного поля. Для этого, при условии неизменности разрядного тока, необходимо изменить конструкцию обратного токоподвода, увеличив количество проводников, лежащих в одной плоскости, с одинаковым направлением разрядного тока.

В данной работе рассматриваются следующие способы повышения удельного импульса тяги АИПД при неизменной энергии разряда и подобных размерах разрядного канала, это:

- применение асимметричной схемы разрядного канала;
- применение схемы двигателя с двойным обратным ток подводом;
- применение двух- и многоступенчатых схем ускорения в АИПД.

Все перечисленные способы имеют свои достоинства и недостатки при их реализации в конструкции двигателя. Решения задач, требующих повышенного значения удельного импульса тяги могут быть востребованы при создании ЭРДУ на базе АИПД.

### Глава 3. Исследование характеристик одноступенчатых АИПД с асимметричным исполнением разрядного канала.

#### 3.1 Экспериментальный стенд

Все экспериментальные работы по исследованию АИПД проводились в НИИ ПМЭ МАИ на установке ИУ-1.

Исследовательская установка ИУ-1 (рисунок 25) предназначена для изучения рабочих параметров импульсных плазменных ускорителей и двигателей, используемых для проведения экспериментов в ионосфере Земли, коррекции и поддержания орбит МКА, а также для проведения учебных занятий.

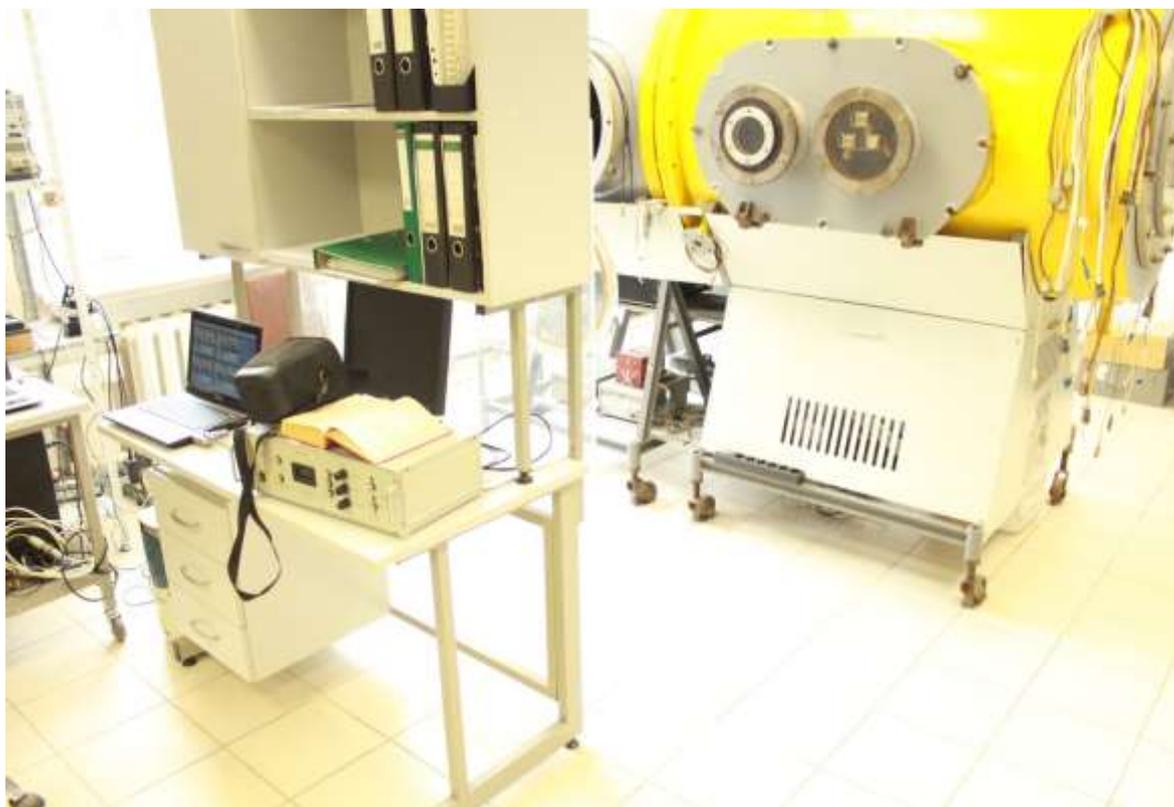


Рисунок 25 – Исследовательская установка ИУ-1

Она состоит из вакуумной системы, системы оборотного водоснабжения, пневматической системы, системы электропитания и управления, приборно-

измерительного комплекса и рабочего узла импульсного плазменного двигателя или ускорителя.

Вакуумная система установки ИУ-1 включает в свой состав: вакуумную камеру, затвор высоковакуумный с пневматическим приводом двойного действия ISO400, диффузионный насос Oerlikon Leybold Vacuum DIP 8000 с масляной ловушкой DN 400, вакуумпроводы с соединительными сильфонами, форвакуумный насос Kashiyama MU-603-061, вакуумные клапаны. Управление вакуумными насосами, затвором и вакуумными клапанами системы откачки производится с автоматической стойки. Вакуумная система обеспечивает получение вакуума в рабочем объеме до  $3,5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. при работе двигателя.

Вакуумная камера представляет собой цилиндрическую емкость объемом 2500 л, установленную на силовой опорной раме, на которой размещено высоковольтное оборудование стенда. Для предотвращения соприкосновения человека с токоведущими частями данного оборудования, рама по всему периметру закрыта съемными металлическими щитами.

Система оборотного водоснабжения установки ИУ-1 предназначена для охлаждения вакуумных насосов и экранов. Она состоит из систем термостатирования замкнутого типа Turmoil ОС-100R и Эрика-12-В. Диффузионный и форвакуумный насос установки ИУ-1 охлаждаются агрегатами Эрика-12-В и Turmoil ОС-100R. Производительность системы термостатирования Turmoil ОС-100R составляет до 15,2 л/мин при создаваемом давлении до 4,2 атм, Эрика-12-В – 36,6 л/мин при создаваемом давлении до 3 атм.

Пневматическая система обеспечивает работу затворов и вакуумных клапанов, осушителя воздуха Atlas Copco CD 10 системы продувки форвакуумных насосов сухим воздухом. Она состоит из воздушного компрессора GX3P EP с линиями подачи воздуха, вентилями, редуктором и фильтром. Максимальное рабочее давление, создаваемое компрессором, 10 атм.

Система электропитания установки включает в себя цепи переменного тока напряжением 380/220 В, источники вторичного питания и цепи

постоянного тока напряжением до 2 кВ. Цепи переменного тока (380/220 В) обеспечивают питание пульта управления агрегатами установок, высоковольтных выпрямителей, измерительно-приборного комплекса, системы защиты и сигнализации. Два высоковольтных выпрямителя установки ИУ-1 размещены на раме вакуумной камеры и включены в общую схему управления, защиты и сигнализации.

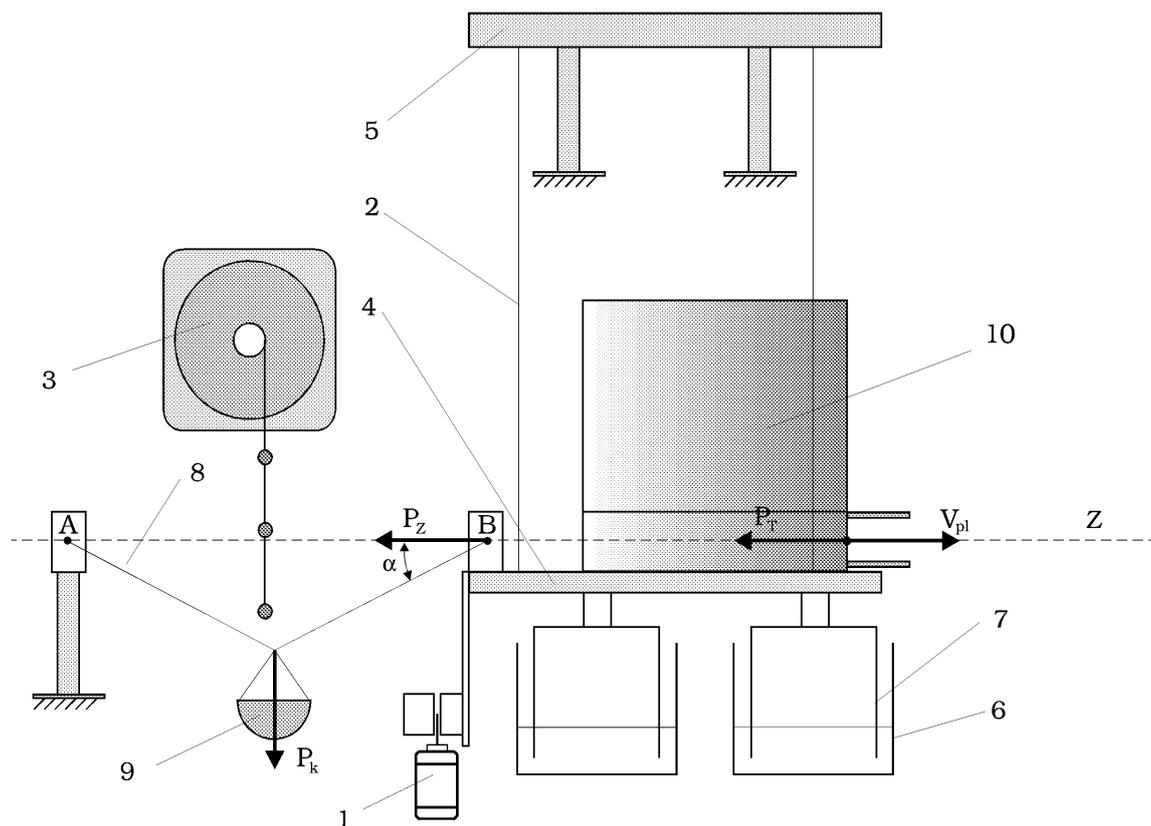
В систему управления установкой входит компьютеризированный стационарный пульт управления, выносной пульт управления, компьютер управления блоками питания, а также стандартное оборудование – генераторы сигналов GFG-8210 и ГИ-1.

Приборно-измерительный комплекс предназначен для контроля основных параметров установки и рабочего узла (АИПД). В его состав входят стандартные измерительные приборы:

- системы измерения вакуума Micro-Ion Controller серии 358 с датчиками манометрического и ионизационного типов;
- киловольтметры типа С50, С510 (до 1,5кВ);
- цифровой вольтметр В7-16, мультиметр АРРА-305;
- осциллографы РС500, TDS2002 и DSO9064А;
- токовые клещи С160 и измеритель сопротивления изоляции 2803 IN;
- датчики тока.

К нестандартизованным средствам приборно-измерительного комплекса установки ИУ-1 относятся пояса Роговского с интеграторами и струнное тягоизмерительное устройство (ТИУ) с калибровочными стендовыми устройствами.

Тягоизмерительное устройство расположено в вакуумной камере. Конструктивная схема ТИУ показана на рисунке 26. Она представляет собой систему измерения малых усилий струнного типа (СИМС–СТ).



1 - индуктивный датчик смещения платформы; 2 - подвес платформы; 3 - дистанционно управляемый барабан 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);  $V_{pl}$  – направление вектора импульса АИПД;  $P_T$  – направление действия вектора тяги двигателя;  $|P_k| = |P_z|$  – тарировочное усилие;  $\alpha = 25,56^\circ \pm 2^\circ$  – угол между нитью тарировочного приспособления и направлением  $P_z$  действия тарировочного усилия.

Рисунок 26 – Схема тягоизмерительного устройства СИМС-СТ

СИМС-СТ выполнена в виде маятникового тягомера прямого действия с двумя масляными демпферами и индуктивным датчиком перемещений, а также с системой калибровки с незначительной величиной трения в узлах. Это устройство обеспечивает измерение среднего значения тяги двигателя с погрешностью  $\pm 5\%$ . При этом, для исключения возникновения резонансных явлений, частота работы двигателя должна быть не менее 1,5 Гц, так как собственная частота колебаний ТИУ близка к 1 Гц. В демпферах используется масло типа И-20А.

Удельный импульс тяги двигателя рассчитывается по данным измерения тяги двигателя  $F$  и расходу рабочего тела  $m$  за количество импульсов  $N$  срабатываний АИПД за эксперимент

$$v = \frac{F \cdot N}{f \cdot m} \quad (3.1)$$

здесь  $f$  – частота работы двигателя.

### **3.2 Оценка погрешностей и достоверности экспериментальных результатов.**

При обработке результатов экспериментальных исследований возникает задача оценки погрешности, допущенной при измерении. Рассмотрим погрешности, возникающие при определении параметров АИПД.

В процессе проведения экспериментов проводились определение следующих характеристик двигателя: единичного импульса тяги, удельного импульса тяги, расхода рабочего тела. Измерялось среднее значение тяги, масса шашек рабочего тела, напряжение разряда, емкость БНЭ, величина разрядного тока, фиксировалась частота работы и длительность функционирования АИПД.

Система тягоизмерения строится на принципе действия физического маятника с малыми отклонениями от положения равновесия. Смещение фиксируется индукционным датчиком и поступает на стрелочный милливольтметр класса точности 0,2 со встроенным в него демпфером, что позволяет отфильтровывать большую часть высокочастотных колебаний. Калибровка системы тягоизмерения показала линейную зависимость сигнала с датчика от веса тарировочного грузика в диапазоне величин тяг АИПД.

Ошибки в измерениях 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%.

Рассмотрим достоверность результатов экспериментального исследования модели АИПД. Проведенные измерения можно разделить на прямые и косвенные. В настоящее время не существует универсального способа оценки границ доверительного интервала вероятности для результата косвенных измерений [68]. Поэтому ограничимся статистической обработкой результатов прямых измерений. К ним, в том числе, относятся измерения среднего значения тяги и массы шашек рабочего тела. Масса шашек измерялась весами с погрешностью 0,1 мг.

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  $t_\alpha = 2,78$  [69]. Доверительный интервал может быть представлен в виде:

$$\bar{a} - t_\alpha \Delta S_{\bar{a}} \leq a \leq \bar{a} + t_\alpha \Delta S_{\bar{a}}, \text{ где: (4.16)}$$

-  $a$  - истинное значение измеряемой величины;

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (3.2) \text{ - математическое ожидание серии измерений случайной}$$

величины  $a_i$ ;

$$- \Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.3) \text{ -среднеквадратическая погрешность результатов}$$

серии измерений;

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

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  $\varepsilon$ , которая равна:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha} \Delta S_{\bar{a}}}{\bar{a}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Результаты проведенной статистической обработки измерений тяги приведены в таблице 3, результаты статистической обработки измерений массы шашек приведены в таблице 4.

Таблица 3 – 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	$\varepsilon$ , %
U=1200 В v=2 Гц	2,36 2,46 2,47 2,39 2,5	2,44	0,026	$2,36 \leq P \leq 2,51$	2,99

Таблица 4 – 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	$\varepsilon$ , %
U=1200 В v=2 Гц	80,37 80,34 80,2994 80,36 80,3424	80,342	0,012	$80,309 \leq U \leq 80,376$	0,042

### 3.3 Базовый вариант двигателя.

В качестве базового варианта АИПД принят лабораторный образец двигателя АИПД-45-2, разработанного для использования в составе корректирующей двигательной установки МКА-ФКИ ПН2.

Базовая модель, собранная для снятия контрольных характеристик, состоит из батареи (12 конденсаторов ёмкостью 7,5 мкФ отечественной фирмы ООО «Нюкон»), электродов, шашек рабочего тела, свечи поджига, изоляторов, конструктивных и крепёжных элементов (рисунок 27).

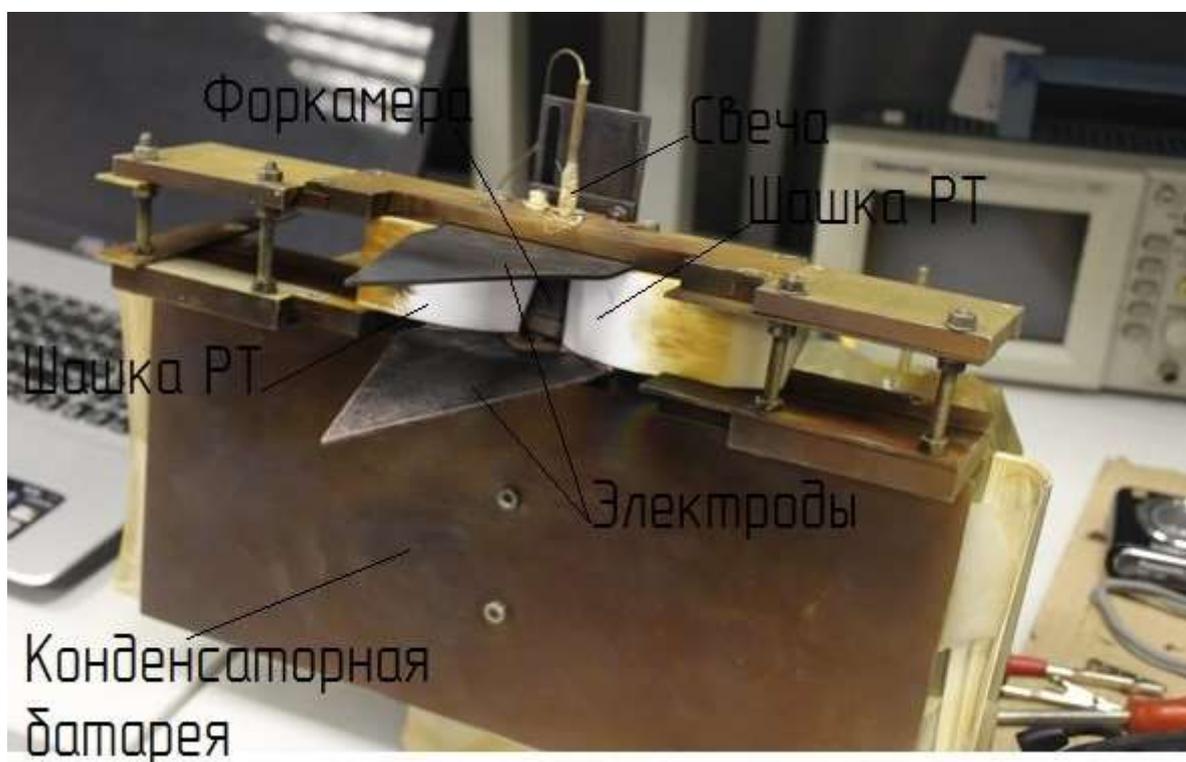


Рисунок 27 – Базовый вариант двигателя

Осциллограмма типичного разрядного тока базовой модели, полученная с помощью пояса Роговского с интегратором, представлена на рисунке 28.

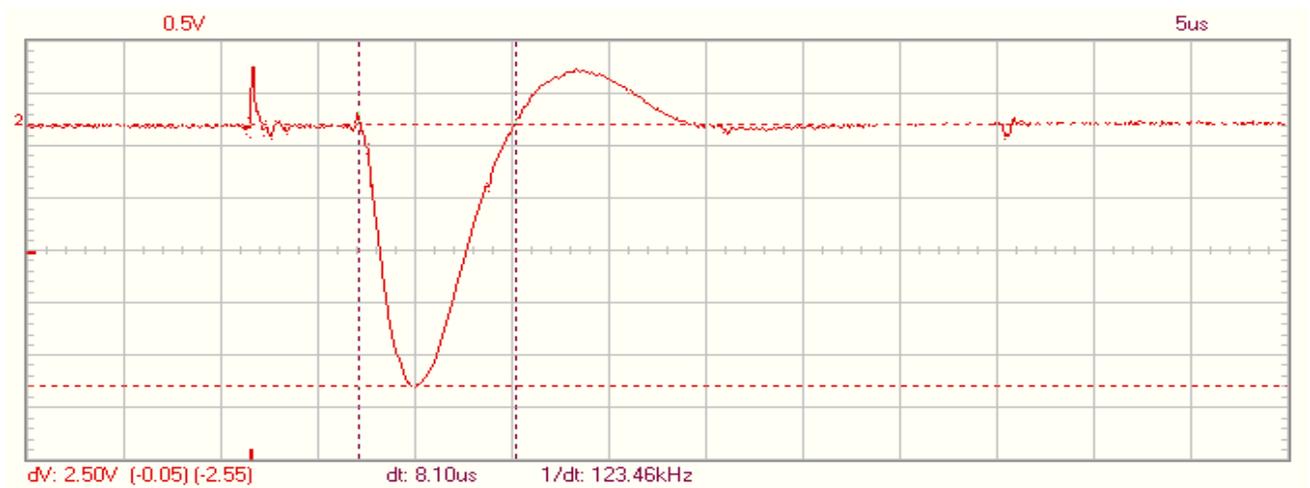


Рисунок 28 – Осциллограмма разрядного тока базовой модели АИПД (коэффициент пересчета в абсолютное значение амплитуды тока равен  $\sim 17$  кА/В)

По результатам проведённых экспериментов базовая лабораторная модель АИПД показала характеристики, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики базовой модели АИПД

№ п/п	W, Дж	P, мН·с	$J_{sp}$ , м/с	$\dot{m}$ , мг/имп
1	69,7	1,43	11637	0,123
2	99,6	2,04	12421	0,164
3	118,13	2,57	13995	0,184

### **3.4 Экспериментальное исследование АИПД с асимметричным разрядным каналом**

Существуют два направления решения задачи повышения удельного импульса тяги АИПД, в какой-то степени пересекающихся друг с другом - это оптимизация электрических параметров разрядной цепи двигателя и использование новых схем ускорительного канала, позволяющих более эффективно организовать рабочий процесс. В данной работе рассматриваются возможности реализации второго подхода.

Как упоминалось ранее, основная проблема обеспечения более высокой эффективности ускорения РТ состоит во временном рассогласовании ввода энергии и массы в ускорительный канал [11]. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился (эффект «послепарения»). Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению среднemasсовой скорости. Добившись уменьшения массы рабочего вещества, поступающего в канал после завершения разряда, можно повысить удельный импульс тяги двигателя. [48].

В процессе исследований АИПД, проводившихся в НИИ ПМЭ МАИ, было установлено, что достаточно часто имеет место существенная неравномерность расхода (до 30%) «левой» и «правой» шашек (сторона шашки определяется исходя из того, что наблюдатель смотрит в РК) рабочего тела без существенного ухудшения характеристик моделей. Наблюдалось даже значительное повышение удельного импульса тяги в случае науглероживания одной из шашек. Сам процесс науглероживания реализуется способом осаждения углеродной плёнки на рабочей поверхности шашек РТ и детали ДУ при завершении разряда. Углеродная плёнка препятствует абляции фторопласта и тем самым характеризуема увеличенным расходом противоположной шашки. Таким образом, имеет место ускорение рабочего вещества поступающего в разряд преимущественно с одной из шашек. Для проверки данного предположения была разработана конструкция и проведены параметрические испытания лабораторной модели АИПД рельсовой геометрии с одной шашкой рабочего тела вместо двух, т.е. с асимметричной схемой разрядного канала – рисунок 29.

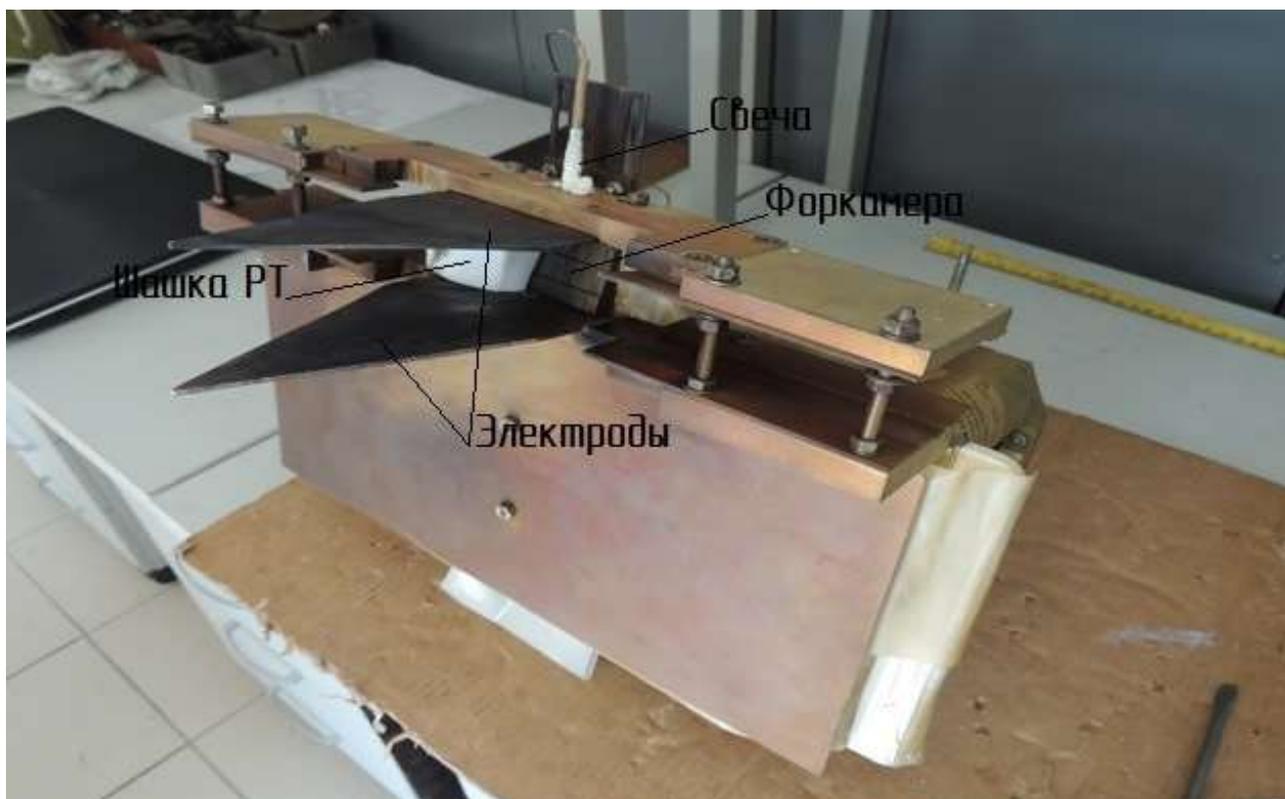


Рисунок 29 – Внешний вид модели АИПД с асимметричным разрядным каналом

Одновременно исследовался базовый лабораторный образец АИПД базовой симметричной схемы при тех же геометрических размерах разрядного канала и энергиях разряда  $W$ .

Полученные результаты для двигателя асимметричной схемы представлены в таблице 6, для симметричной схемы – в таблице 7.

Таблица 6 -Характеристики лабораторной модели АИПД с асимметричным разрядным каналом при различных энергиях конденсаторной батареи

№ п/п	$W$ , Дж	$P$ , мН·с	$J_{sp}$ , м/с	$m$ , мг/имп
1	117,7	2,25	15200	0,148
2	99,1	1,93	13300	0,145
3	83,2	1,57	11600	0,136
4	69,7	1,24	11000	0,113

Таблица 7 -Характеристики лабораторной модели АИПД с симметричным разрядным каналом при различных энергиях конденсаторной батареи

№ п/п	W, Дж	P, мН·с	J <sub>сп</sub> , м/с	ṁ, мг/имп
1	118,3	2,57	14000	0,183
2	99,6	2,04	12400	0,164
3	83,3	1,70	11500	0,148
4	69,7	1,43	11600	0,123

На рисунках 30 и 31 приведены графики зависимостей единичного импульса тяги и удельного импульса тяги (среднемассовой скорости) моделей от энергии разряда, соответственно. Видно, что при некотором снижении единичного импульса тяги модель с асимметричным разрядом имеет более высокий (в среднем на 15%) удельный импульс тяги.

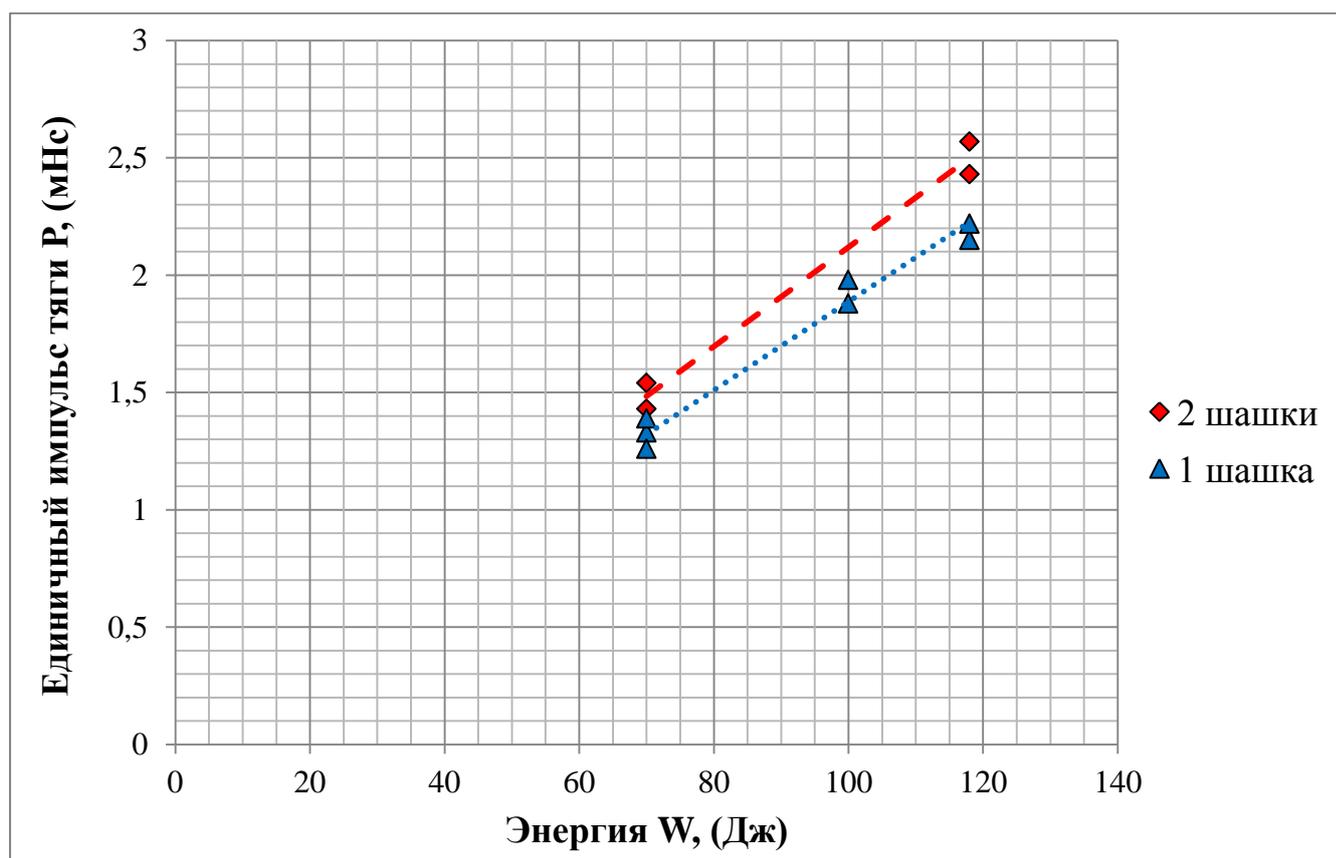


Рисунок 30 – Зависимость единичного импульса тяги от энергии разряда у моделей с асимметричным разрядом и у базовой модели с такими же геометрическими и энергетическими параметрами

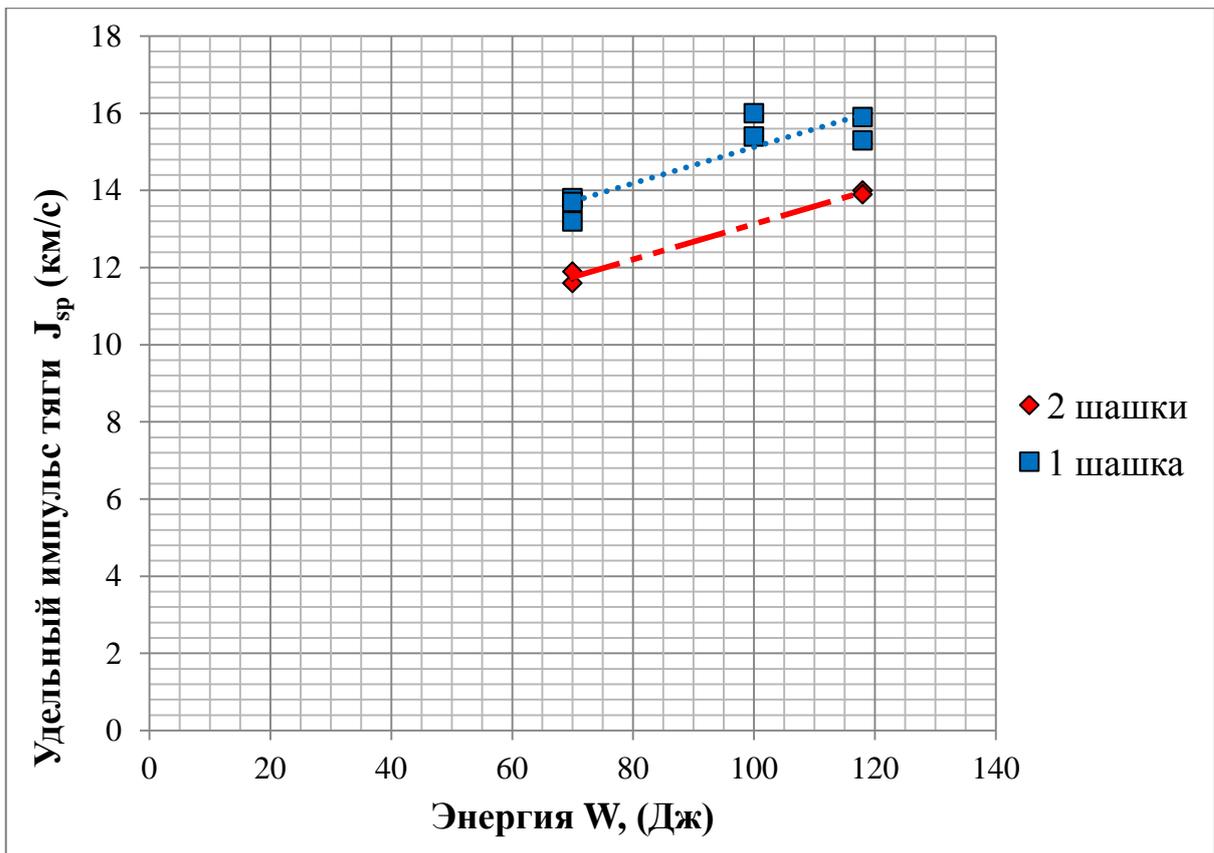


Рисунок 31 – Зависимость среднемассовой скорости плазменного сгустка от энергии разряда у моделей с асимметричным разрядом и у базовой модели с такими же геометрическими и энергетическими параметрами

Осциллограмма разрядного тока модели с асимметричным разрядным каналом, полученная с помощью пояса Роговского с интегратором, представлена на рис. 32.

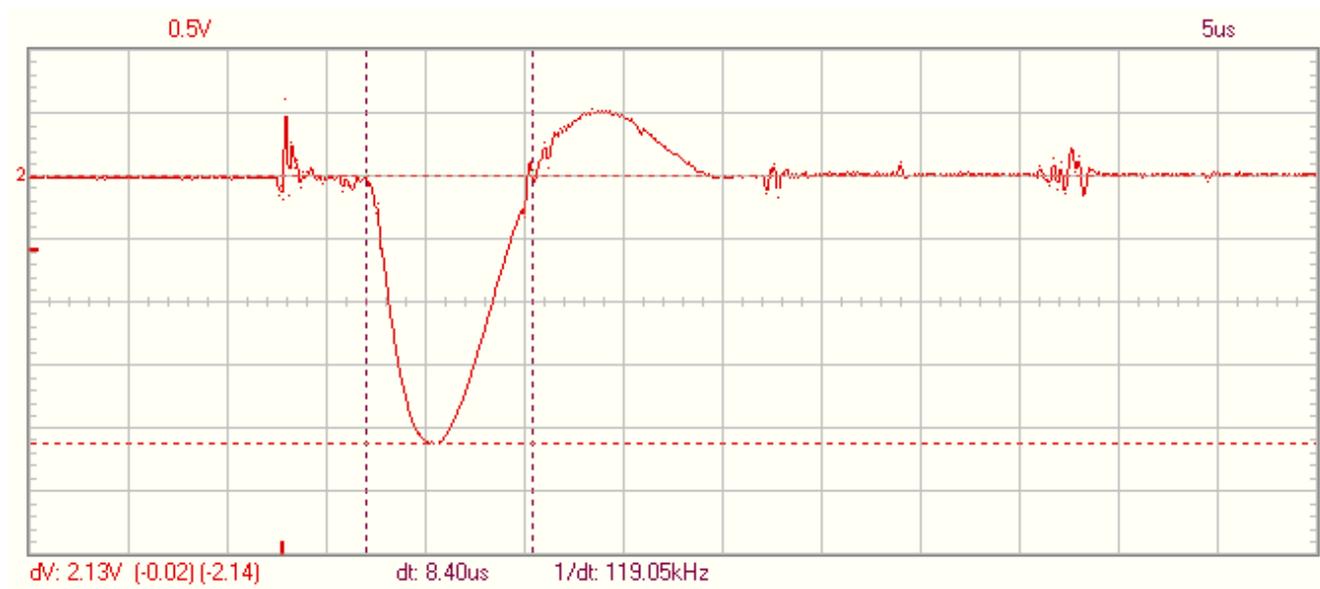


Рисунок 32 – Осциллограмма разрядного тока модели АИПДс асимметричным разрядным каналом (коэффициент пересчета в абсолютное значение амплитуды тока равен  $\sim 17$  кА/В)

Практическая реализация схемы асимметричного разрядного канала в летных прототипах двигателя потребует устранения двух его основных недостатков – это открытая схема канала и отклонение вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от продольной оси двигателя. Открытая схема канала приводит к тому, что часть рабочего вещества покидает его в направлении перпендикулярном оси, в сторону противоположную месту размещения шашки. Интенсивное осаждение продуктов разложения фторопласта на элементах конструкции двигателя повышает риск возникновения паразитных пробоев по образовавшейся углеродной пленке. Для предотвращения этого был разработан вариант канала (рисунок 33) с одной шашкой и стенкой из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления (нитрид бора, алюмооксидная керамика). Эксперименты показали, что в данном случае наблюдается повышение среднемассовой скорости истечения плазмы. Для проверки данного предположения и работоспособности модели со стенкой при длительном функционировании необходимо провести дополнительные исследования.

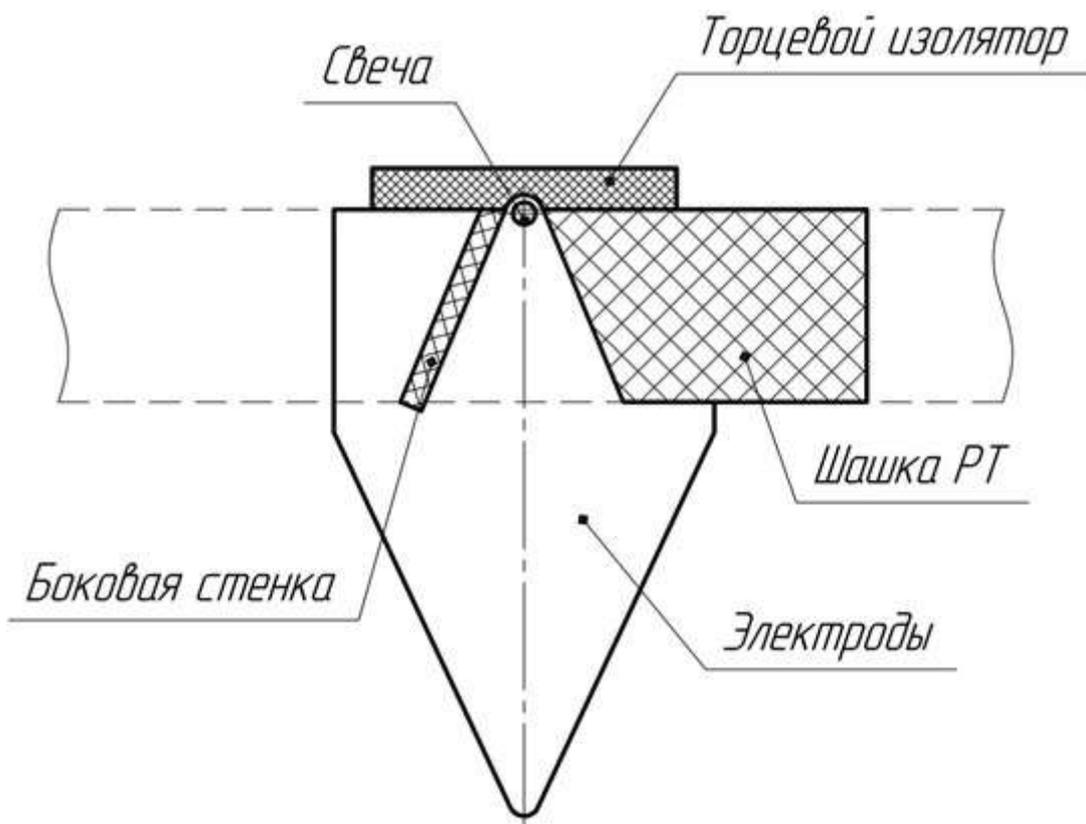


Рисунок 33 – Схема канала с асимметричным разрядом и керамической боковой стенкой

Факт отклонения вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от продольной оси (изображена на рисунке 34 штрих-пунктирной линией) двигателя асимметричной схемы был установлен при изучении характера привязки разряда к поверхности электродов. На фотографии, приведенной на рисунке 34, видно, что направление средней линии расположения катодных пятен не совпадает с направлением продольной оси электрода, которая обозначена на рисунке как «направление истечения потока плазмы». Истечение потока РТ происходит в секторе, выделенном двумя синими штриховыми линиями, показанными на рисунке 34, а значит несимметрично к центральной плоскости РК. При работе двигателя классической схемы (с двумя шашками) данная линия совпадает с продольной осью электрода. Результирующим выводом вышесказанного может быть схема истечения потока плазмы в модели с асимметричным разрядом, представленная на рисунке 35.

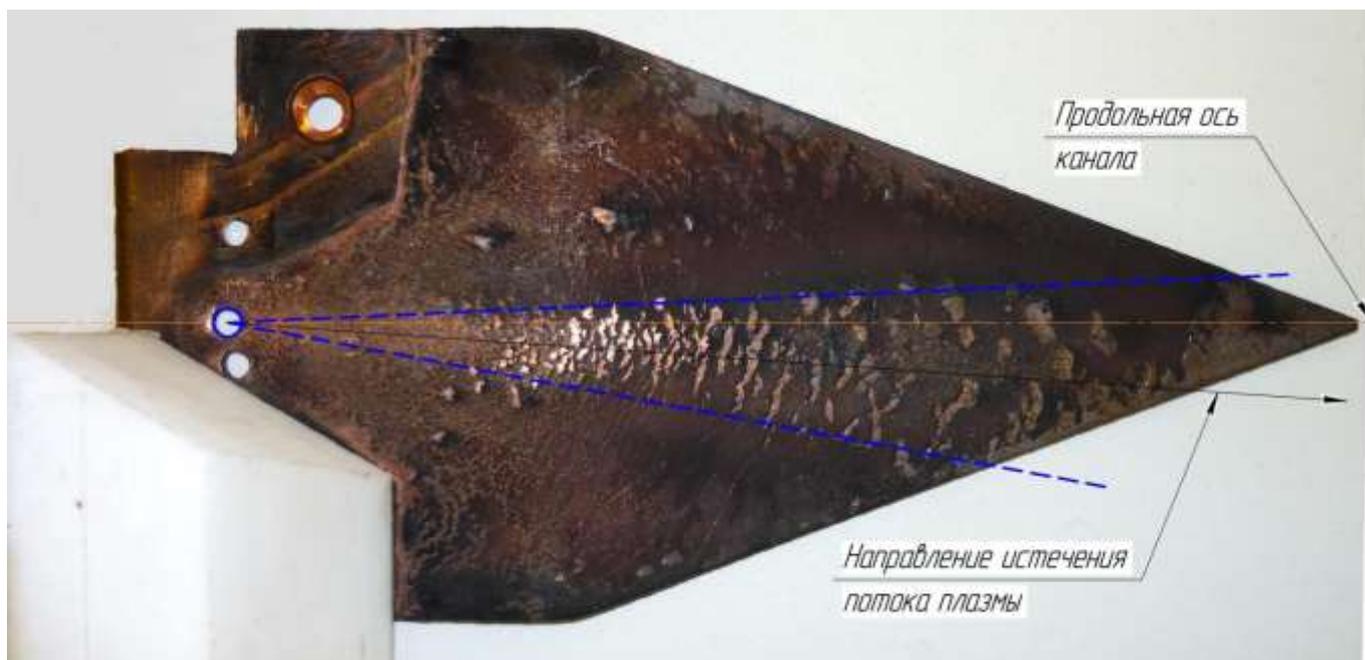


Рисунок 34 – Катод РК после работы. Условно изображены ось симметрии канала и средняя линия распространения катодных пятен

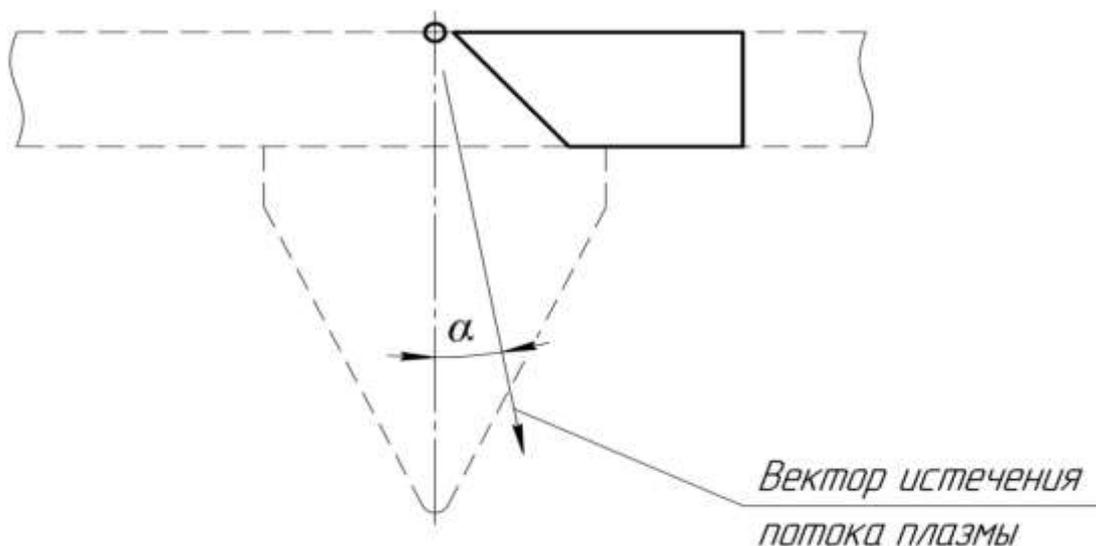


Рисунок 35 – Схема истечения потока плазмы в модели с асимметричным разрядом

Как можно понять из рисунка 33, основное направление истечение плазмы происходит под углом  $\alpha$  к центральной плоскости РК и, как следствие, смещению вектора тяги, что в некоторой степени усложняет постановку такого рода АИПД на КА, ввиду постоянной необходимости изменения угла расположения РК к центру масс аппарата.

### 3.5 Фотодиагностика АИПД с асимметричным разрядным каналом.

Для более подробного исследования данного явления использовалась методика визуализации потока плазмы с помощью заостренного клина. Его суть заключается в размещении в струе плазмы клина, на острие которого генерируются характерные для сверхзвукового потока ударные волны, хорошо видимые на фотоснимках. По углу наклона ударных волн к продольной оси РК можно определить направление вектора скорости потока и число Маха  $M=1/\sin(\varphi/2)$ , где  $\varphi$  - угол между ударными волнами. По углу наклона биссектрисы ударных волн к продольной оси X двигателя можно оценить угол расходимости потока в плоскости XY. При проведении эксперимента в качестве клина применялась заостренная пластина из оксида бора. Максимальная толщина клина составляла 2 мм, ширина - 40 мм, угол заточки острия  $\sim 10^\circ$ . Клинок перемещался в потоке по оси Y с интервалом 15 мм. Съёмка потока плазмы производилась через фланец вакуумной камеры, изготовленный из кварцевого стекла. При этом другие фланцы были закрыты непроницаемыми для лучей света шторками. Для получения снимков применялась фотокамера Canon D650, установленная на штативе. Параметры настройки фотокамеры подбирались таким образом, чтобы максимально закрыть диафрагму (таким образом, избегали засвечивания кадра) и выдержкой 4 с. При этом лабораторная модель АИПД запускалась с частотой импульсов 0,25 Гц. Внешний вид скачков уплотнения представлен на рисунках 36 и 37 при различном положении клина на оси Y.

В процессе данной работы было проведено исследование влияния изменения расположения канала относительно продольной оси электродов на величину отклонения потока плазмы. На рисунке 38 приведена схема расположения шашки и свечи и направление их смещения относительно продольной оси электродов.

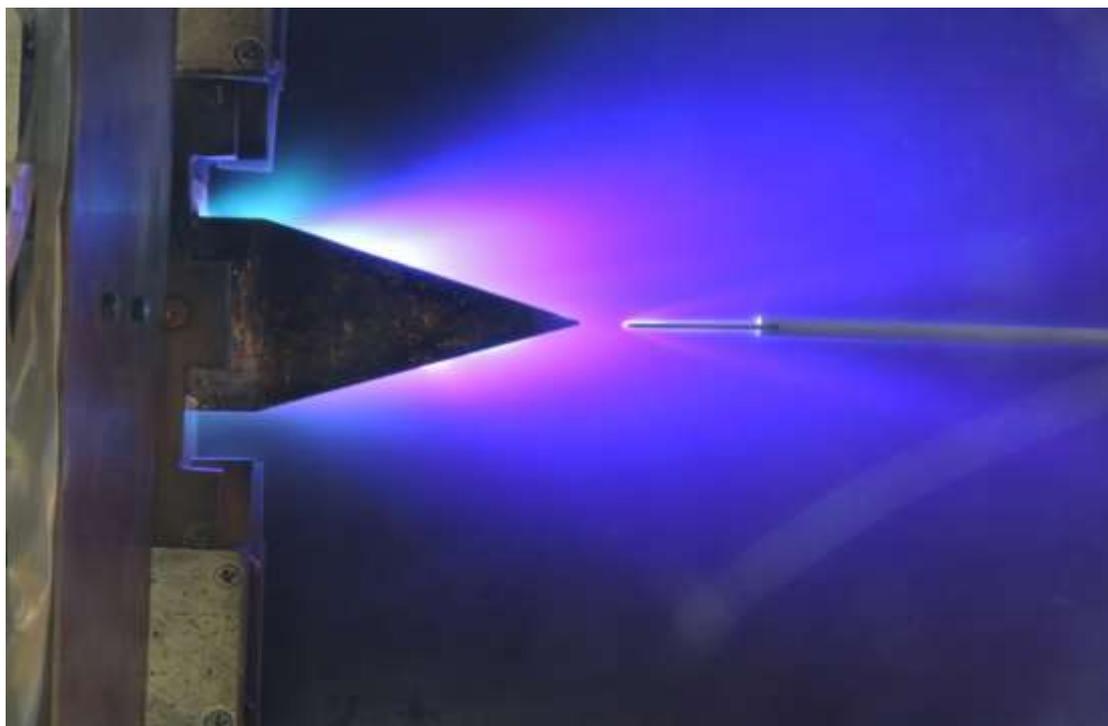


Рисунок 36 – Истечение плазмы из модели с одной шашкой, при положении клина на продольной оси канала (разряд асимметричный)

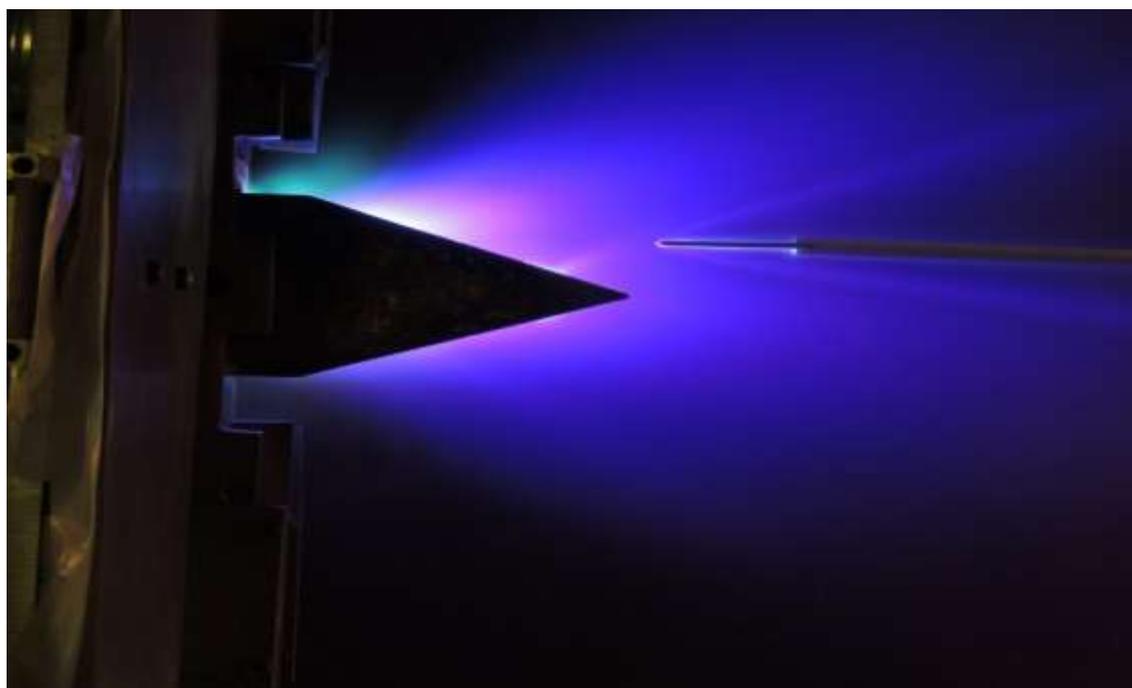


Рисунок 37 – Истечение плазмы из модели с одной шашкой, при положении клина на расстоянии 30 мм от продольной оси канала (разряд асимметричный)

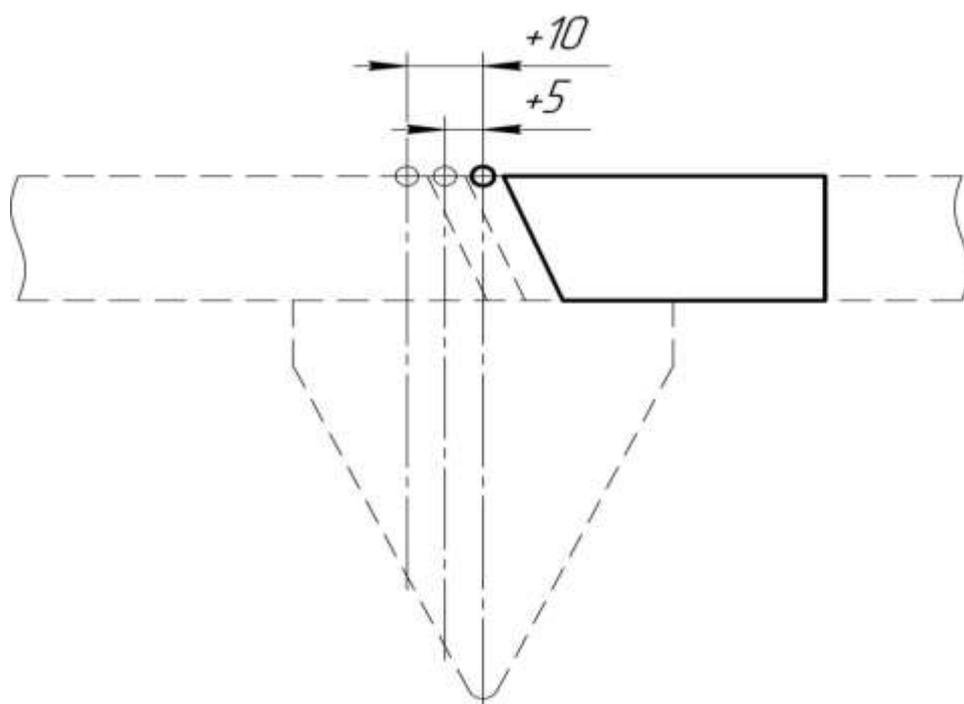


Рисунок 38 – Схема смещения шашки и свечи поджига относительно продольной оси электродов X

Наименьшему углу отклонения потока плазмы соответствует вариант смещения шашки и свечи на 5 мм относительно их исходного состояния (0 мм).

На рисунке 39 приведено характерное поле направлений истечения потока плазмы для асимметричного разряда при смещении свечи поджига на 5 мм от продольной оси разрядного канала. Это соответствует случаю наименьшего отклонения потока плазмы от оси по сравнению с другими вариантами размещения свечи и шашки.

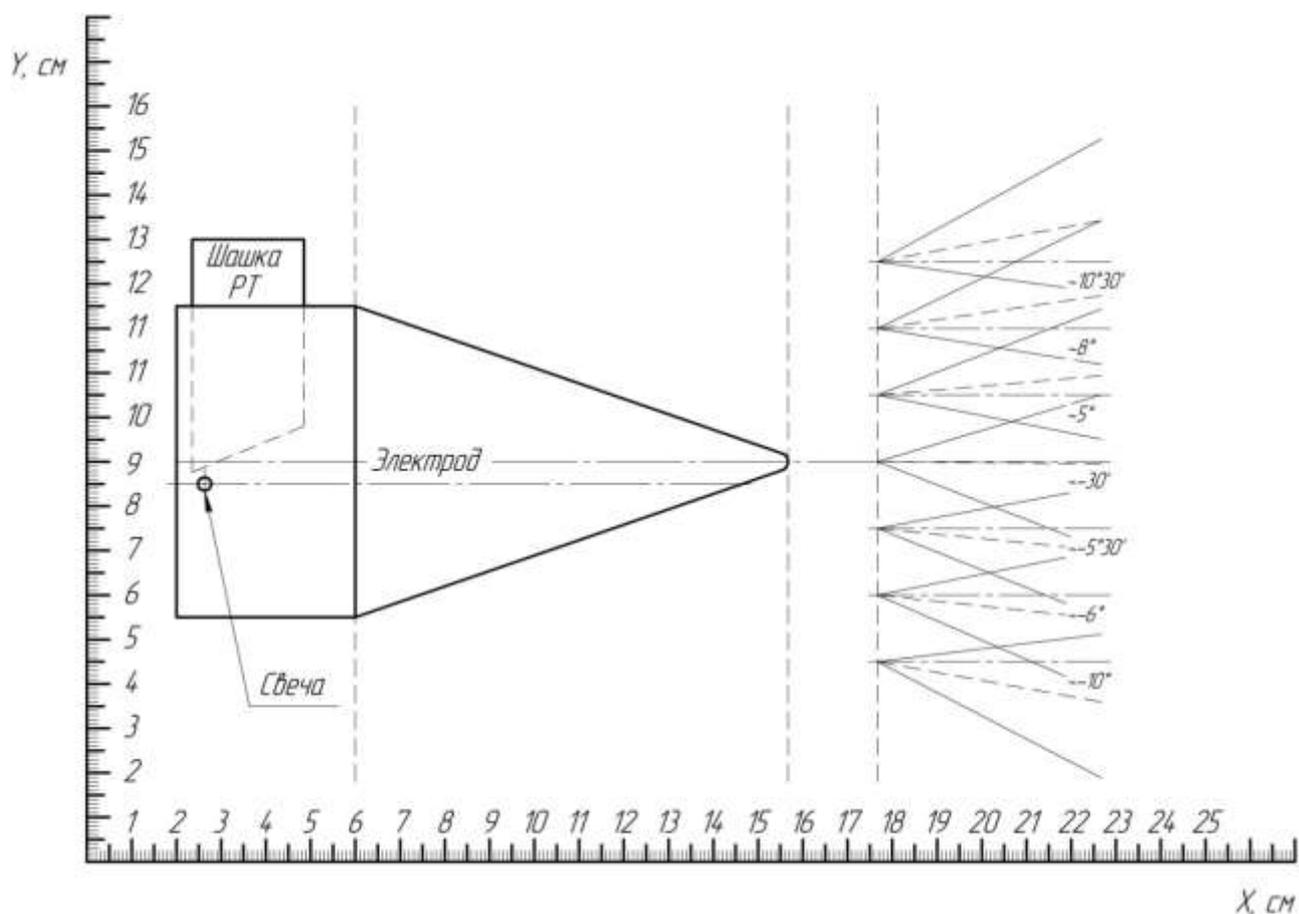


Рисунок 39 – Поле направлений скоростей истечения, соответствующее смещению свечи относительно центра РК на 5 мм

Для более подробного изучения развития разряда проводились съёмки развития разряда при помощи высокоскоростной камеры (ВСК). Результаты съёмки представлены на рисунке 40 при виде на РК сверху.

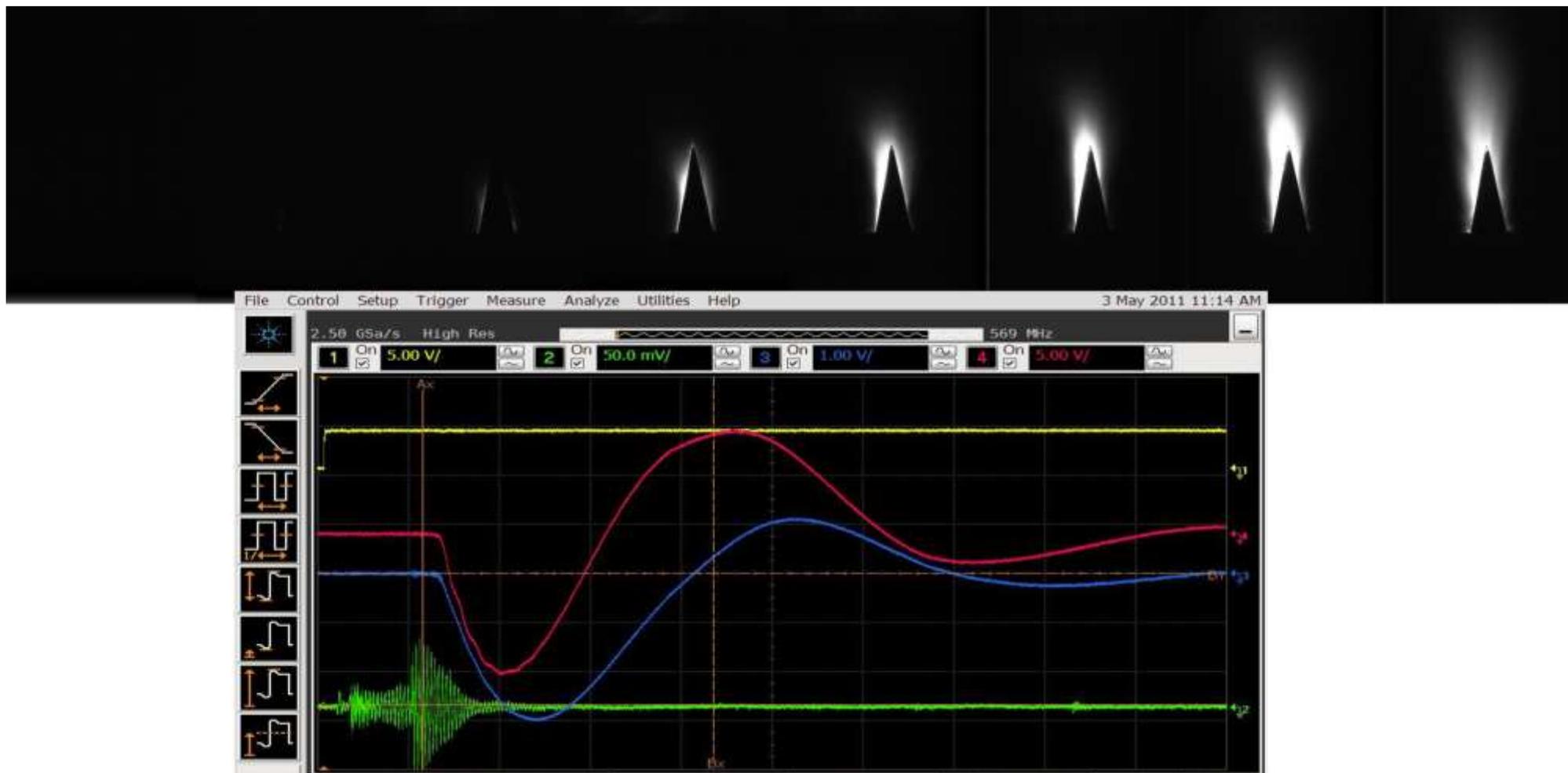


Рисунок 40 – Съёмка разряда в модели с одной шашкой при помощи ВСК (вид сверху) с осциллограммой тока.

На снимках представлена съёмка разряда при помощи высокоскоростной камеры. Фотоснимки в верхней части рисунка 40 иллюстрируют развитие разряда в РК при виде сверху. Из представленных снимков можно сделать вывод, что развивающийся поток плазмы имеет уклонение к левой стороне электродов, тем самым развиваясь вдоль шашки РТ (которая также находится с левой стороны). В нижней части рисунка 38 представлены осциллограммы тока, которые снимались одновременно со съёмкой ВСК. Сплошной вертикальной линией здесь (в поле осциллограммы) отображён момент начала съёмки ВСК, пунктирной вертикальной линией представлен момент завершения съёмки. Синяя и красная кривая осциллограммы – это осциллограммы тока снятые с двигателя. Красная осциллограмма есть прямой сигнал с пояса Роговского, синяя осциллограмма – сигнал с пояса Роговского полученный через интегратор. Зелёная кривая – это осциллограмма разряда в цепи поджига.

При соотнесении осциллограммы со снимками получается следующее:

Первые два снимка соответствуют началу разряда и срабатыванию свечи поджига. 3-й и 4-й кадры соответствуют процессу плазмообразования в канале и проходу первичного сгустка плазмы к концу электродов, а на осциллограмме в этот момент – максимальному разрядному току первого полупериода. При этом надо отметить, что уже визуально имеется отклонение потока плазмы на левую сторону (сторону нахождения шашки РТ). 5-й и 6-й кадры на осциллограмме соответствуют окончанию первого полупериода и началу второго. Происходит истечение основного сгустка плазмы из разрядного канала. 7-й и 8-й кадры соответствуют максимальному току второго полупериода на осциллограмме и выходу сгустка плазмы из разрядного канала. На последнем (8-м кадре) можно уже наблюдать потоки плазмы, которые имеют меньшую скорость истечения нежели основной поток (их скорость близка к тепловой скорости истечения). Как уже отмечалось ранее, на кадрах с 4-го по 8-й наблюдается прохождение потока вдоль левой стороны разрядного канала, что свидетельствует о смещении потока плазмы в эту сторону при использовании асимметричной схемы.

Устранить отклонение усредненного вектора тяги от оси канала при использовании в двигателе асимметричного разряда можно также схемным путем, используя вместо одного два поочередно работающих асимметричных разряда. В этом случае вектор средней тяги будет направлен по оси, так как каждый из поочередно вылетающих сгустков плазмы отклоняется в свою сторону на одинаковый угол. Внешний вид модели с двумя асимметричными разрядами приведен на рисунке 41. Здесь использовались две поочередно работающие свечи поджига, разнесенные друг от друга на расстояние  $10\div 30$  мм для минимизации их влияния друг на друга.

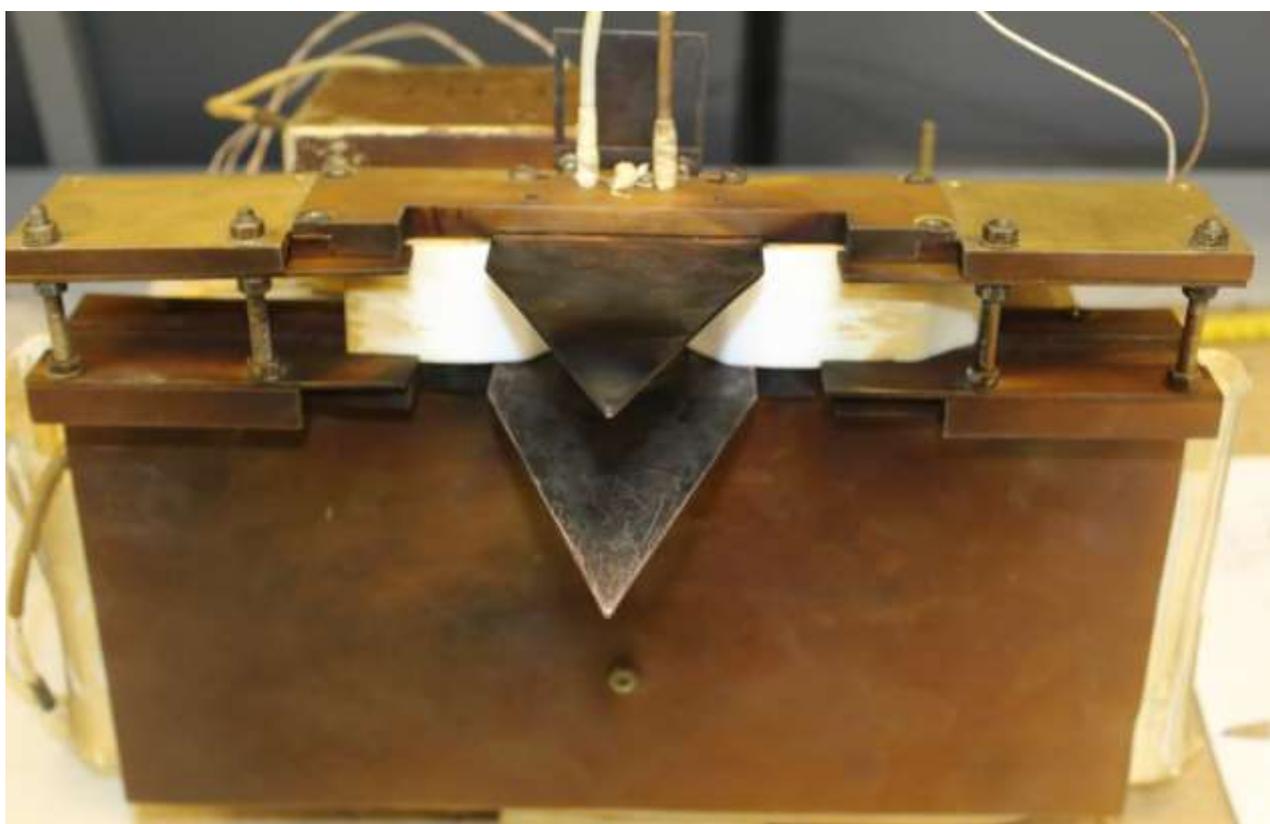


Рисунок 41 – Лабораторная модель АИПД с двумя поочередно работающими свечами

Результаты, полученные при экспериментах с двумя свечами, для наглядности помещены вместе с результатами базовой модели в таблице 8.

Таблица 8 –Характеристики модели АИПД с двумя свечами и базовой модели

№ п/п	Модель-модификация	W, Дж	P, мН·с	J <sub>sp</sub> , м/с	m, мг/имп	Расстояние между шашками, мм	Срабатывание свечей
1	две свечи	117,4	1,71	11300	0,151	30	одновременное
2	две свечи	117,5	2,16	12900	0,167	30	поочерёдное
3	две свечи	117,8	2,27	13800	0,165	20	поочерёдное
4	базовая	118,1	2,57	14000	0,183	5	одна свеча
5	базовая	118,1	2,43	13900	0,180	5	одна свеча

Из представленных данных видно, что характеристики модели с двумя свечами несколько хуже, чем у базовой модели. Это связано с воздействием излучения из сгустка плазмы, возникающего при срабатывании одного асимметричного разряда, на противоположную шашку. В результате возникает дополнительный расход рабочего вещества, практически не участвующий в процессе создания тяги двигателя. Для устранения влияния асимметричного разряда на противоположную шашку можно либо разделить канал по продольной оси перегородкой из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления, либо рассмотреть схемы с секционированными электродами и существенно бóльшим расстоянием между шашками рабочего тела, чем у исследовавшейся модели.

По результатам построения полей направления скоростей истечения, был посчитан вероятный угол отклонения потока плазмы в ассиметричной модели. Максимальная величина данного угла достигает до  $6^{\circ}30'$ , как на рисунке 34. При перерасчёте потери скорости истечения, а также единичного импульса относительно вектора продольной плоскости разрядного канала через косинус угла отклонения, потеря составляет до 0,4%, что является пренебрежимо малой величиной (прибавка к скорости при 15200 м/с составляет всего 91,2 м/с), а значит данной величиной мы можем пренебречь, поскольку она крайне мала.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что схема двигателя с асимметричным разрядом позволяет повысить удельный импульс тяги в среднем на 15% по сравнению с классической схемой и при соответствующей доработке может быть использована в опытно-конструкторских работах в области АИПД.

## Глава 4. Экспериментальное исследование моделей АИПД с модернизированными токоподводами.

### 4.1 Экспериментальное исследование АИПД с двойным обратным токоподводом.

Как уже упоминалось в более ранних работах [29], для получения скоростей истечения в АИПД более  $2 \times 10^4$  м/с необходимо применение улучшенных систем ускорения плазмы. С этой целью была разработана и экспериментально исследована модель АИПД с новой схемой подвода разрядного тока к ускорительному каналу.

В основу лабораторной модели был положен базовый разрядный канал с рельсотронной схемой ускорения и боковой подачей рабочего тела. Новшеством является система шин, позволяющая за счёт увеличенного количества проводников, создающих магнитное поле, более эффективно ускорять плазменный сгусток. Лабораторная модель АИПД данного типа представлена на рисунке 42.

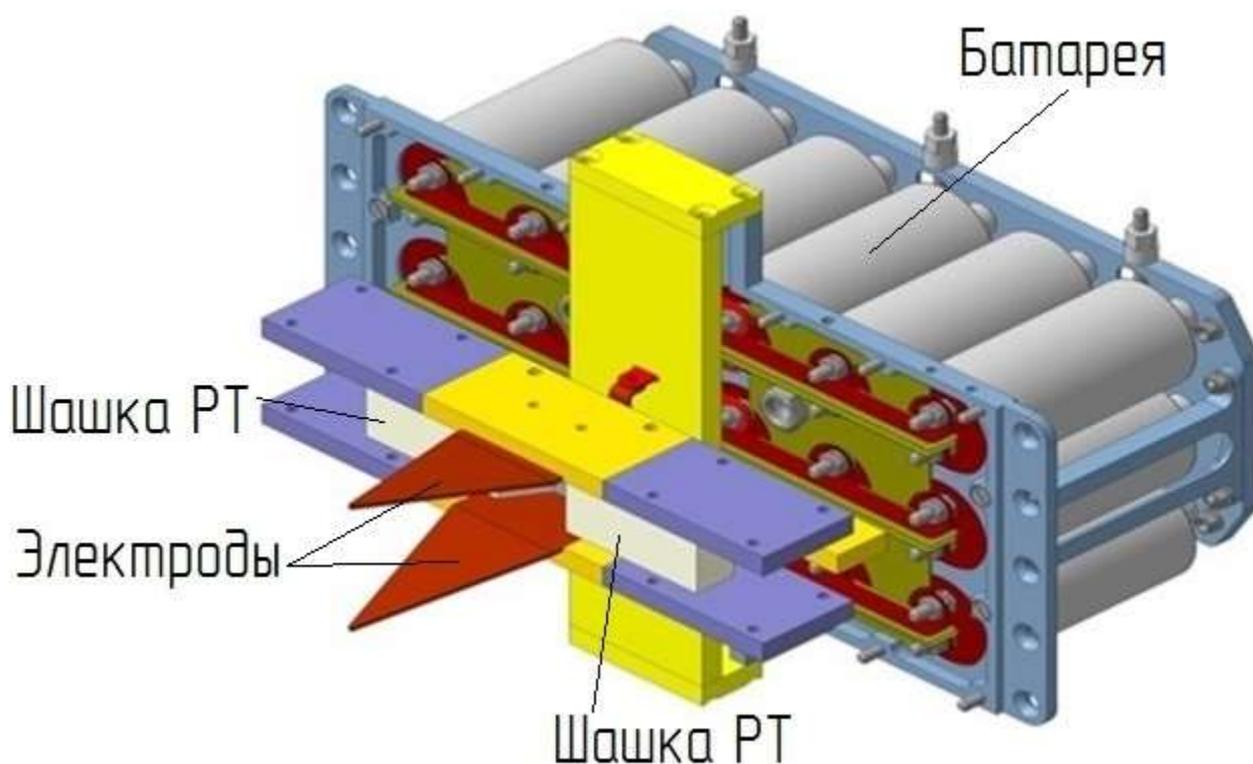


Рисунок 42 – Лабораторная модель АИПД с двумя токоведущими шинами

Принципиальная электрическая схема разрядного контура базового АИПД представлена на рисунке 43. Новая схема разрядного контура АИПД с двумя токоведущими шинами представлена на рисунках 44. Внешний вид экспериментальной модели и расположение токоведущих шин представлены на рисунках 45(а, б), 46 соответственно.

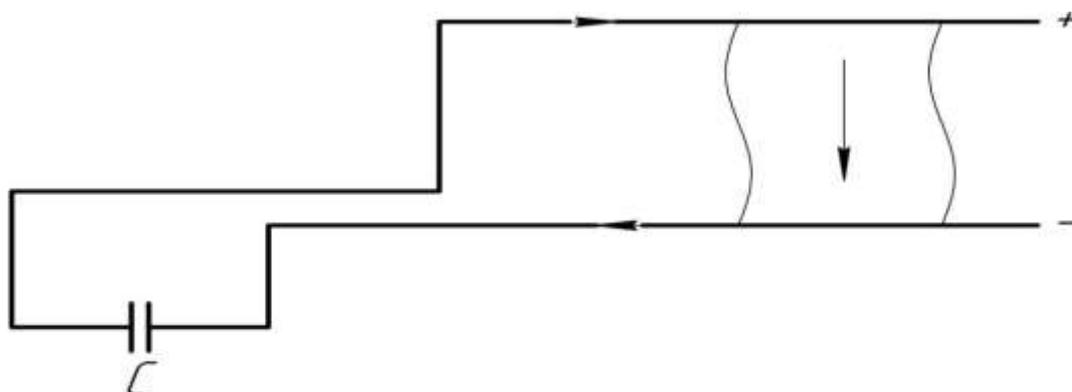


Рисунок 43 – Электрическая схема разрядного контура стандартного АИПД

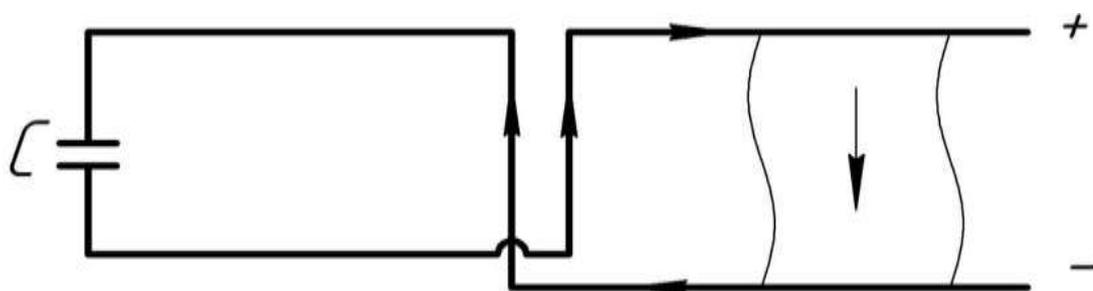


Рисунок 44 – Электрическая схема разрядного контура АИПД с двумя токоподводами

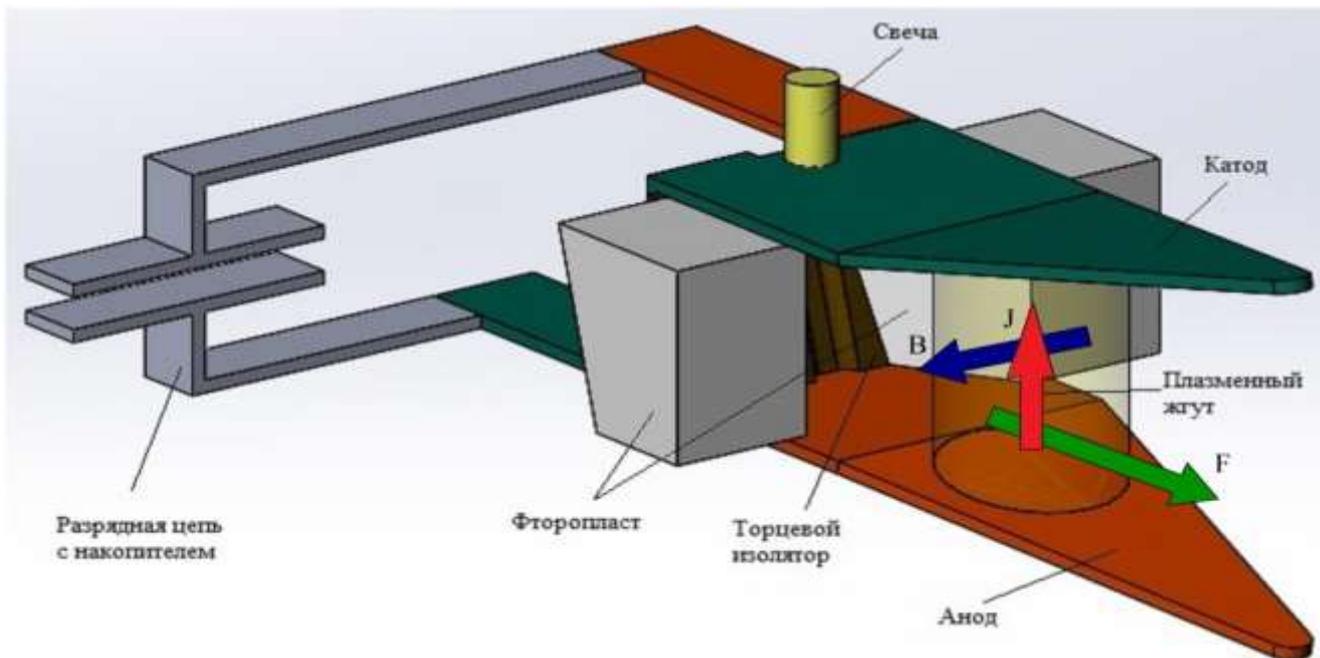


Рисунок 45(а) – Рисунок общего вида АИПД с двумя токоподводами (вид в разрядный канал)

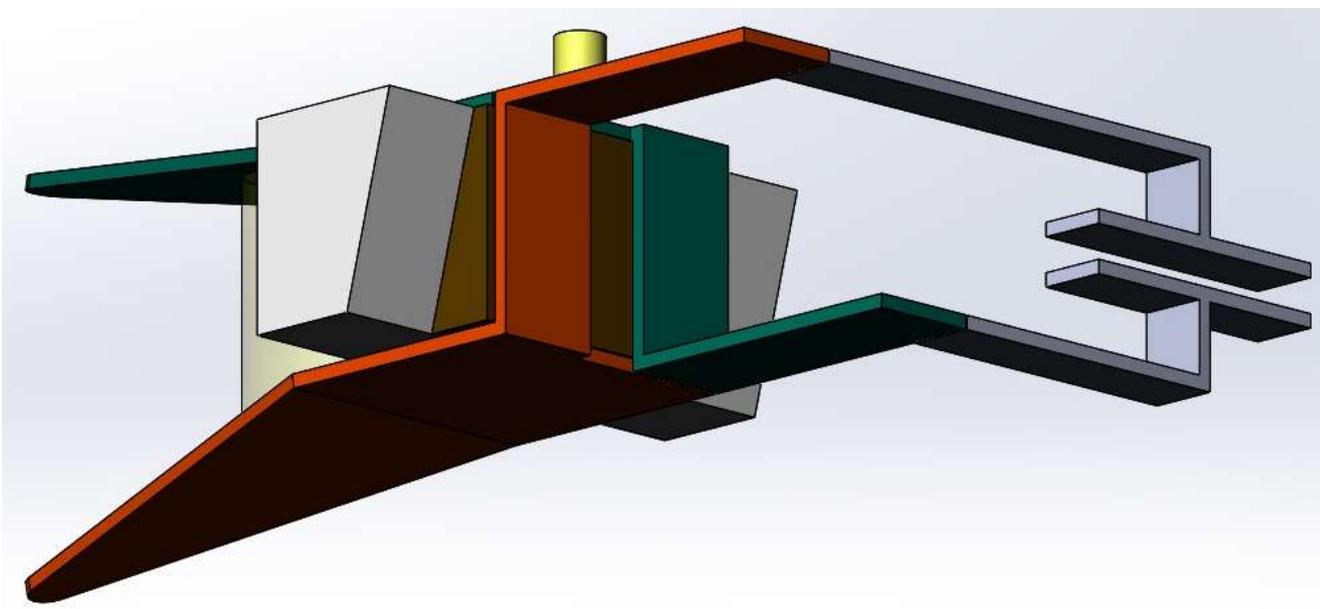


Рисунок 45(б) – Рисунок общего вида АИПД с двумя токоподводами (вид с обратной стороны в разрядный канал)



Рисунок 46 – Внешний вид лабораторной модели АИПД с двумя шинами обратного токоподвода

Как видно из представленных схем, в базовом разрядном контуре АИПД, как на рисунке 43, имеется только один обратный токопровод, который взаимодействует со сгустком плазмы. В модели с модернизированными токоведущими шинами, как на рисунке 44, имеются два параллельно расположенных обратных токопровода, по которым течет ток разрядного контура, что с точки зрения создания магнитного поля, эквивалентно двукратному увеличению разрядного тока, но только в непосредственной близости с торцевым изолятором и, как следствие, торцевыми токоведущими шинами.

Были проведены экспериментальные исследования лабораторной модели АИПД с разрядным контуром нового типа и, для сравнения, базовой модели с теми же размерами разрядного контура и той же энергией разряда. Как и

следовало ожидать, новая схема разрядного контура имеет существенно бóльшую, по сравнению с базовой, начальную индуктивность ( $\sim 60$  нГн против  $\sim 35$  нГн). Так как начальная индуктивность имеет определяющее значение для эффективности преобразования энергии в разрядных контурах с подвижными проводниками (к которым относятся и разрядные контуры АИПД), была исследована также третья лабораторная модель с тем же разрядным каналом и с обычной ошиновкой, но с начальной индуктивностью, искусственно увеличенной до 60 нГн (рисунок 47).

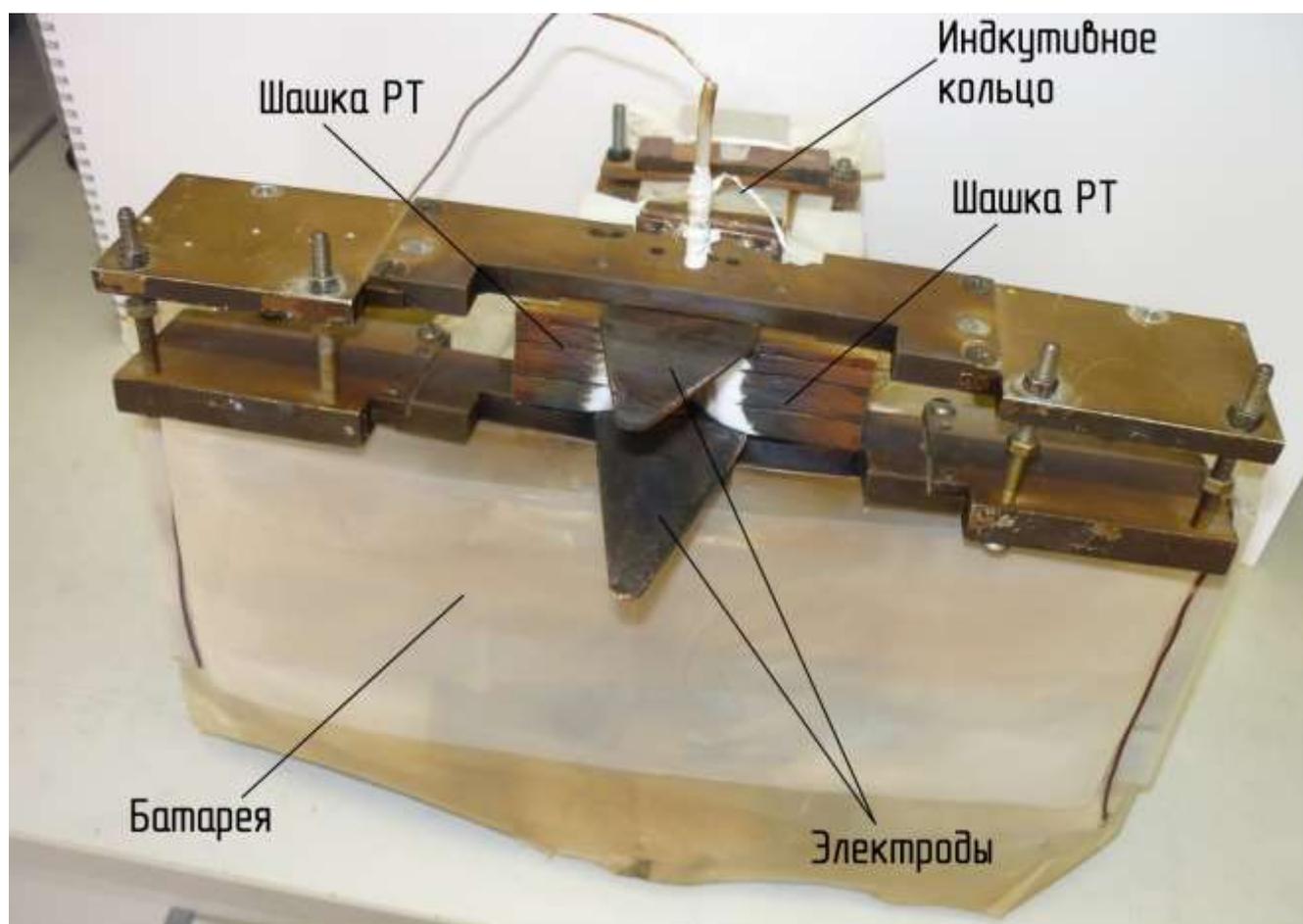


Рисунок 47 – Модель АИПД с искусственно увеличенной до 60 нГн индуктивностью

Более наглядно способ увеличения индуктивности иллюстрирует схема модели с увеличенной индуктивностью, представленная на рисунке 48. Как можно увидеть на рисунке, для увеличения индуктивности применяется дополнительный участок контура, изменение площади которого позволяет изменять величину индуктивности разрядного контура АИПД.

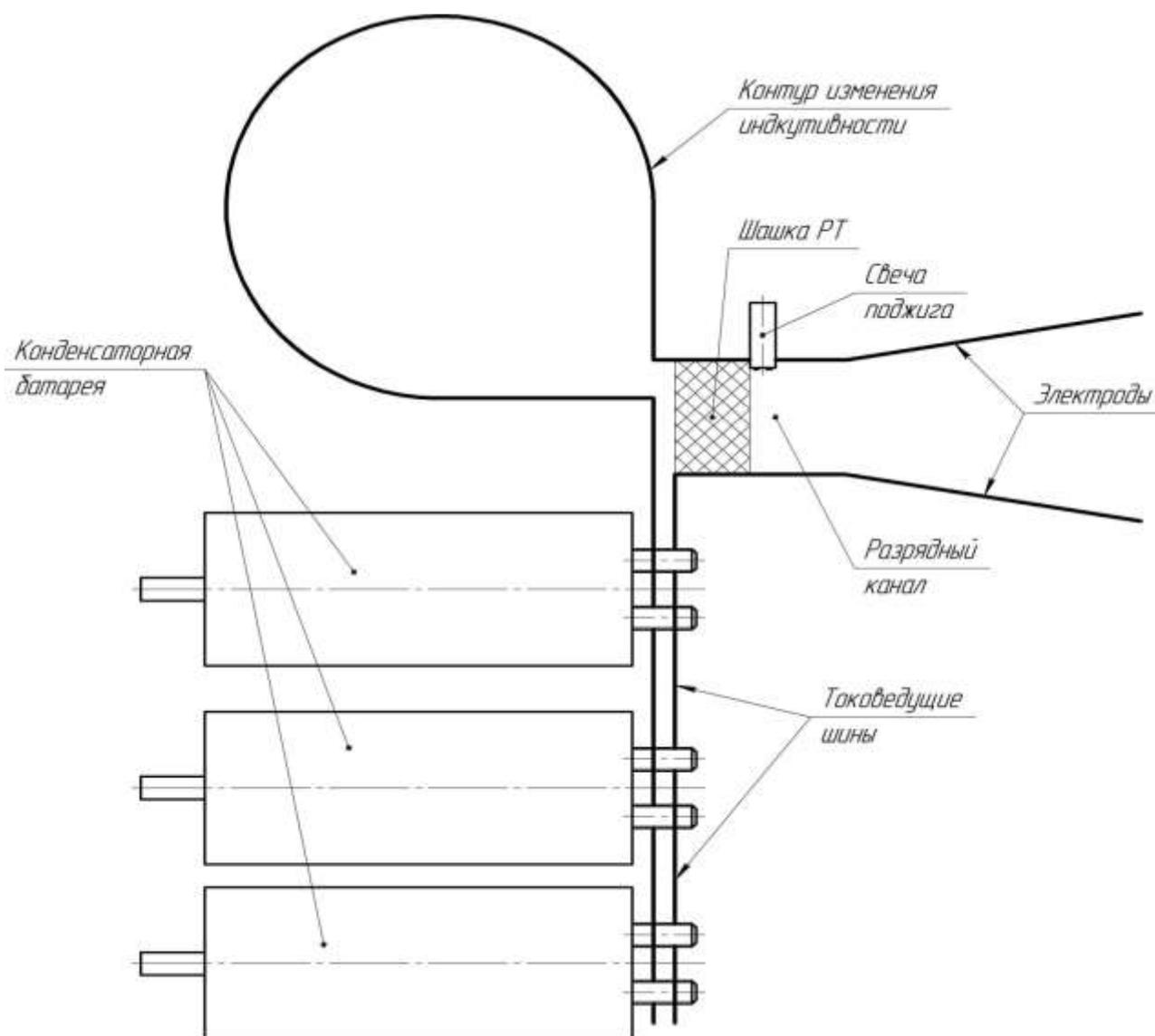


Рисунок 48 – Схема разрядного контура АИПД с искусственно увеличенной до 60 нГн индуктивностью

В процессе исследований измерялись и сравнивались тяговые и расходные характеристики указанных трех лабораторных моделей, а также параметры их разрядных цепей – емкость и напряжение зарядки конденсаторной батареи, начальная индуктивность разрядного контура, осциллограмма разрядного тока.

На рисунке 49 приведены осциллограммы разрядного тока лабораторной модели АИПД с новым типом ошиновки.

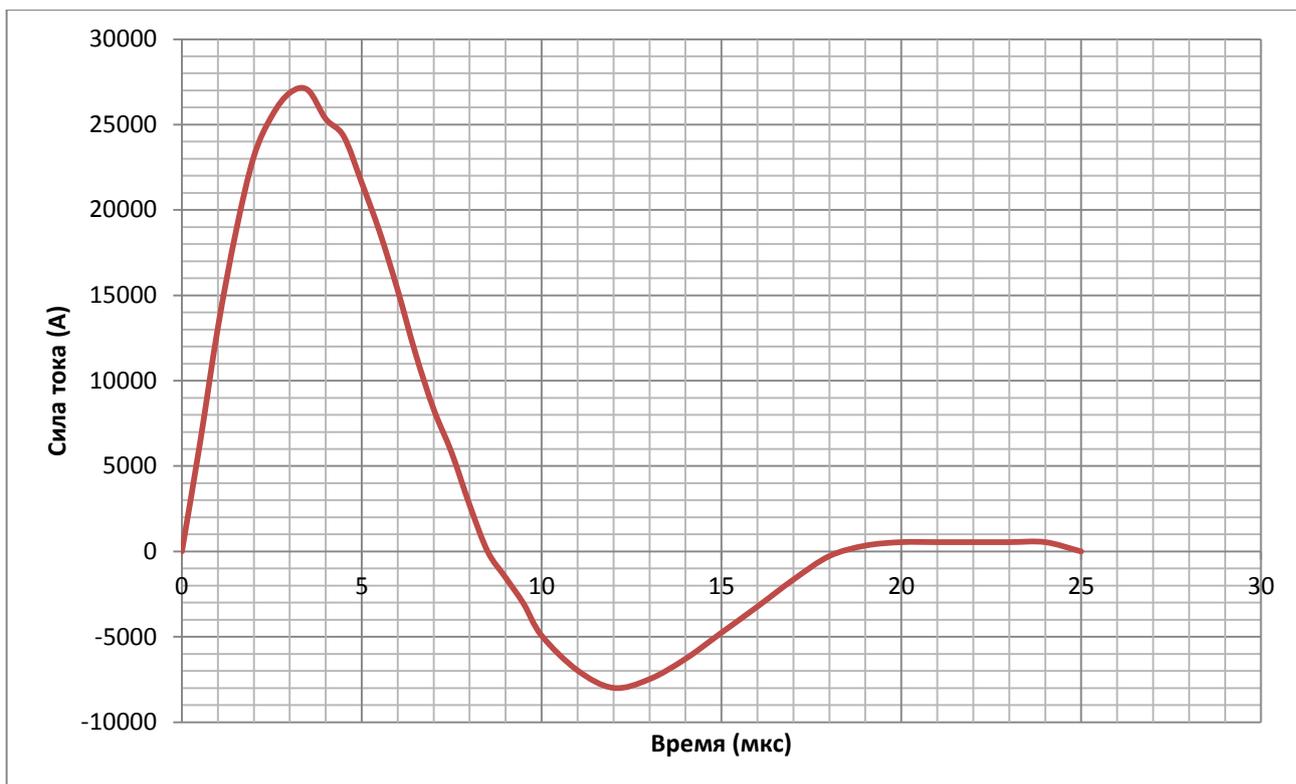


Рисунок 49 – Осциллограмма разрядного тока модели АИПД с двумя шинами обратного токопровода (напряжение 1200 В, начальная индуктивность 60 нГн.)

Как видно на рисунке 49, модель с ошиновкой нового типа имеет, как и стандартный АИПД, устойчивый разряд с двумя полупериодами тока.

Для сравнения на рисунках 50 и 51 приведены осциллограммы разрядного тока базовой модели АИПД и модели с индуктивностью, искусственно увеличенной до 60 нГн. На модели с двумя шинами обратного токопровода отмечено увеличение общего времени разряда, что положительно сказывается на согласовании ввода в разрядный канал массы аблирующего рабочего тела и разрядного тока.

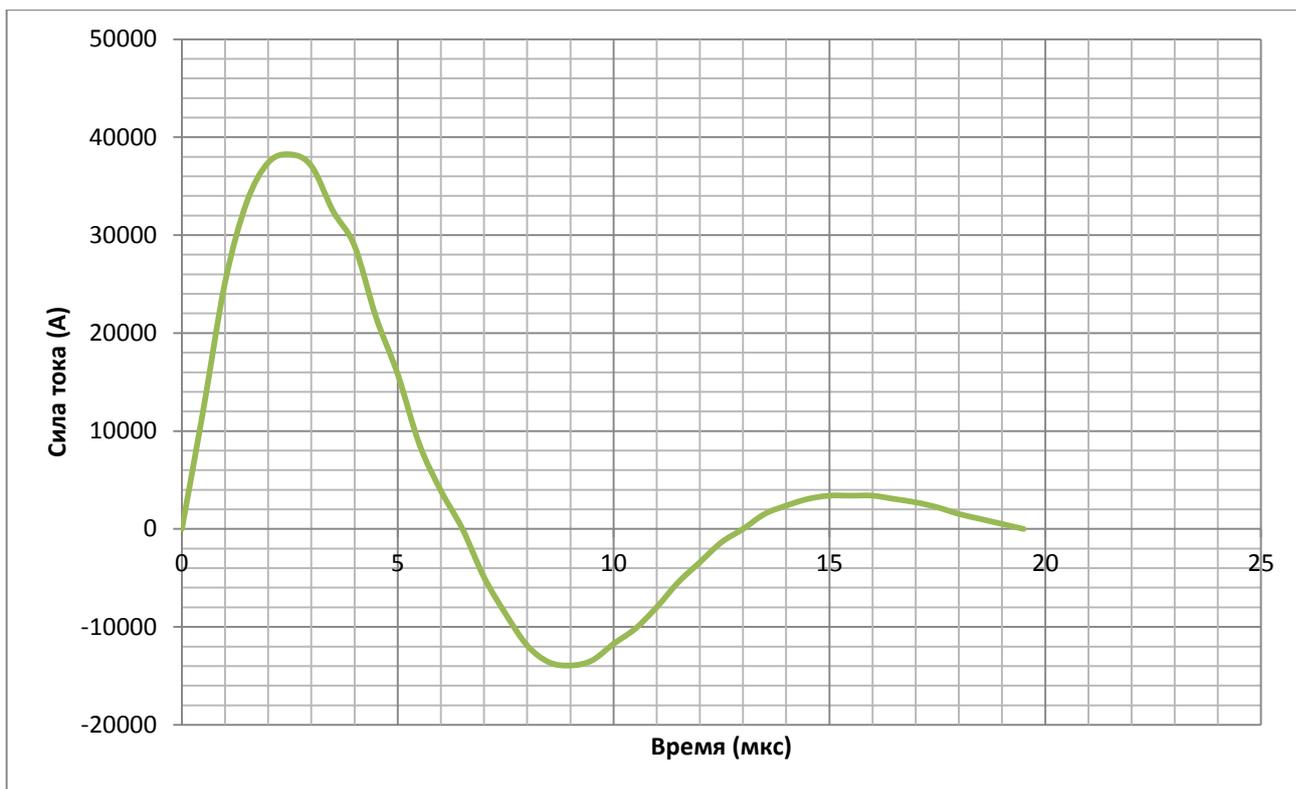


Рисунок 50 – Осциллограмма тока базовой модели АИПД  
(напряжение 1200 В, начальная индуктивность 35 нГн)

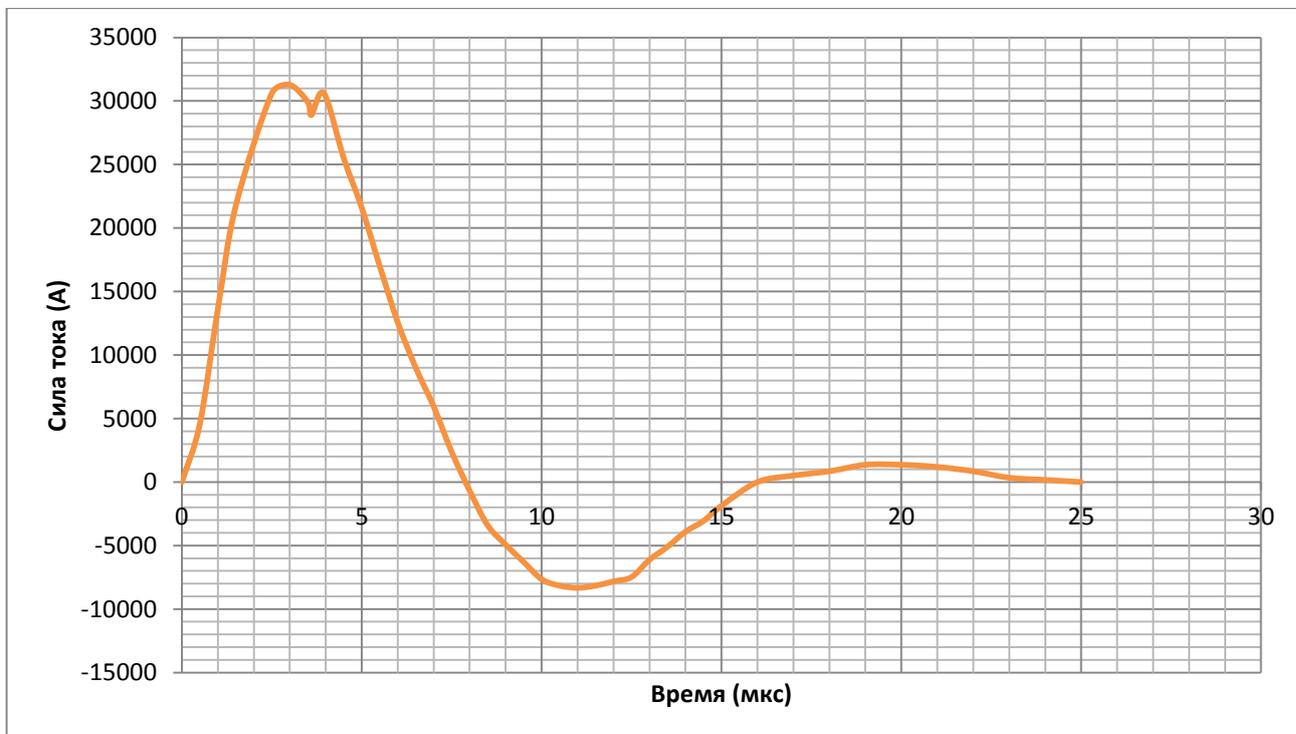


Рисунок 51 – Осциллограмма тока модели АИПД с искусственно увеличенной индуктивностью (напряжение 1200 В, начальная индуктивность 60 нГн)

Для анализа полученных результатов проведено сравнение рисунков 49 с осциллограммой модели с двойным обратным токоподводом и рисунка 50 с осциллограммой базовой модели. Величина максимального тока у модели с двойным обратным токоподводом 25400 А, а у базовой модели – 38000 А. Величина длительности первого полупериода для этих же моделей составляет 8,5 мкс и 6,5 мкс соответственно.

#### **4.2 Расчётный анализ процессов, происходящих в АИПД с двойным обратным токопроводом.**

Для оценки наличия положительного результата от применения в конструкции АИПД схемы с двойным обратным токопроводом следует оценить изменение величины объёмной электромагнитной силы  $F_{ЭМ}$ , ускоряющей плазму в разрядном канале. Величина объёмной электромагнитной силы, как следует из формулы  $F_{ЭМ} = j \times B$ , пропорциональна магнитному полю разрядного тока.

Оценить изменение величины магнитного поля в разрядном канале при применении двойного обратного токопровода можно как экспериментальным, так и расчетным путем.

На первом этапе применялся более простой расчетный способ оценки.

В качестве расчётной модели применялась система из 5 уравнений, описывающих процесс ускорения сгустка плазмы в электродинамическом приближении. [48].

$$m_0 \frac{d^2 v}{dt^2} = \frac{I^2 dL}{2dz} \quad (4.1)$$

$$\frac{dz}{dt} = v \quad (4.2)$$

$$I = -C \frac{dV}{dt} \quad (4.3)$$

$$\frac{dLI}{dt} + R_0 I - V = 0 \quad (4.4)$$

$$L = L_0 + bz \quad (4.5)$$

За этой системой уравнений закрепилось название «приближения Арцимовича». В этом приближении плазменный сгусток условно заменяется твердым подвижным проводником той же массы. В простейшем варианте электродинамического приближения не учитываются силы трения, масса плазменного сгустка  $m_0$  считается постоянной, предполагается, что омическое сопротивление разрядного контура и плазмы постоянно и равно  $R_0$ , и принимается простейший закон изменения индуктивности  $L$  - линейный.

Из приведённых уравнений следуют два уравнения для определения смещения сгустка плазмы  $z$  и разрядного тока  $I$ :

$$m_0 \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{b}{2} I^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2(L_0 + bz)I}{dt^2} + R_0 \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C_0} I = 0 \quad (4.7)$$

Начальные условия для решения задаются в виде (при  $t=0$ )

$$z=0; \frac{dz}{dt} = 0; I=0; V=V_0.$$

Для более простой и наглядной работы с полученными уравнениями их можно привести к безразмерному виду, введя следующие величины:

$$\tau = \frac{t}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad y = \frac{b}{L_0} z; \quad \varphi = \frac{V}{V_0}; \quad \varphi' = \frac{I}{L_0 V_0 \omega_0}; \quad y' = b \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} v$$

Здесь  $\tau$ ,  $y$ ,  $y'$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi'$  - безразмерные величины времени, пути, скорости, напряжения и тока соответственно.

$$\frac{dy'}{d\tau} = q \varphi'^2 \quad (4.8)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = y' \quad (4.9)$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = -\varphi' \quad (4.10)$$

$$\frac{d}{d\tau} [(1 + y)\varphi'] - \varphi = 0 \quad (4.11)$$

В безразмерном виде начальные условия записываются как  $y=0$ ,  $y'=0$ ,  $\varphi'=0$ ,  $\varphi=1$ .

В общем случае даже простейшую систему уравнений Арцимовича, в силу её нелинейности, можно решить только численными методами.

Данная система уравнений решается и позволяет представить визуально осциллограммы тока и изменения скорости. Решение производится с помощью вычислительного продукта Mathcad 14 [48].

В данной безразмерной системе уравнений безразмерная величина  $q$  является так называемым параметром Арцимовича.

$$q = \frac{(x \cdot b)^2 \cdot C^2 \cdot U_0^2}{2 \cdot m \cdot L_0} \quad (4.12)$$

откуда получаем:

$$x = \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot m \cdot L_0}}{b \cdot C \cdot U} \quad (4.13)$$

Чем выше величина параметра  $q$ , тем более высокий электродинамический КПД имеет плазменный ускоритель. Численный коэффициент  $x$ , стоящий при значении  $b$ , показывает изменение магнитного поля, определяемое конструкцией ошиновки. При отсутствии прямых измерений магнитного поля в разрядном канале этот коэффициент может варьироваться в пределах от 1 до 2.

$b$  – величина погонной индуктивности для прямоугольных шин определённой длины, вычисляется согласно формуле:

$$b = \frac{\mu_0}{\pi} \left[ a \cdot \ln \frac{2 \cdot a \cdot l}{a + d} + l \cdot \ln \frac{2 \cdot a \cdot l}{a + d} + 2(d - a - l) \right] \quad (4.14)$$

где  $a$  и  $l$  стороны прямоугольника;  $d$  – его диагональ [48]. Для упрощения модели погонная индуктивность рассчитывалась для шин немерной длины. В этом случае формула погонной индуктивности выглядит следующим образом:

$$b = \frac{\mu a}{h} \quad (4.15)$$

где  $a$  – высота канала,  $h$  – ширина электрода.

Для модели с искусственно увеличенной индуктивностью расчётный параметр Арцимовича равен 0,8, для модели с двумя токопроводами данная величина варьируется в диапазоне от 1 до 2,5, в зависимости от коэффициента  $x$ , стоящего при значении  $b$ .

На графиках, приведенных на рисунке 52, показано сравнение экспериментальных и расчётных осциллограмм разрядного тока для модели с двумя шинами при различных значениях параметра  $q_i$ , соответственно, коэффициентах  $x$ .

Удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных осциллограмм наблюдается при значениях коэффициента  $x$ , находящихся в пределах от 1,2 до 1,6. Таким образом, расчётный анализ показывает, что новый тип ошиновки позволяет увеличить магнитное поле и, соответственно, объемную электромагнитную силу в разрядном канале на величину в диапазоне от 20 до 70 процентов.

Для практического сравнения полученных результатов производилось расчётным способом нахождение скоростей для моделей с двумя шинами и модели с искусственно увеличенной индуктивностью. Расчётный график скоростей представлен на рисунке 53.

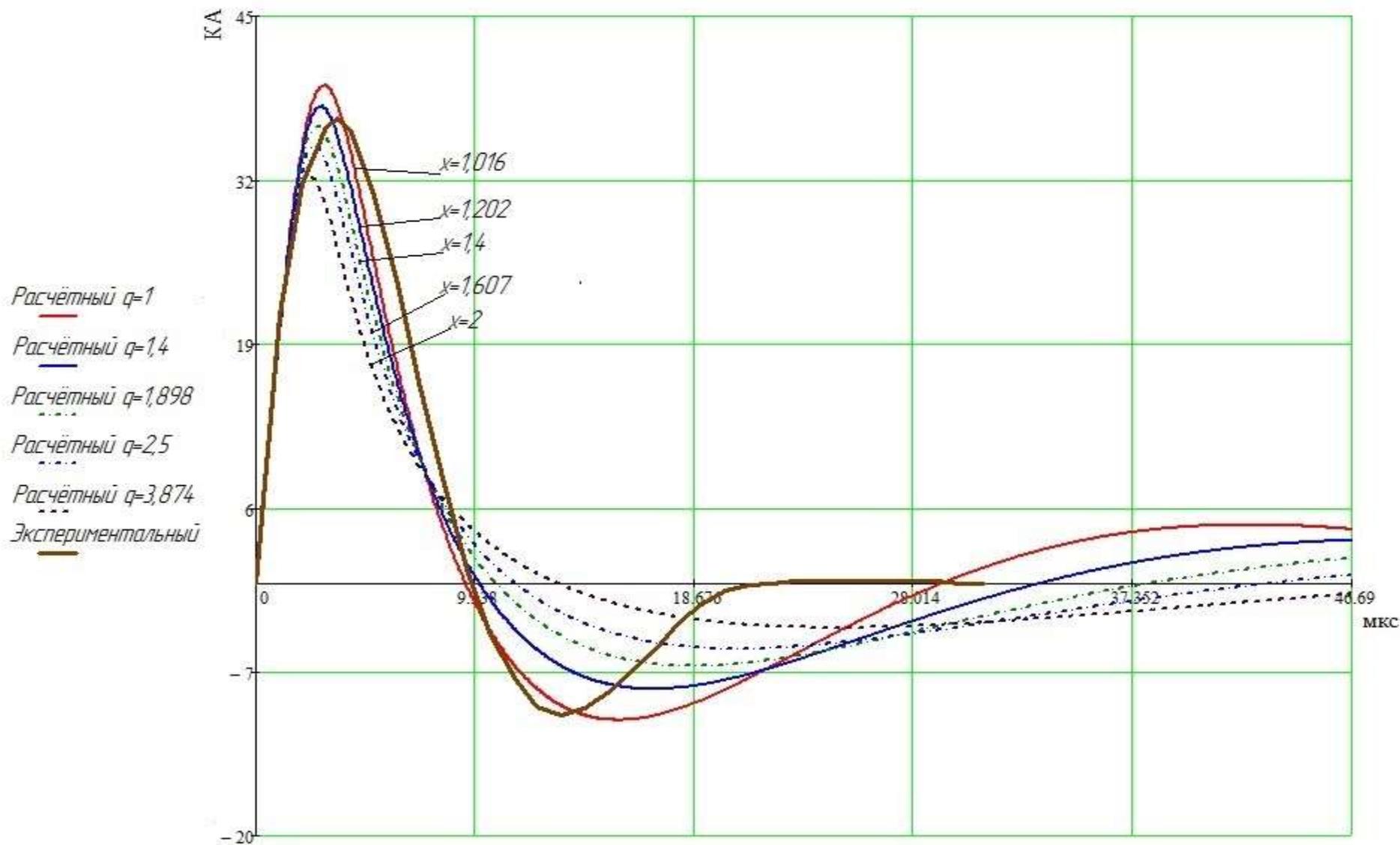


Рисунок 52 – Осциллограммы тока расчётной и экспериментальной модели с двумя шинами

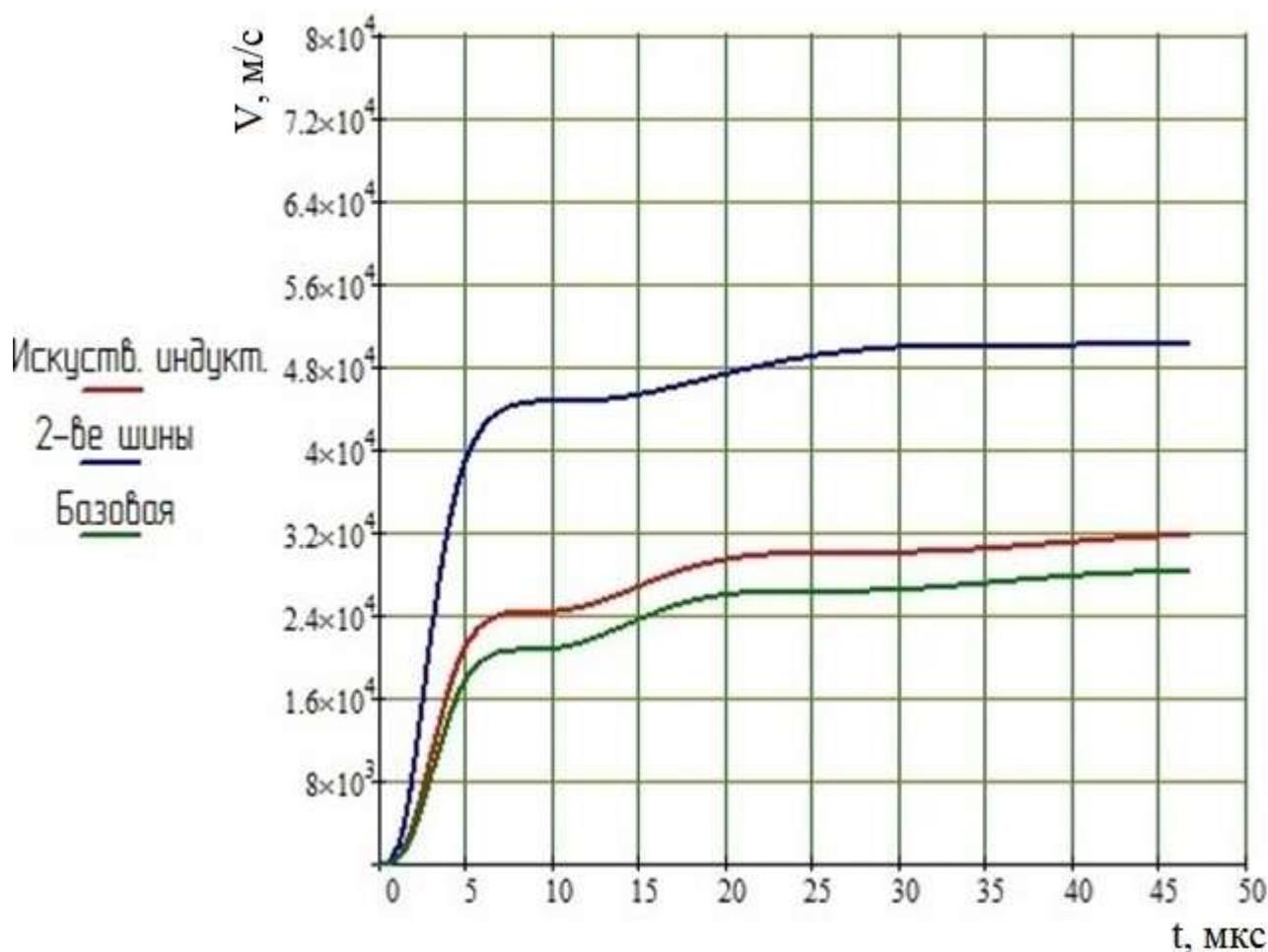


Рисунок 53 – Расчетные графики скорости плазменного сгустка для модели АИПД с двойным обратным токоподводом, модели с увеличенной индуктивностью и базовой модели

По результатам анализа расчётных данных, наглядно представленных на рисунке 53, можно сделать выводы о том, что модель с двойным обратным токоподводом может иметь существенно более высокую скорость истечения рабочего тела, по сравнению с базовой моделью на всём протяжении развития плазменного пучка в канале. Таким образом, можно сделать вывод, что доработка базовой модели в плане изменения системы токоподводов положительно сказывается на тягово-энергетических характеристиках всего двигателя в целом. Однако приближенный характер расчетной электродинамической модели ускорения плазменного сгустка препятствует однозначной интерпретации этих

расчетов. В частности, расчетные осциллограммы разрядного тока соответствуют экспериментально полученным при увеличении магнитного поля в разрядном канале в 1,2 – 1,7 раза. Такая точность расчетов не позволяет сделать выводов о реальном увеличении магнитного поля в случае применения двойного обратного токопровода. Необходимы прямые измерения магнитного поля в разрядном канале.

#### **4.3 Результаты экспериментального исследования лабораторной модели АИПД с двойным обратным токопроводом**

Характеристики лабораторной модели АИПД с ошиновкой нового типа и начальной индуктивностью 60 нГн приведены в таблице 9. Для сравнения, в таблицах 10 и 11 приведены характеристики базовой модели АИПД с индуктивностью 60 нГн (таблица 10) и 35 нГн (таблица 11).

Таблица 9– Характеристики модели АИПД с двойным обратным токопроводом

№ п/п	W, Дж	P, мН·с	J <sub>sp</sub> , м/с	ṁ, мг/имп
1	55,9	1,1	12060	0,088
2	66,7	1,3	13540	0,097
3	78,3	1,6	14930	0,106

Таблица 10– Характеристики модели АИПД с искусственно увеличенной индуктивностью

№ п/п	W, Дж	P, мН·с	J <sub>sp</sub> , м/с	ṁ, мг/имп
1	56,3	1,1	11590	0,095
2	67,0	1,4	12730	0,106
3	84,7	1,8	15180	0,118

Таблица 11– Характеристики базовой модели АИПД

№ п/п	W, Дж	P, мН·с	J <sub>сп</sub> , м/с	ṁ, мг/имп
1	69,7	1,4	11637	0,123
2	83,3	1,7	11491	0,148
3	118,1	2,4	13916	0,175

На рисунке 54 приведена зависимость среднemasсовой скорости плазмы (удельного импульса тяги) от энергии разряда, на рисунке 55 приведена зависимость единичного импульса тяги от энергии разряда. Графики построены согласно экспериментальным данным, приведённым в таблицах 9, 10 и 11.

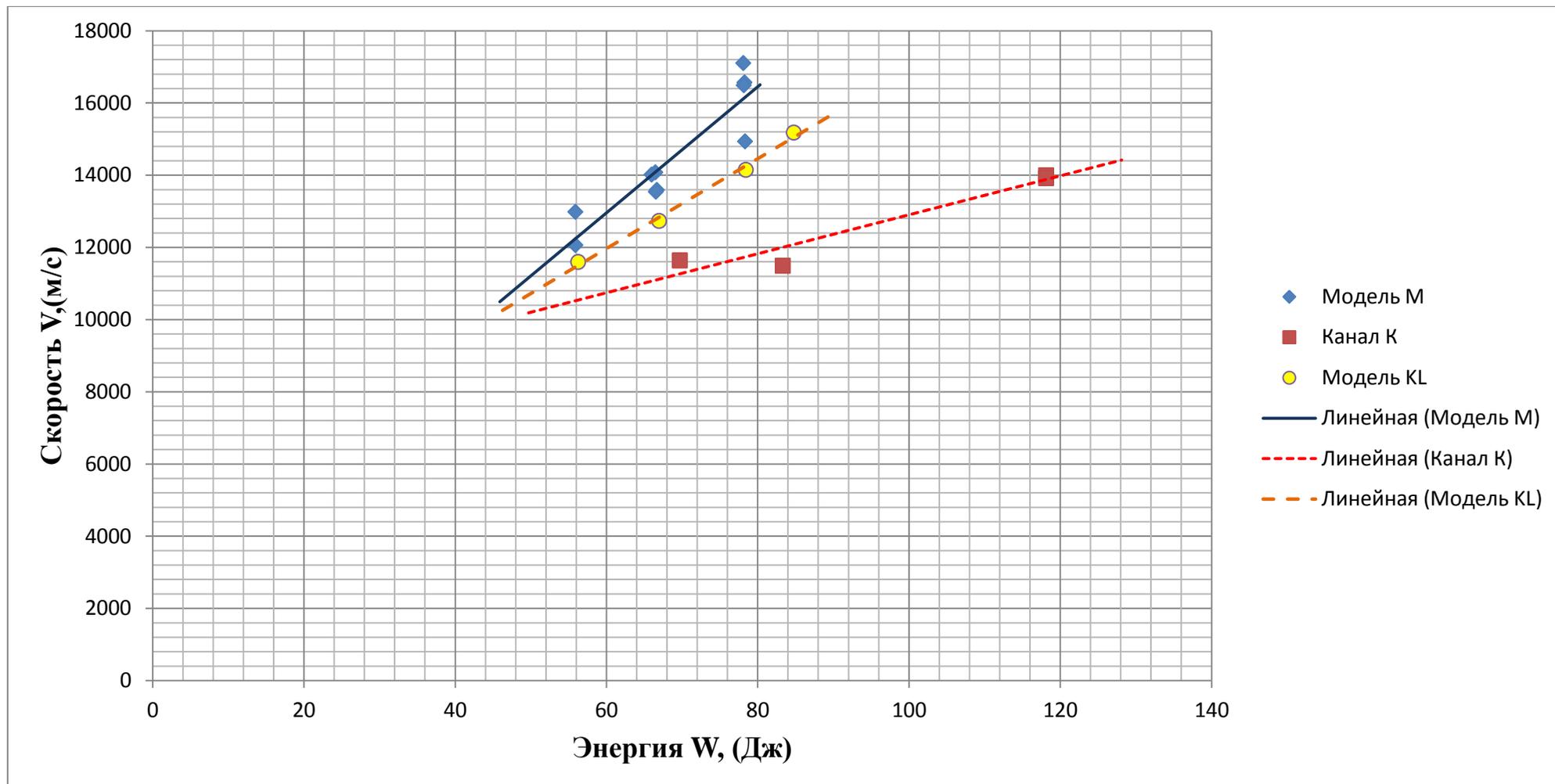


Рисунок 54 – Зависимость среднемассовой скорости плазмы от энергии разряда для модели АИПД с двойным обратным ток подводом «М», модели с искусственно увеличенной индуктивностью «KL», а также базовой модели «К», при тех же параметрах батареи

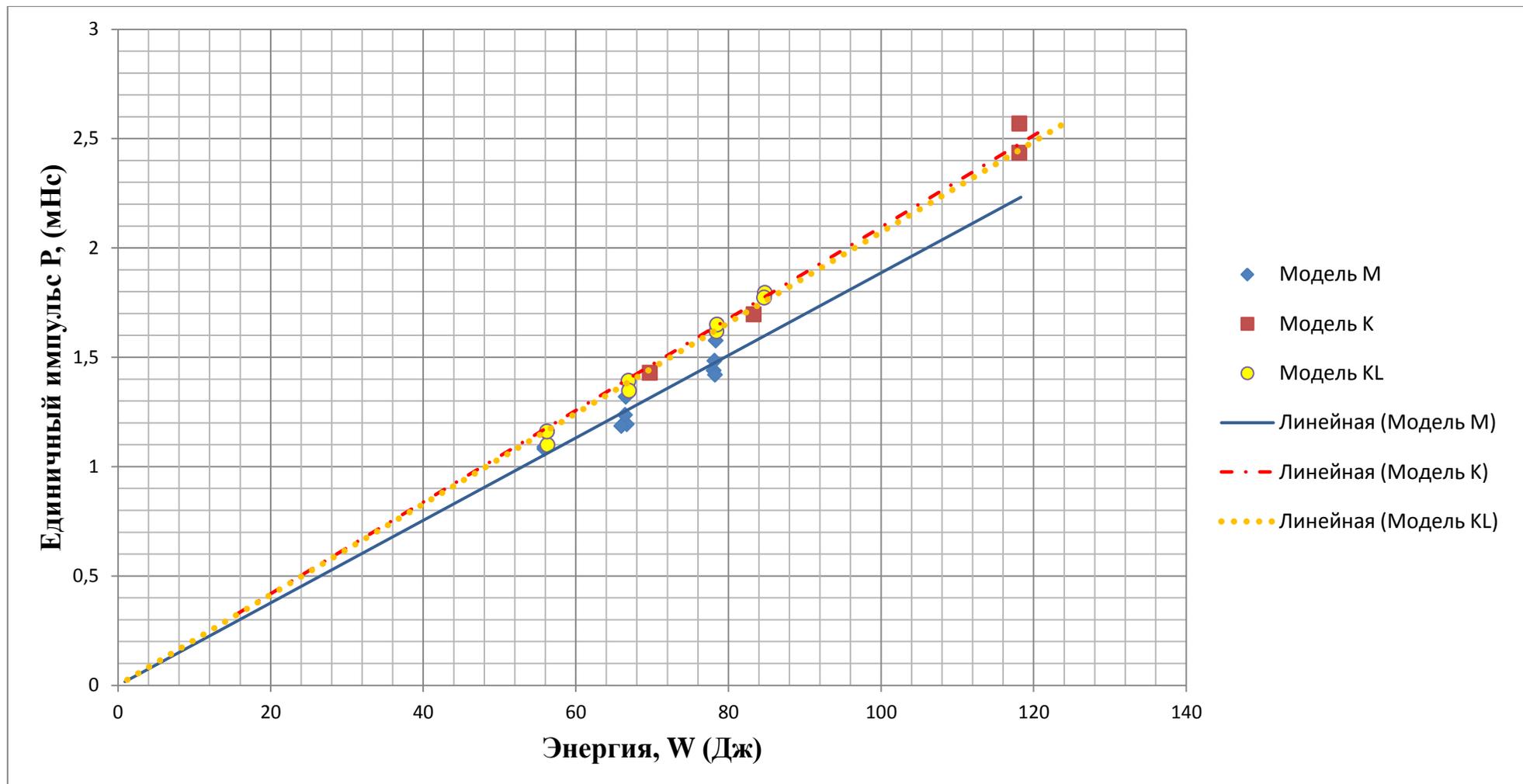


Рисунок 55 – Зависимость единичного импульса тяги от энергии разряда для модели АИПД с двойным обратным токоподводом «М», для модели с искусственно увеличенной индуктивностью «KL», а также для базовой модели «К» при тех же параметрах батареи

Экспериментальные и расчетные результаты свидетельствуют о том, что на новой модели АИПД с двумя шинами обратного токопровода получены более высокие среднемассовые скорости истечения. В частности, применение схемы с двумя шинами позволило повысить среднемассовую скорость (удельный импульс тяги) до 15 % по сравнению с моделью с увеличенной индуктивностью.

Это позволяет предположить, что новый тип ошиновки увеличивает электромагнитную составляющую тяги. В то же время для большей точности полученных результатов необходимо непосредственное измерение магнитного поля в разрядном канале при помощи магнитных зондов.

Описанные ниже магнитозондовые измерения основываются на опыте аналогичных экспериментальных исследований, проведенных ранее в НИИ ПМЭ МАИ применительно к АИПД с рельсовой схемой разрядного канала [49, 50].

#### **4.4 Магнитозондовые измерения**

Анализ показал, что в разрядном канале АИПД с двойным обратным токоподводом имеет место ожидаемое увеличение собственного магнитного поля, однако из-за приближенного характера электродинамической расчетной модели определить расчётным путём конкретную величину прироста практически не представляется возможным. Для подтверждения установленного в результате расчетного анализа факта увеличения магнитного поля была проведена непосредственная магнитозондовая диагностика исследовавшихся ранее двигателей с различным исполнением ошиновки, а именно: АИПД с двойным обратным токоподводом – «М», с увеличенной индуктивностью – «KL» и классической (базовой) модели – «К».

Для этой цели использовался магнитный зонд индуктивного типа, схема которого представлена на рисунке 56, а его внешний вид – на рисунке 57.

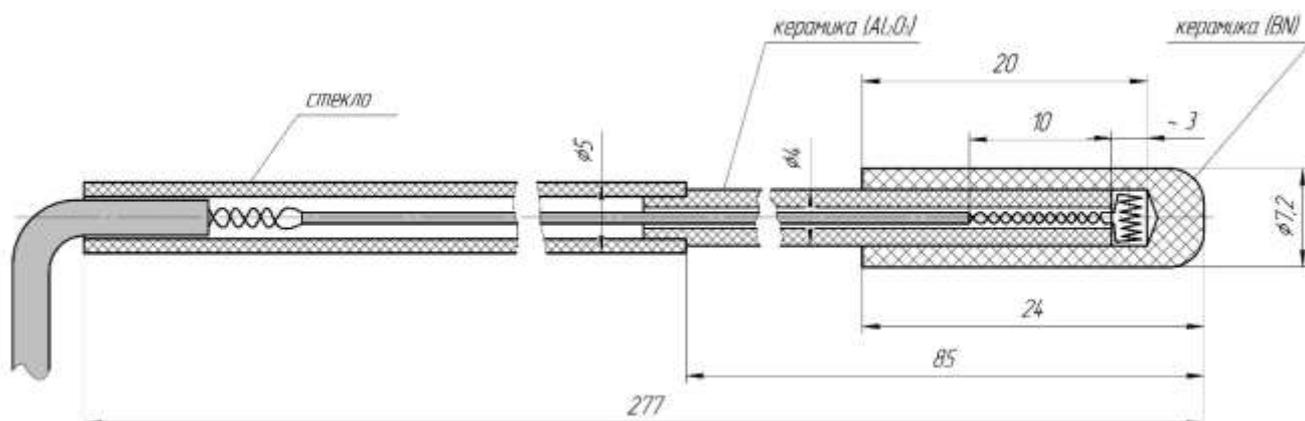


Рисунок 56 – Принципиальная схема магнитного зонда



Рисунок 57 – Внешний вид магнитного зонда

Чувствительным элементом (датчиком) зонда является катушка диаметром  $\sim 3$  мм и длиной 3,5 мм, состоящая из 100 витков провода  $\varnothing 0,08$  мм. Данный магнитный датчик жестко зафиксирован на конце керамической трубки, вставленной в стеклянный держатель, и закрыт изоляционным колпачком из нитрида бора. При этом ось катушки сориентирована перпендикулярна оси трубки.

Так как сигнал, индуцируемый в катушке зонда пропорционален  $dV/dt$ , то для фиксации собственно величины магнитного поля  $V_b$  измерительной цепи использовалась интегрирующая цепочка, состоящая из  $R$  (сопротивления, Ом) и  $C$  (ёмкости, мкФ), рассчитанная по известным методикам [67].

Перед проведением измерений была проведена калибровка зонда совместно со своим интегратором. Для этого использовался однослойный соленоид с известной величиной магнитного поля. Схема тарировки изображена на рисунке 58.

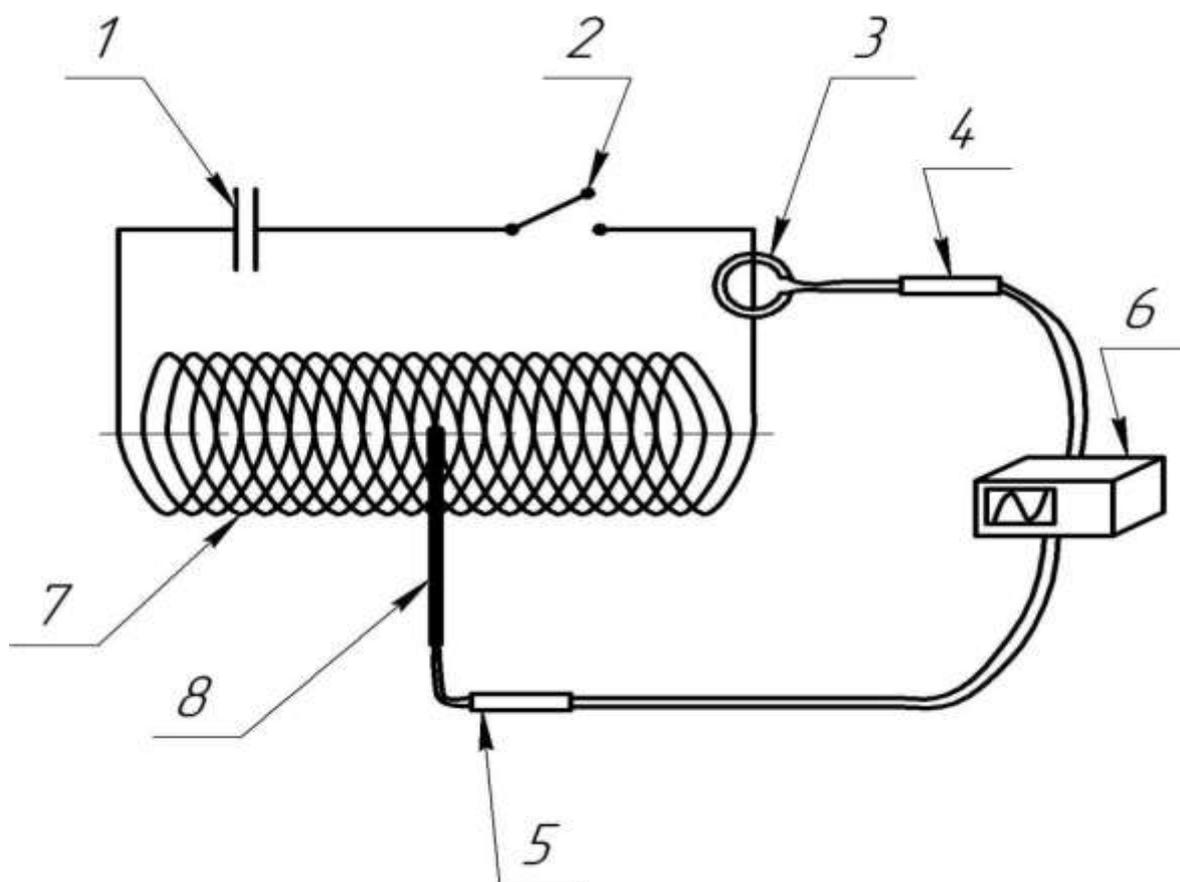


Рисунок 58 - Схема тарировки магнитного зонда (1 – конденсатор; 2 - ключ; 3 – пояс Роговского; 4, 5 – интеграторы; 6 – осциллограф; 7 – соленоид; 8 – магнитный зонд)

Зонд вводился в соленоид таким образом, чтобы ось магнитного датчика была параллельна оси соленоида. Временное согласование величины тока в цепи со значением магнитного поля достигалось путем использования для измерения тока калиброванного пояса Роговского. Регистрация сигналов с магнитного зонда и с пояса Роговского осуществлялась цифровым двухлучевым осциллографом. Полученная типичная осциллограмма приведена на рисунке 59.

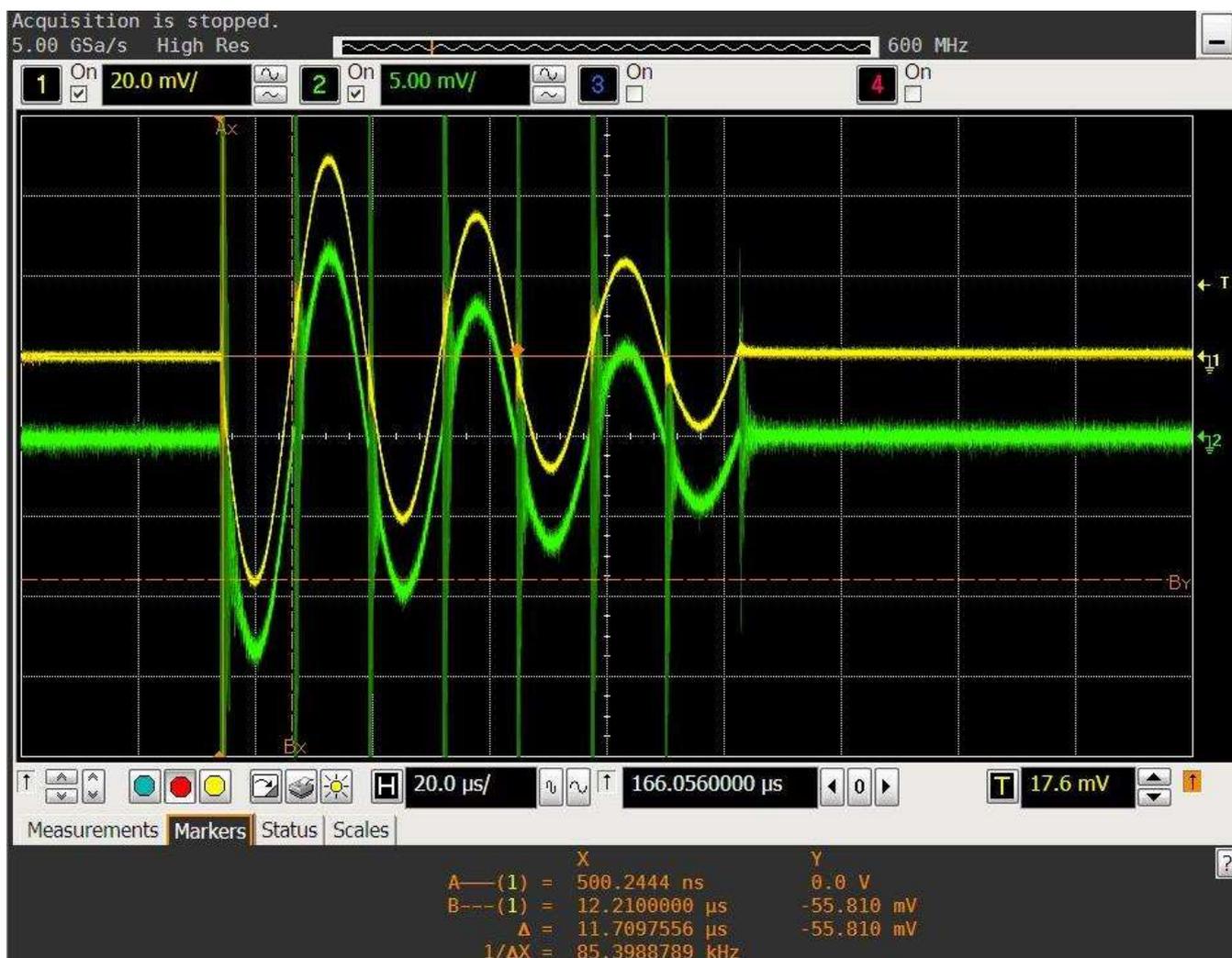


Рисунок 59 – Осциллограммы, полученные при тарировке магнитного зонда(жёлтым цветом отображается сигнал с пояса Роговского, зелёным цветом отображается сигнал с магнитного зонда)

По результатам тарировки зонда было установлено, что его чувствительность с использованным RC-интегратором составляет  $1,536 \times 10^{-3}$  Тл/мВ.

После этого были проведены тарировочные измерения магнитных полей моделей с двумя различными типами обратного токоподвода («M» и «KL») при атмосферном давлении по схеме измерений, приведенной на рисунке 60. Замыкание разрядной цепи производилось путём соединения электродов специальной шиной.

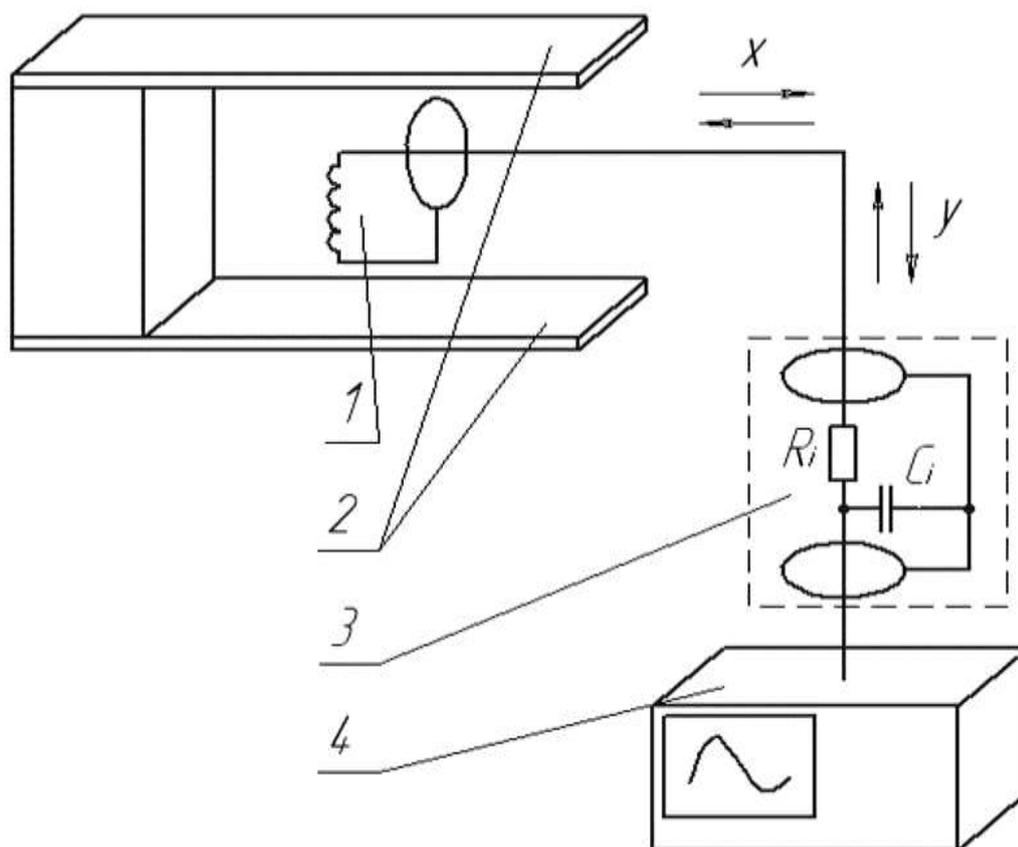


Рисунок 60 - Схема магнитозондовых измерений в ускорительном канале АИПД(1 – магнитный зонд; 2 - электроды АИПД; 3 – RC-интегратор; 4 – осциллограф)

Зонд был закреплен на электрически изолированном от земли координатном устройстве с двумя степенями свободы. Измерения проводились вдоль центральной оси канала двигателя (ось «x») с шагом 5 мм. При этом нулевая точка отсчета совпадала с точкой пересечения центральной оси канала с плоскостью торцевого изолятора. Ось магнитного датчика была установлена параллельно плоскости электродов и торцевого изолятора. Магнитный зонд и пояс Роговского были связаны с двухлучевым осциллографом коаксиальными кабельными линиями с RC-интеграторами. Как и в случае с тарировкой зонда для временного согласования величин тока и магнитной индукции использовался калиброванный пояс Роговского, установленный на одной из шин двигателя. Внешний вид модели с установленным в канале зондом представлен на рисунке 61.

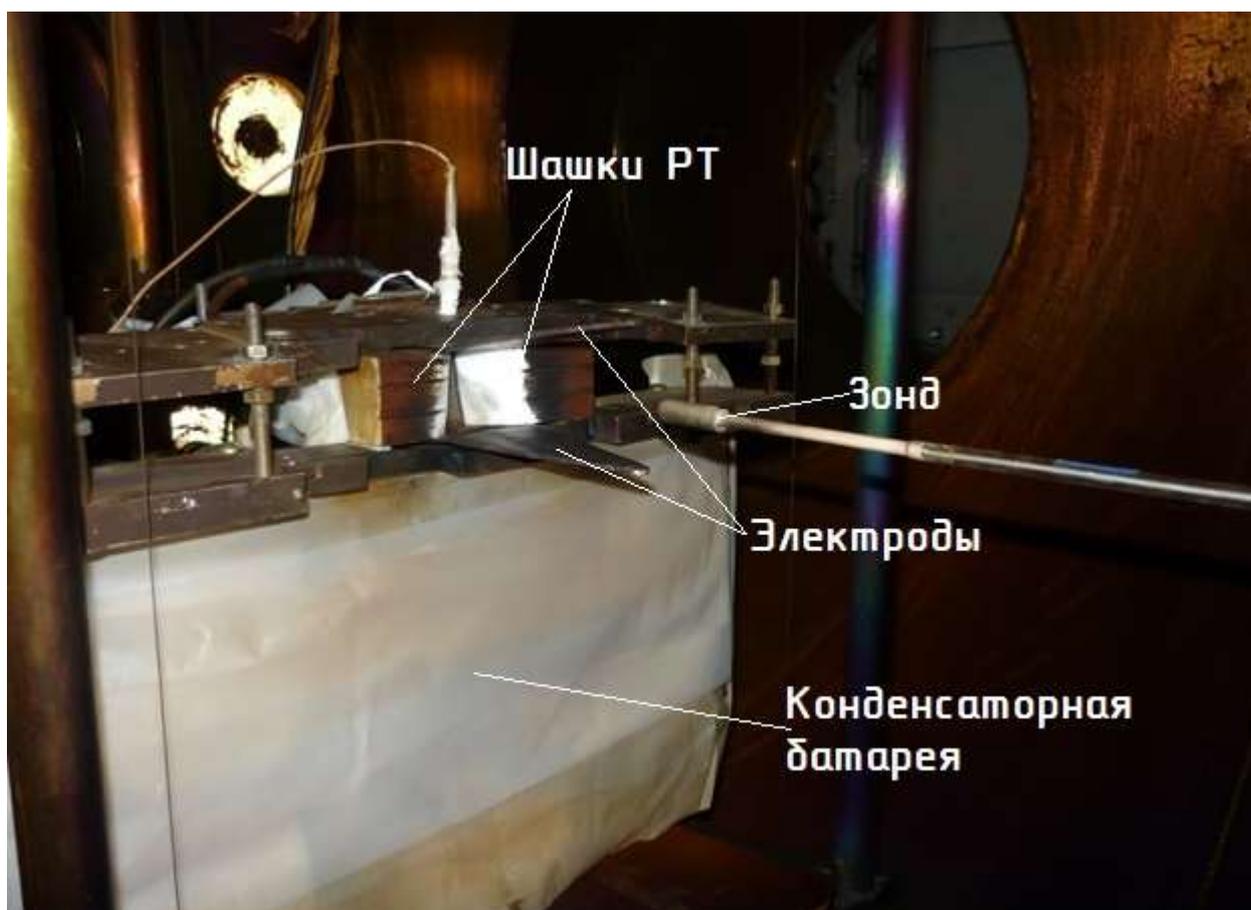


Рисунок 61 – Внешний вид лабораторной модели АИПД с установленным в разрядном канале магнитным зондом

Полученные результаты для одинакового тока разряда приведены на рисунке 62. Видно, что магнитное поле в объеме разрядного канала выше у АИПД исполнения «М», то есть двойной обратный токоподвод обеспечивает увеличение индукции магнитного поля на 10-20%, в зависимости от точки на продольной оси разрядного канала. Наиболее значительный эффект от применения новой схемы наблюдается в непосредственной близости к торцевым токоподводам, находящимся за торцевым изолятором.

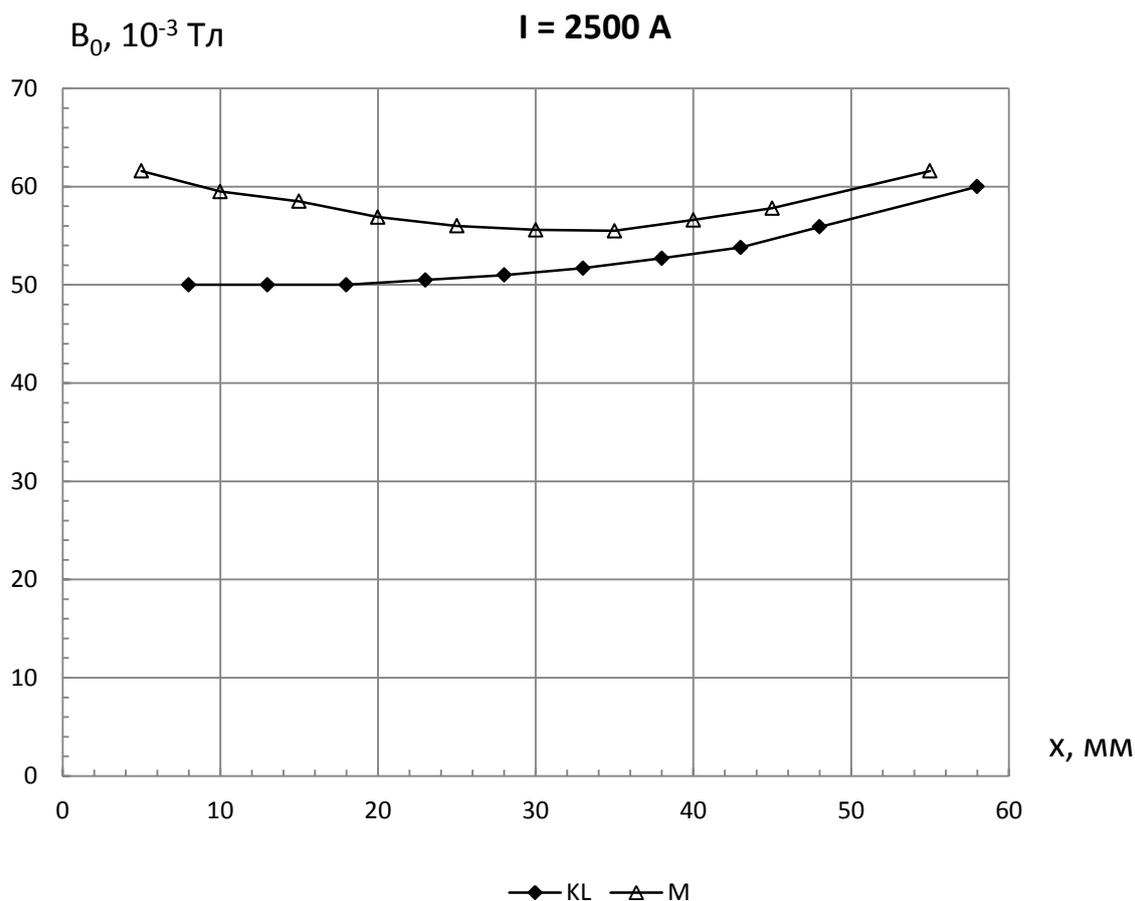


Рисунок 62 – Результаты тарировки на воздухе моделей «М» и «KL»

Дальнейшие измерения собственных магнитных полей проводились в плазме импульсного разряда двигателей при расположении зонда аналогично его расположению при измерениях на воздухе. Схема измерений соответствует приведённой на рисунке 60.

Введение зонда в плазму разряда вызывает возникновение возмущений, таких как охлаждение плазмы, загрязнение ее примесями с поверхности зонда, искажение распределения токов, обуславливающих магнитное поле, изменение чувствительности зонда и ряд других. Однако, поскольку проводимые измерения носят сравнительный характер, то принималось, что данные возмущения практически одинаковы во всех случаях и они не учитывались. Кроме того, установлено, 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.

Во всех случаях магнитозондовые измерения проводились при напряжении разряда моделей 1200 В, емкости накопителя энергии 93,5 мкФ и размерах шашек рабочего тела 30×25 мм. Полученные типичные осциллограммы разрядного процесса (сигнал с пояса Роговского) и с магнитного зонда приведены на рисунках 63, 64 и 65 для моделей «М», «KL» и «К» соответственно.

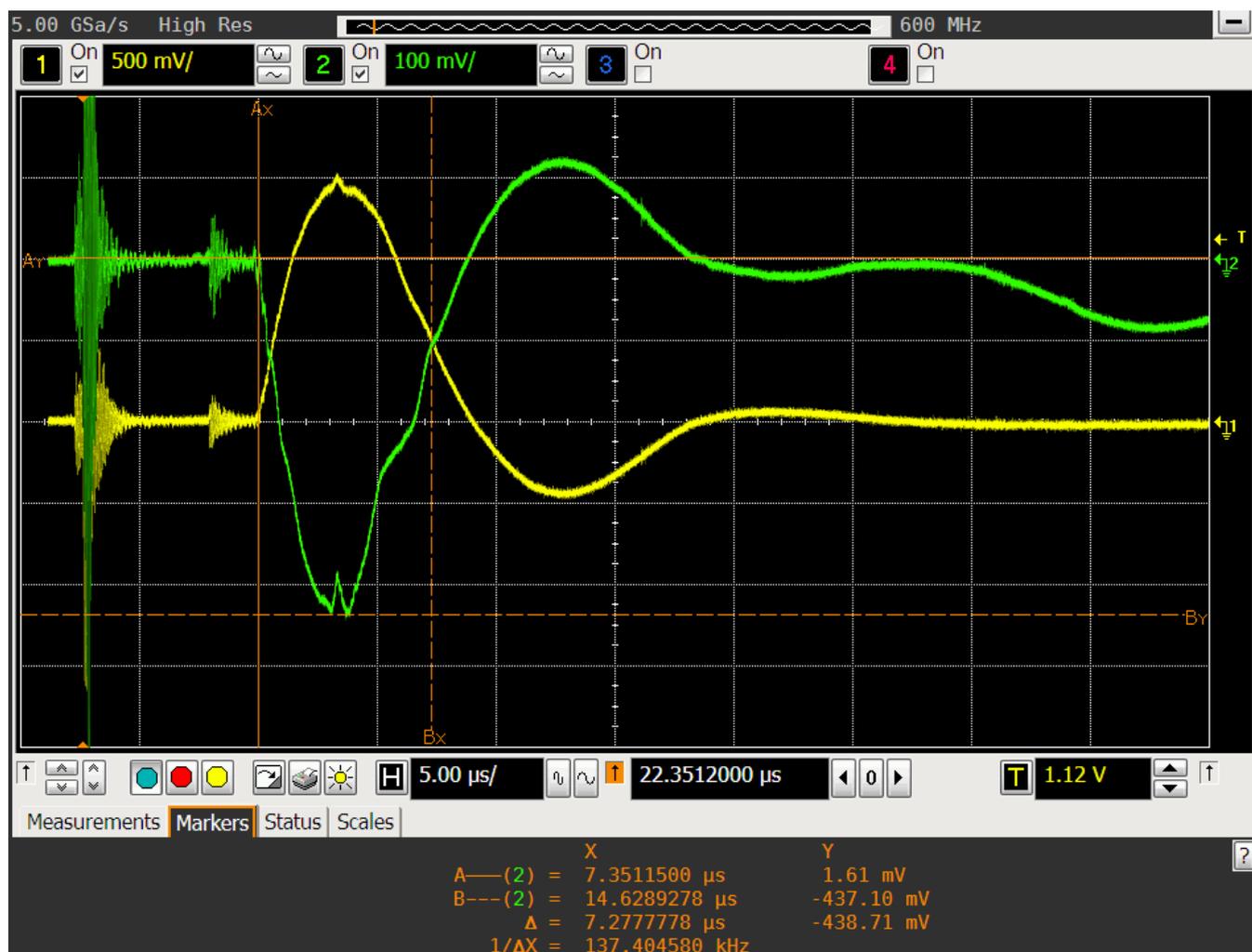


Рисунок 63 – Осциллограммы тока и сигнала с магнитного зонда АИПД исполнения «М» при расположении магнитного датчика в точке 5 мм (жёлтым цветом отображается сигнал с пояса Роговского, зелёным цветом отображается сигнал с магнитного зонда)

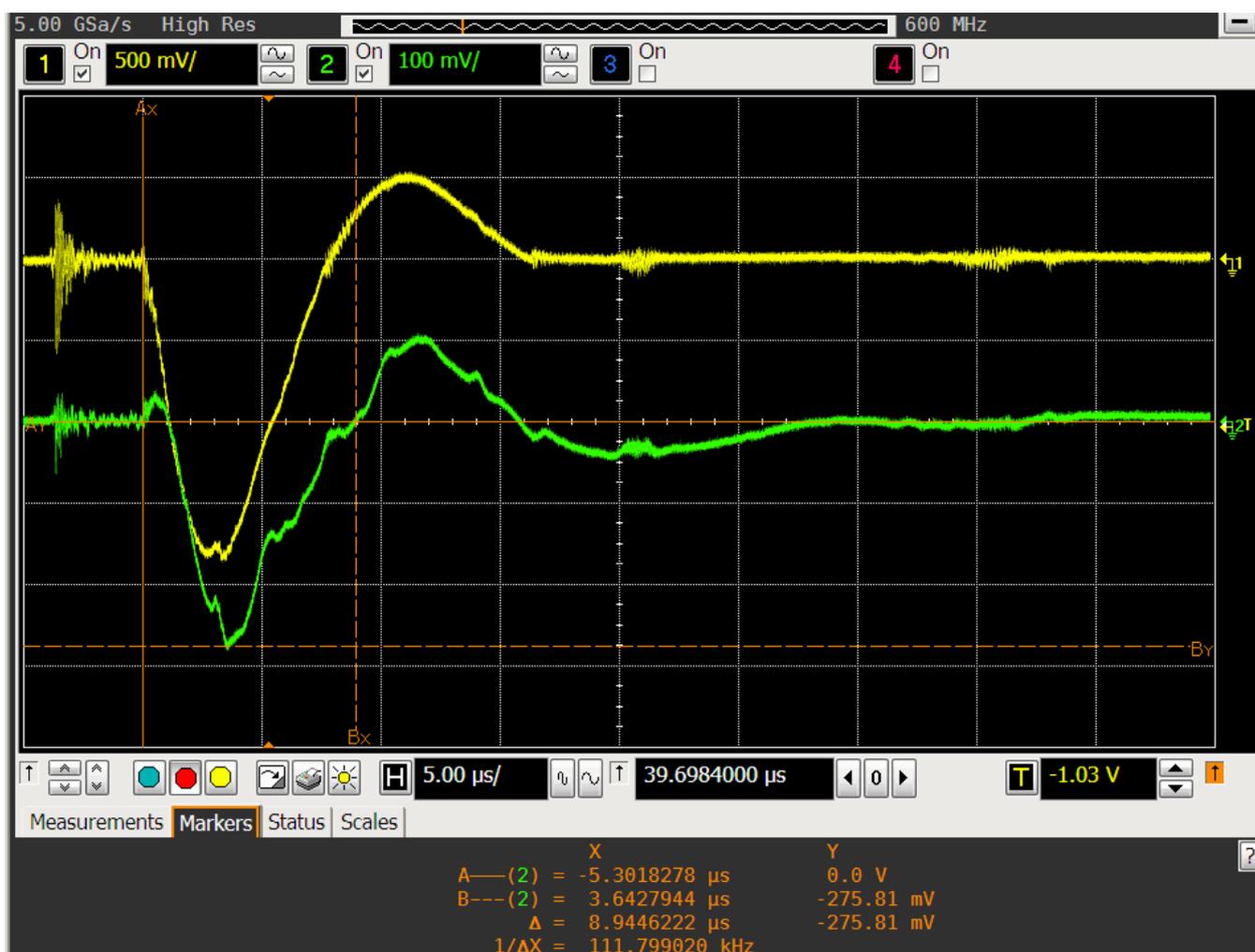


Рисунок 64 – Осциллограммы тока и сигнала с магнитного зонда АИПД исполнения «KL» при расположении магнитного датчика в точке 35 мм (жёлтым цветом отображается сигнал с пояса Роговского, зелёным цветом отображается сигнал с магнитного зонда)

Интересно отметить зафиксированный на рисунке 64 факт переполюсовки сигнала с зонда на первой микросекунде разрядного процесса. Это объясняется прохождением слоя тока, движущегося в направлении «x» из области находящейся перед магнитным датчиком в область расположенную за ним.

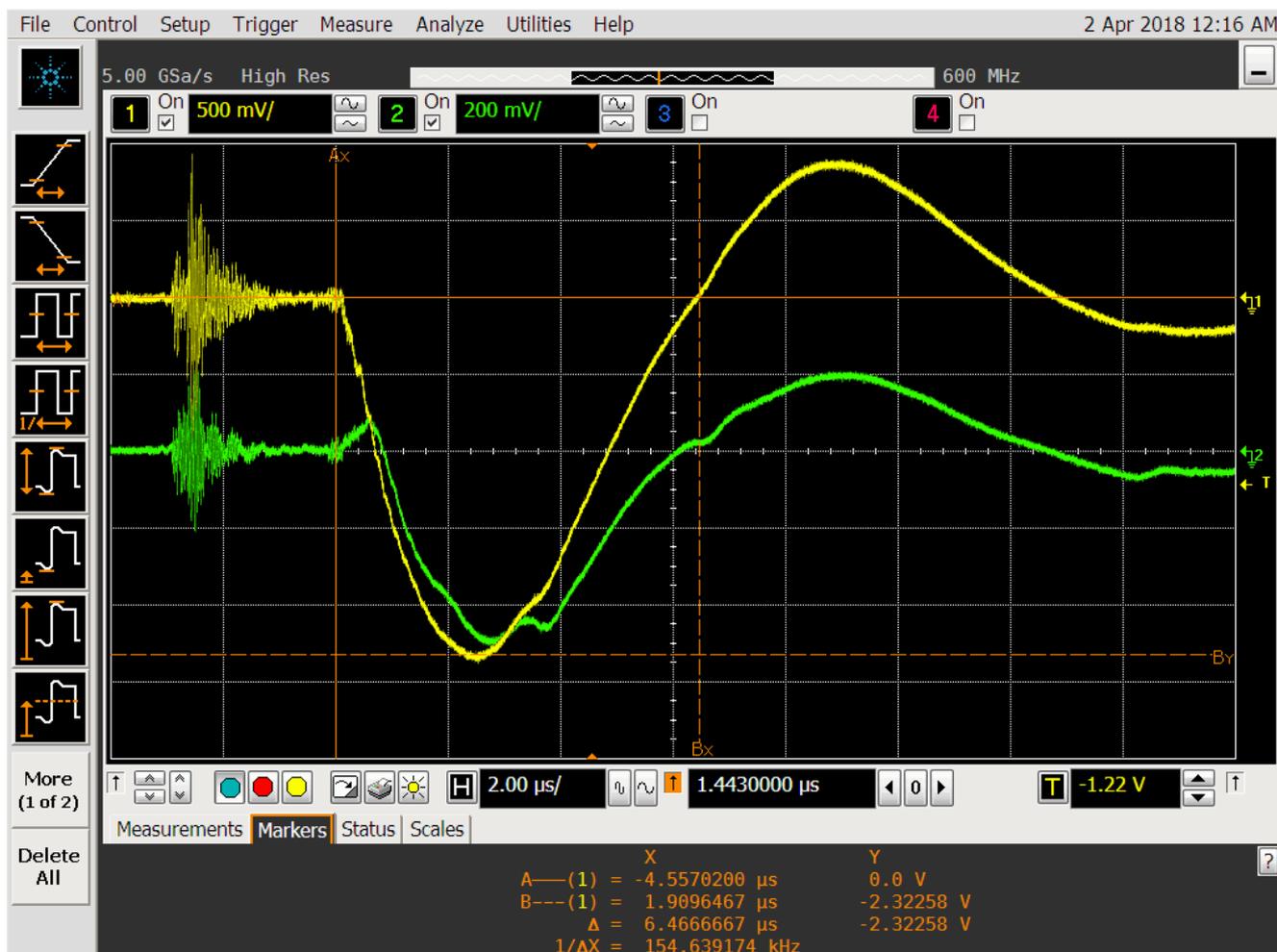


Рисунок 65 – Осциллограммы тока и сигнала с магнитного зонда АИПД исполнения «К» при расположении магнитного датчика в точке 10 мм (жёлтым цветом отображается сигнал с пояса Роговского, зелёным цветом отображается сигнал с магнитного зонда)

На осциллограмме с зонда для модели «К» на рисунке 65 также имеет место переполюсовка сигнала на первой микросекунде разрядного процесса. Процесс имеет аналогичное с моделью «KL» физическое объяснение.

Ниже приведены результаты магнитозондовых измерений для всех трёх исследованных моделей. На рисунках 66...98 надо отметить, что кривые распределения магнитного поля по длине разрядного канала значительно искажены различного рода пиками (скачками), которые вносят в них вихревые явления, происходящие в этот момент в движущейся плазме, рассмотренные ранее в работе [49].

Результаты магнитозондовых измерений для базовой модели «К», представляющие собой диаграммы изменения величины магнитной индукции по длине канала для различных моментов времени, представлены на рисунках 66...72.

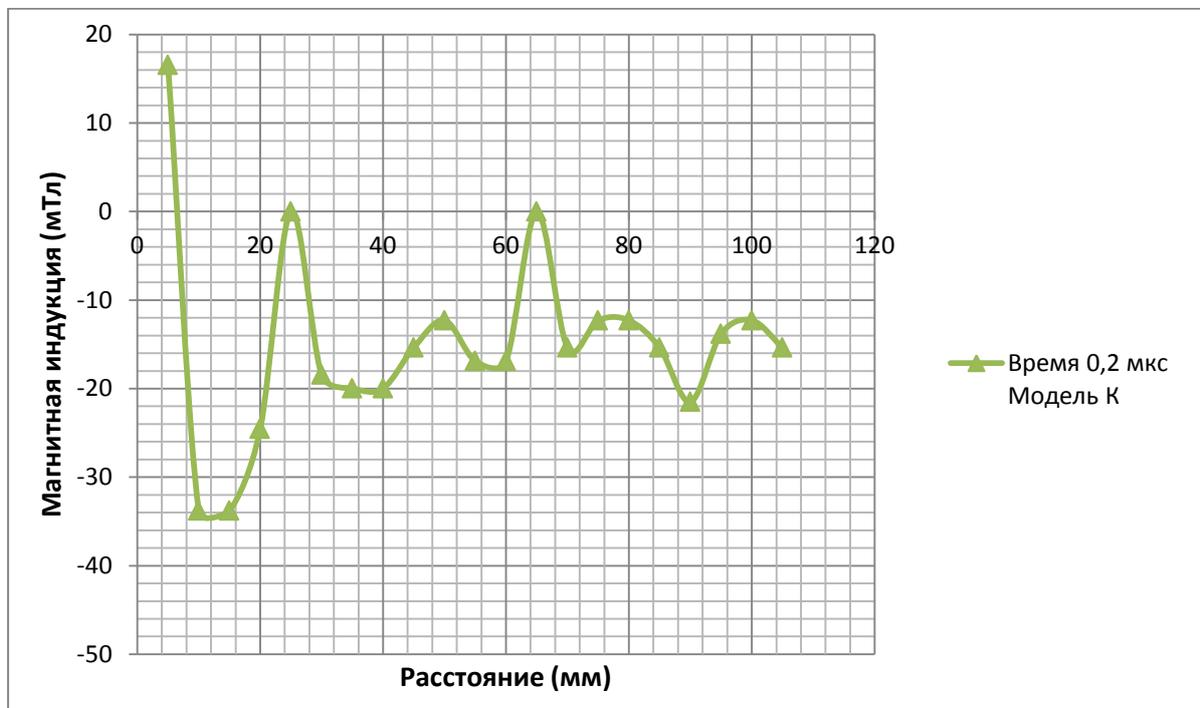


Рисунок 66 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,2 мкс для модели «К»

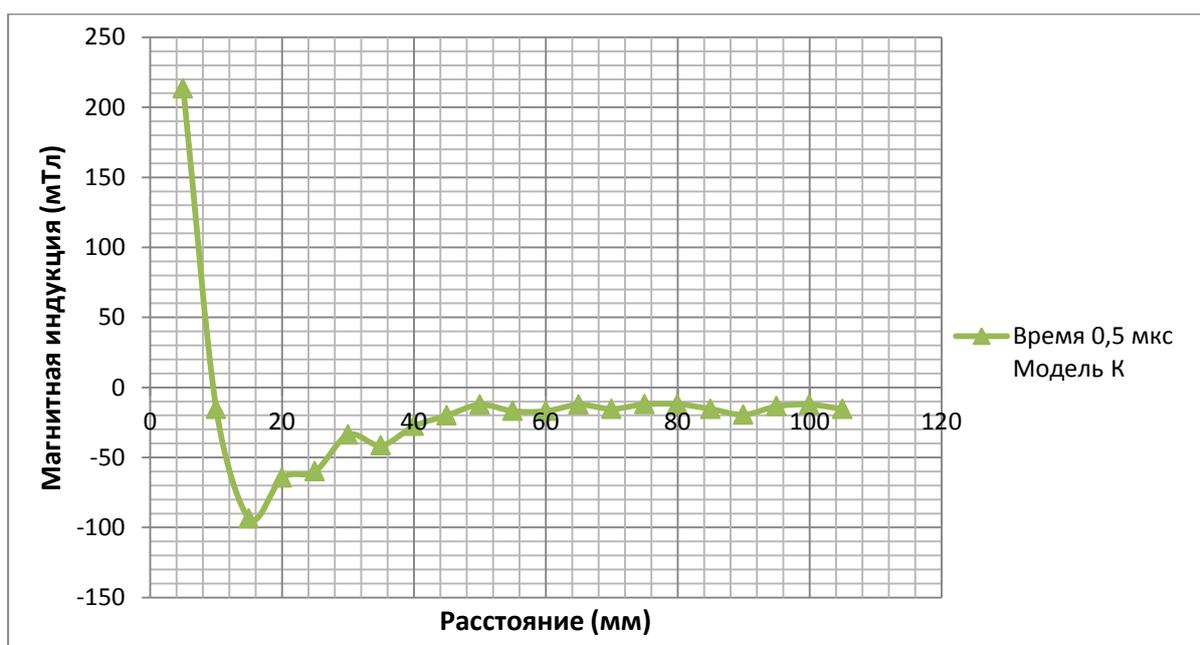


Рисунок 67 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,5 мкс для модели «К»

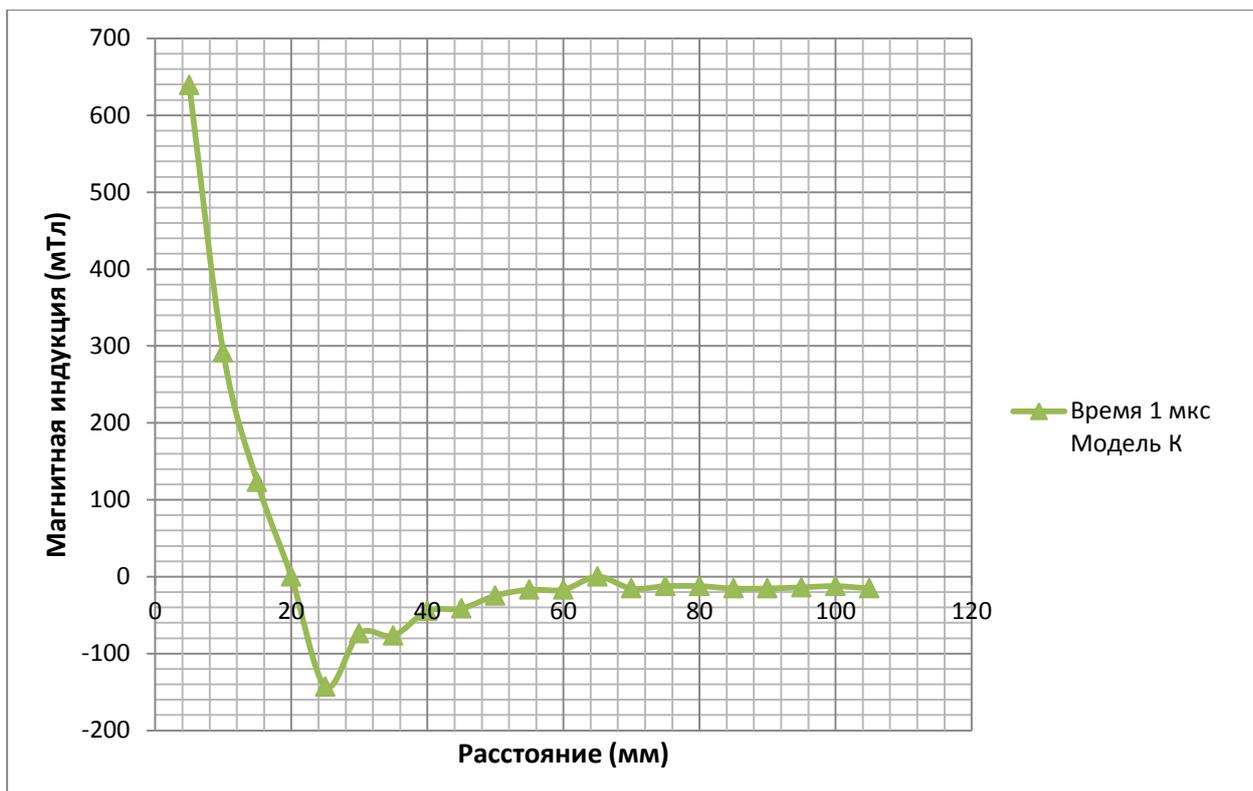


Рисунок 68 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1 мкс для модели «К»

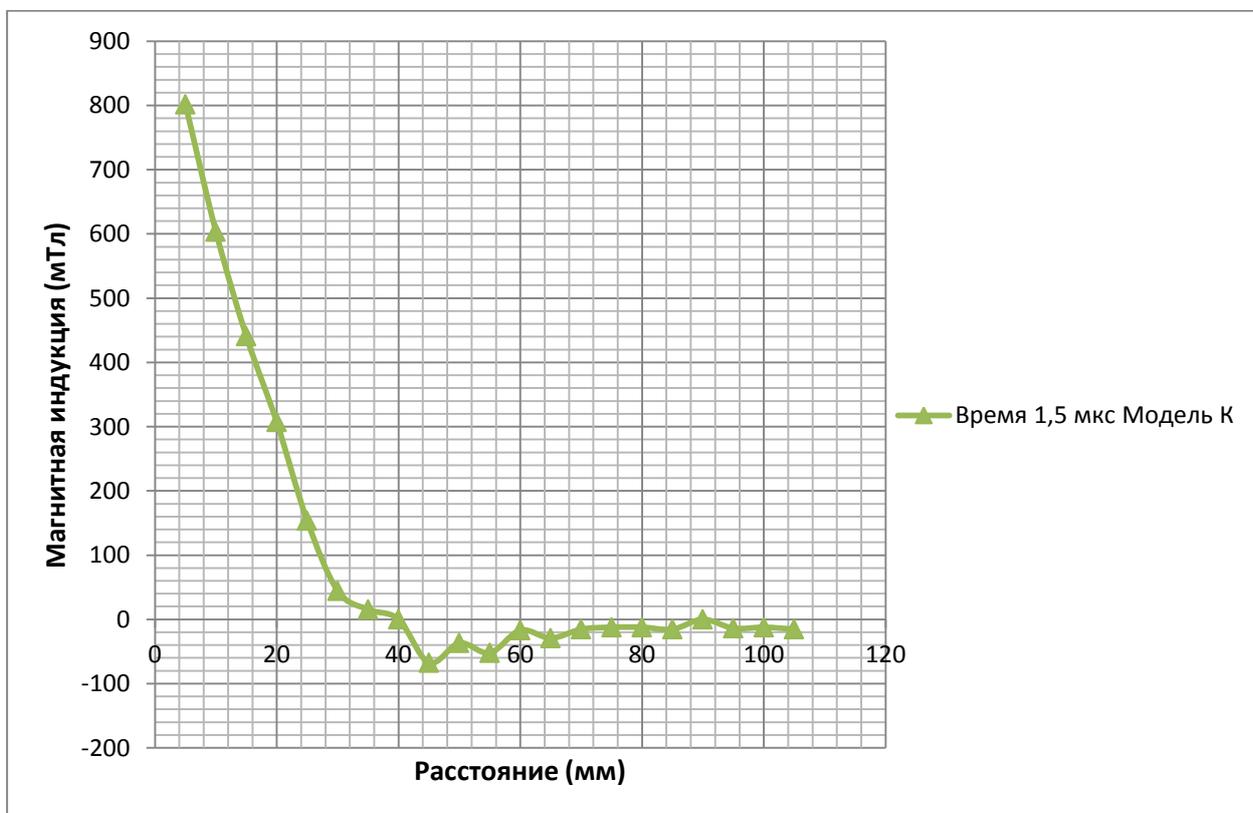


Рисунок 69 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1,5 мкс для модели «К»

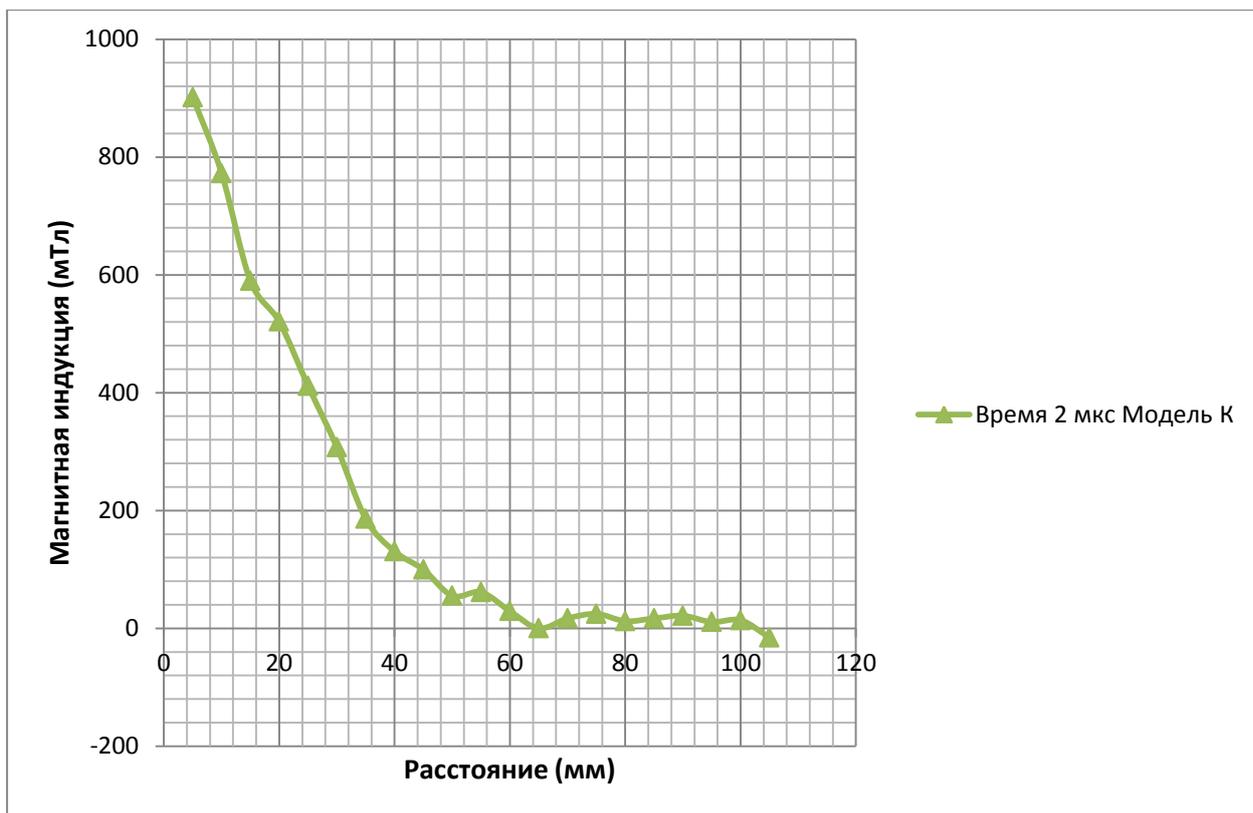


Рисунок 70 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2 мкс для модели «К»

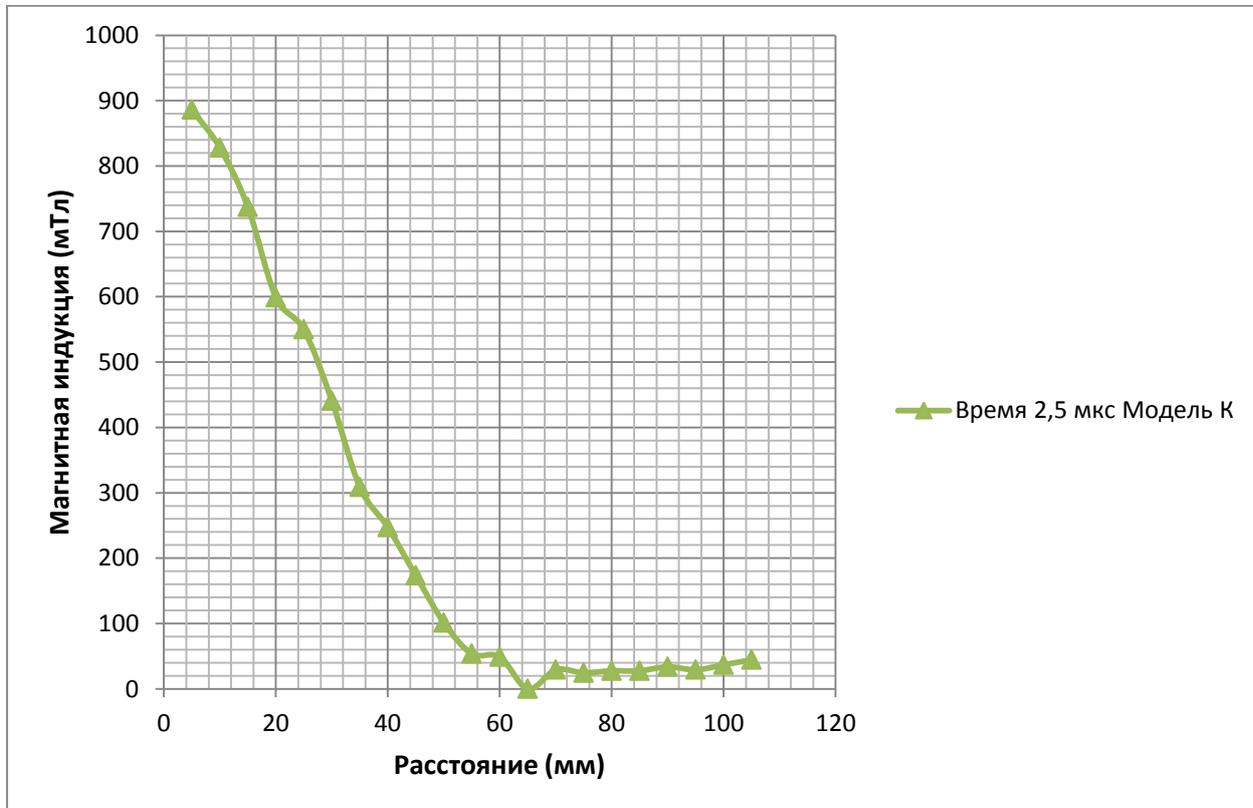


Рисунок 71 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2,2 мкс для модели «К»

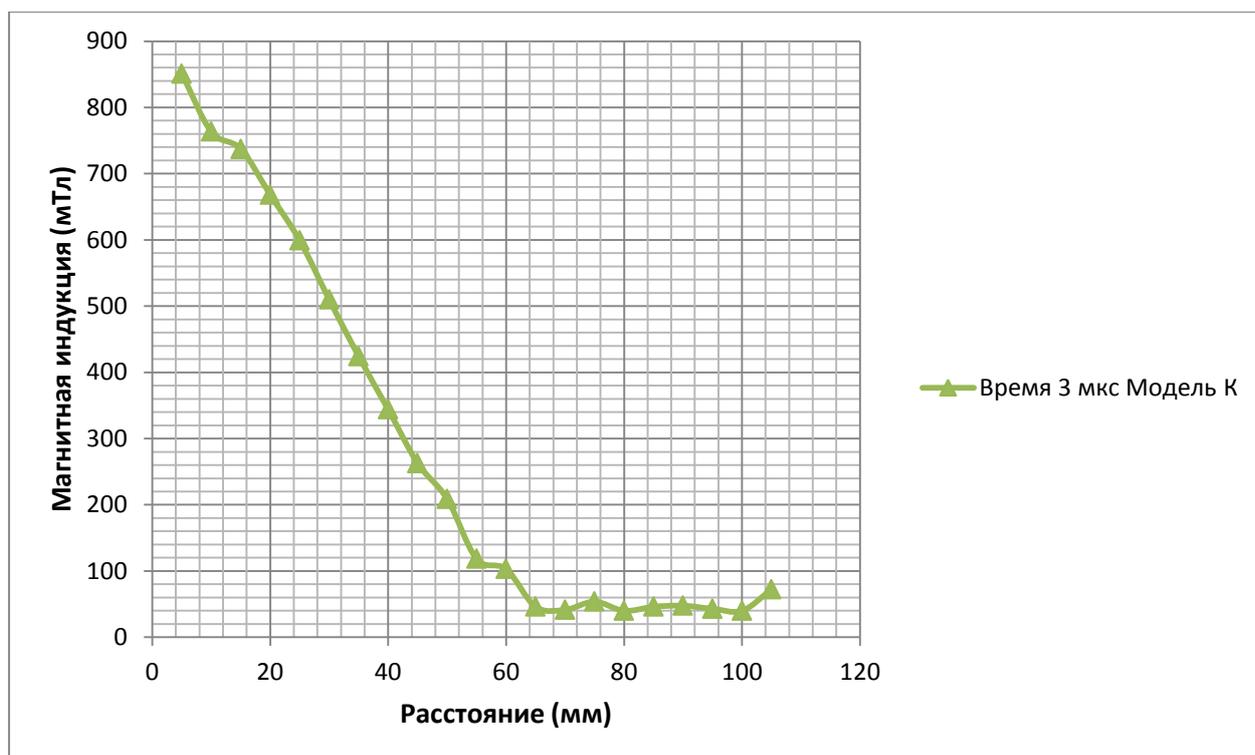


Рисунок 72 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 3мкс для модели «K»

На диаграммах видна перемена знака индукции магнитного поля, смещающаяся с развитием разряда по длине канала (по потоку) со скоростью приблизительно 20 мм за 0,5 мкс (~40 км/с). Эта скорость соответствует скорости переднего фронта разрядного тока и, соответственно максимально возможной скорости переднего фронта плазменного сгустка.

Аналогичные результаты магнитозондовых измерений для модели с искусственно увеличенной индуктивностью «KL» представлены на рисунках 73...85. Данная модель отличается разрядом большей длительности и, соответственно, меньшей амплитуды разрядного тока (см. осциллограммы, представленные на рисунках 64 и 65). Поэтому максимальные значения магнитной индукции в начале канала уменьшились с ~0,9 Тл до ~0,7 Тл. В течение первых 1,5-2,0 мкс разряда передний фронт разрядного тока смещается приблизительно с той же скоростью 30-40 км/с. Начиная со второй микросекунды разряд переходит в квазистационарную стадию без существенного смещения токового слоя. В моменты времени 7-8 мкс, соответствующие нулю разрядного

тока (переплюсовка конденсаторного накопителя), разряд смещается к выходу разрядного канала, в котором образуется вихрь тока. Подробнее эти процессы в разрядном канале АИПД рассмотрены в работе [49].

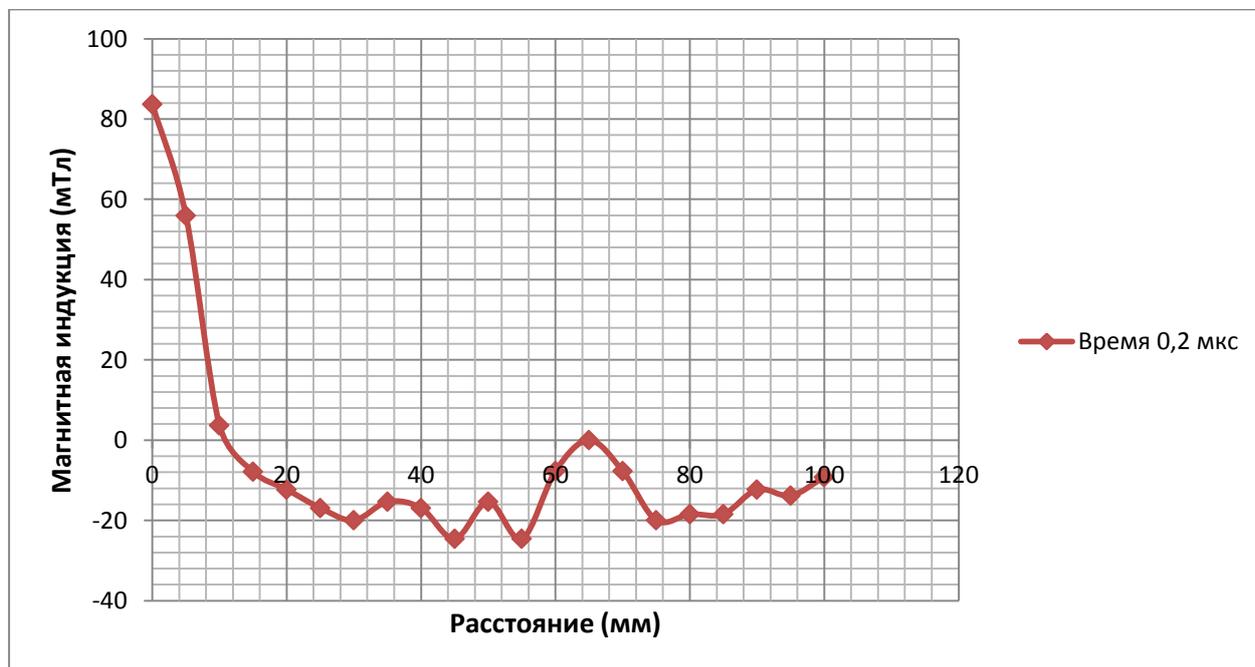


Рисунок 73 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,2мкс для модели «KL»

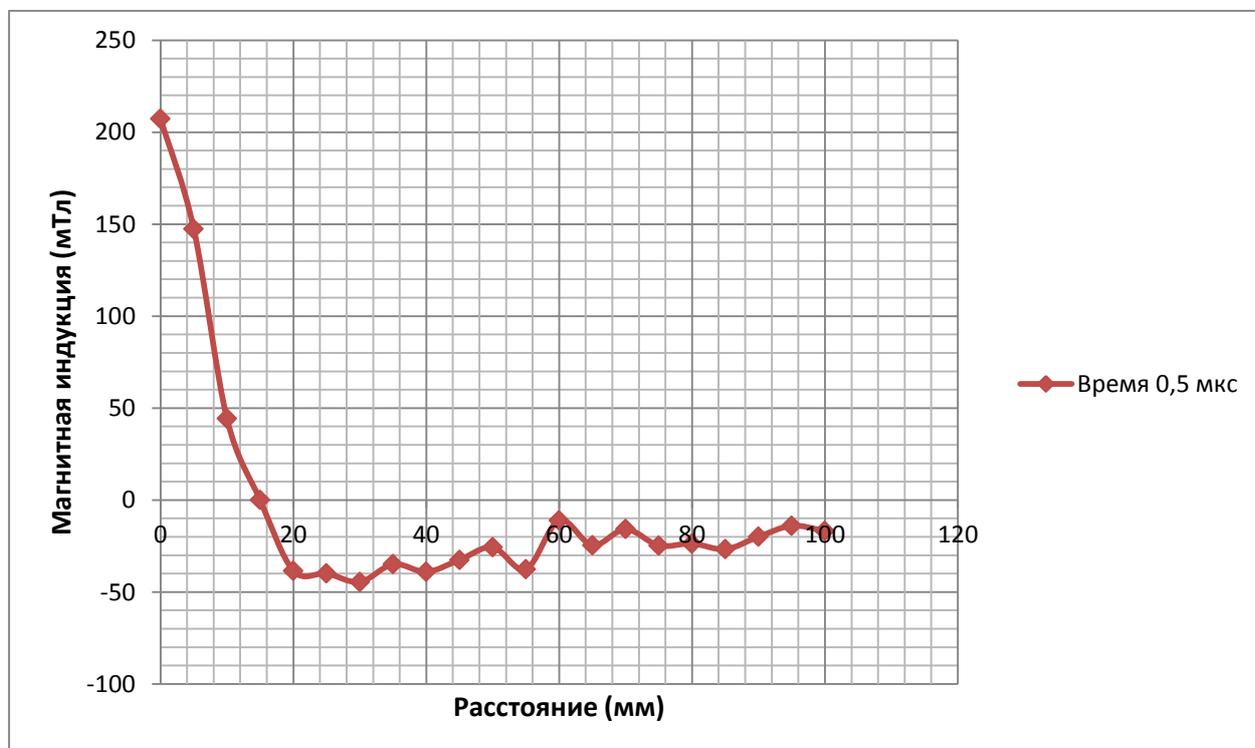


Рисунок 74 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,5мкс для модели «KL»

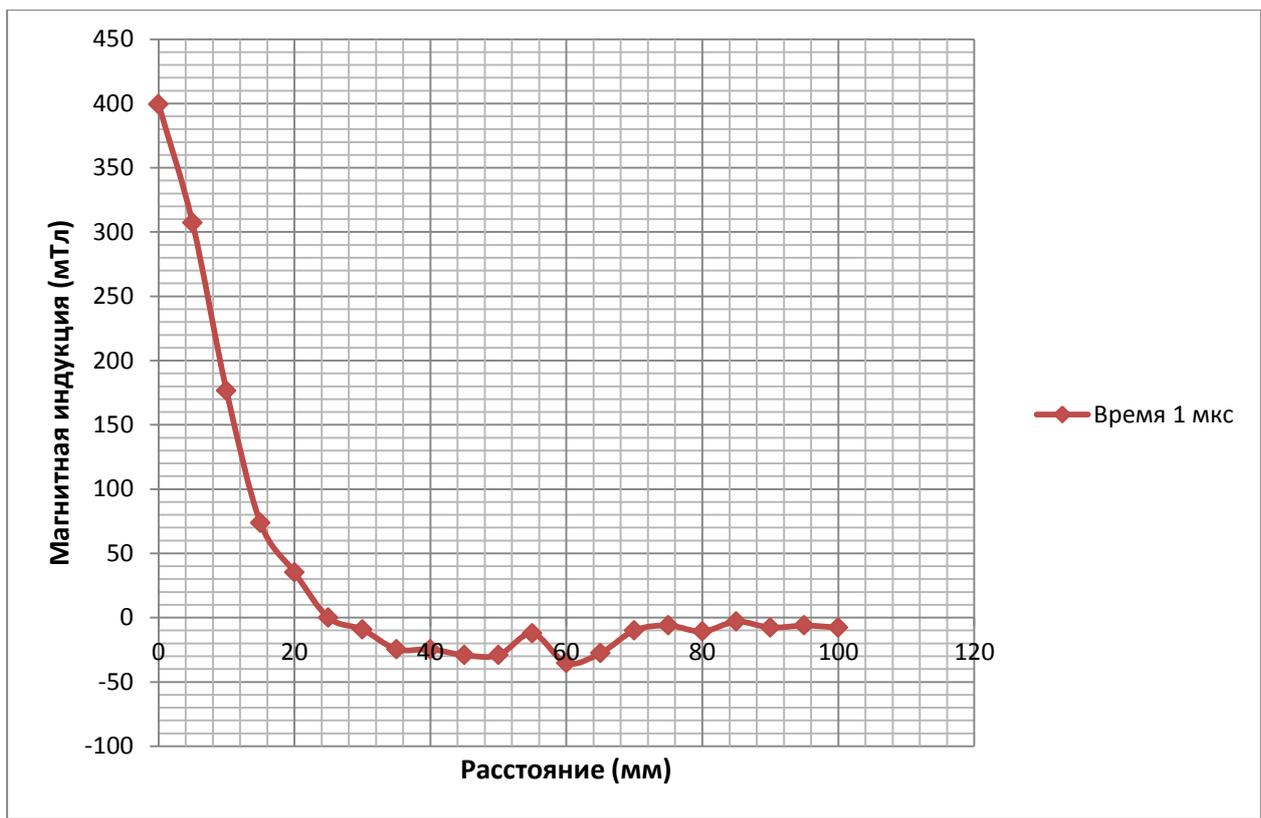


Рисунок 75 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1 мкс для модели «KL»

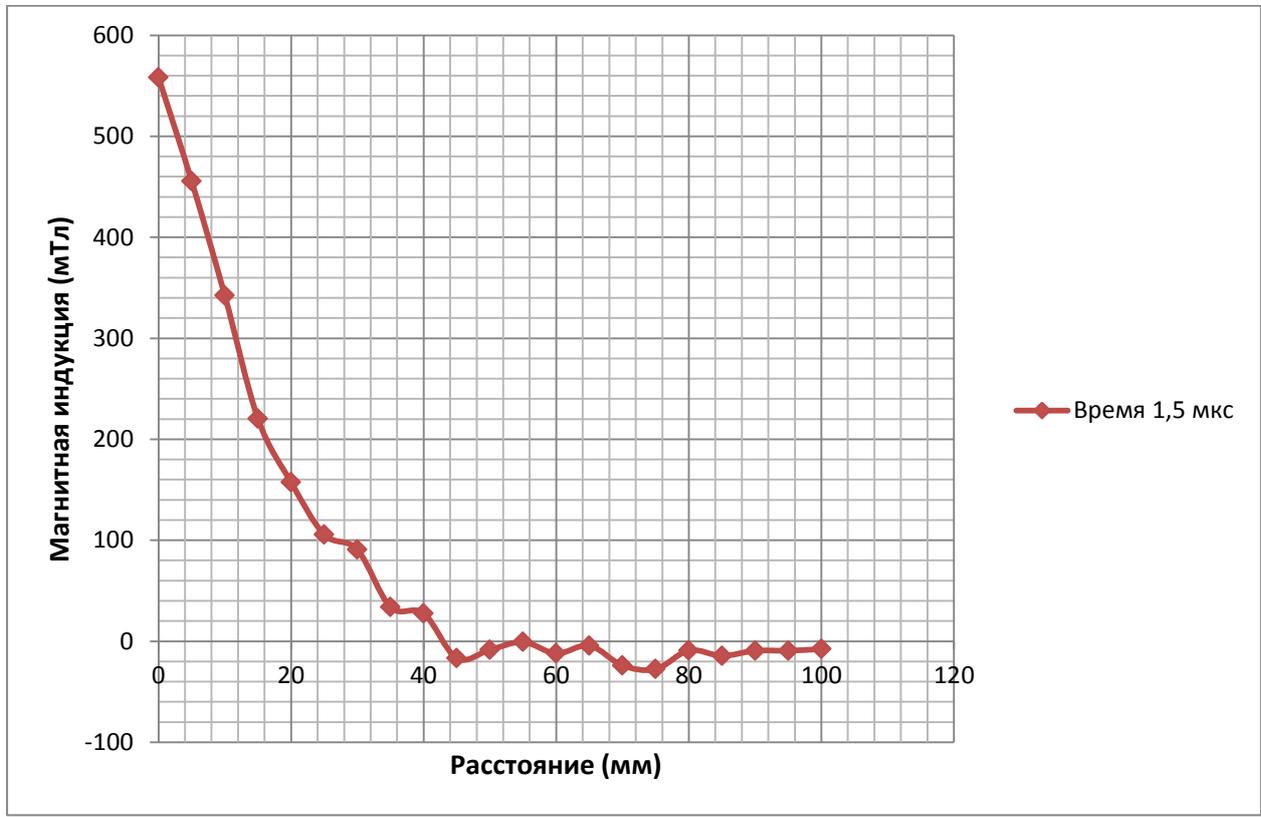


Рисунок 76 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1,5 мкс для модели «KL»

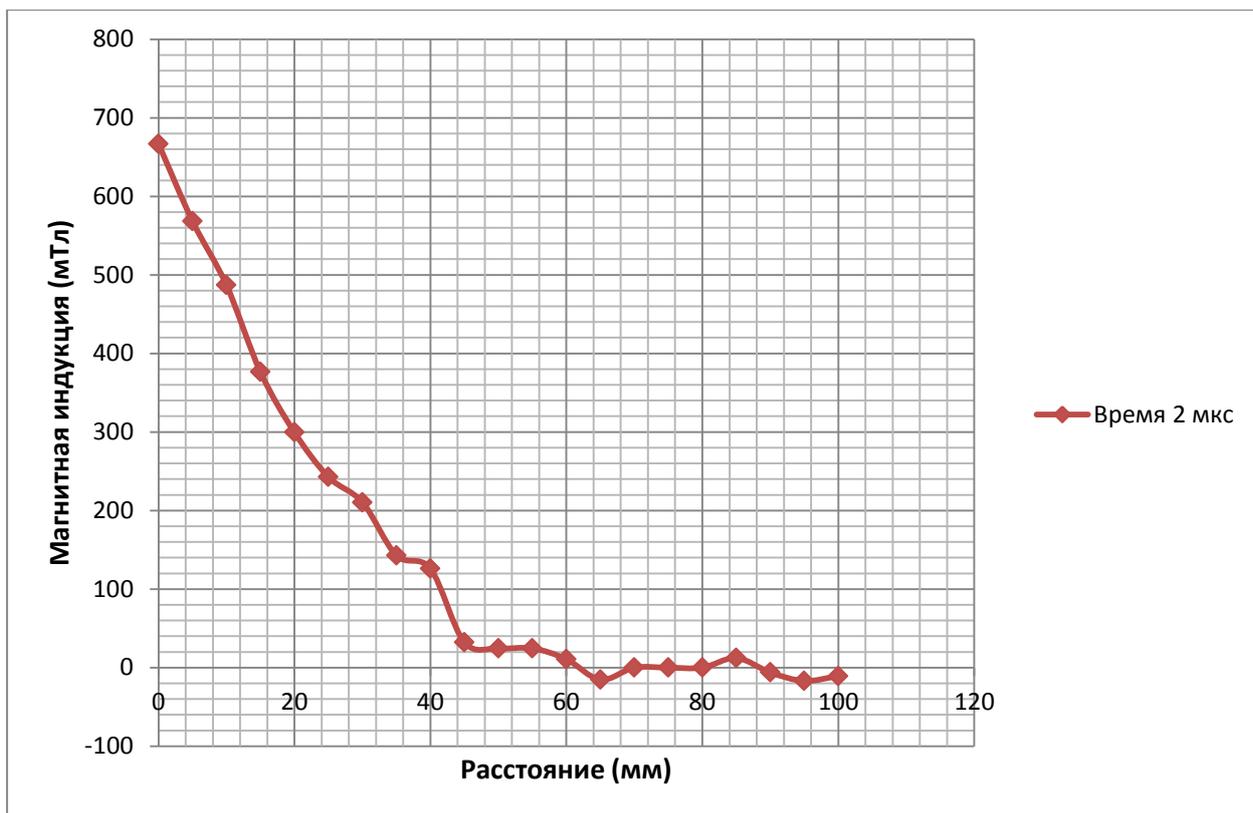


Рисунок 77 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2мкс для модели «KL»

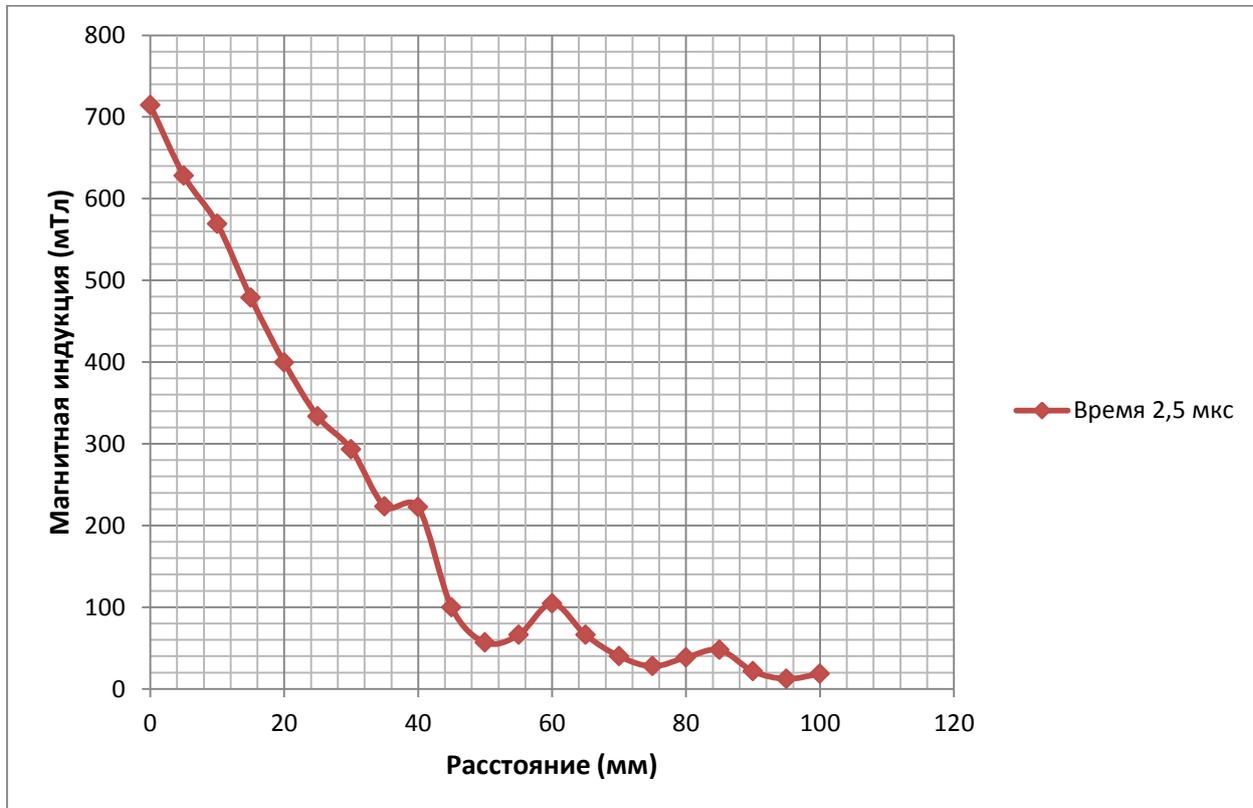


Рисунок 78 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2,5мкс для модели «KL»

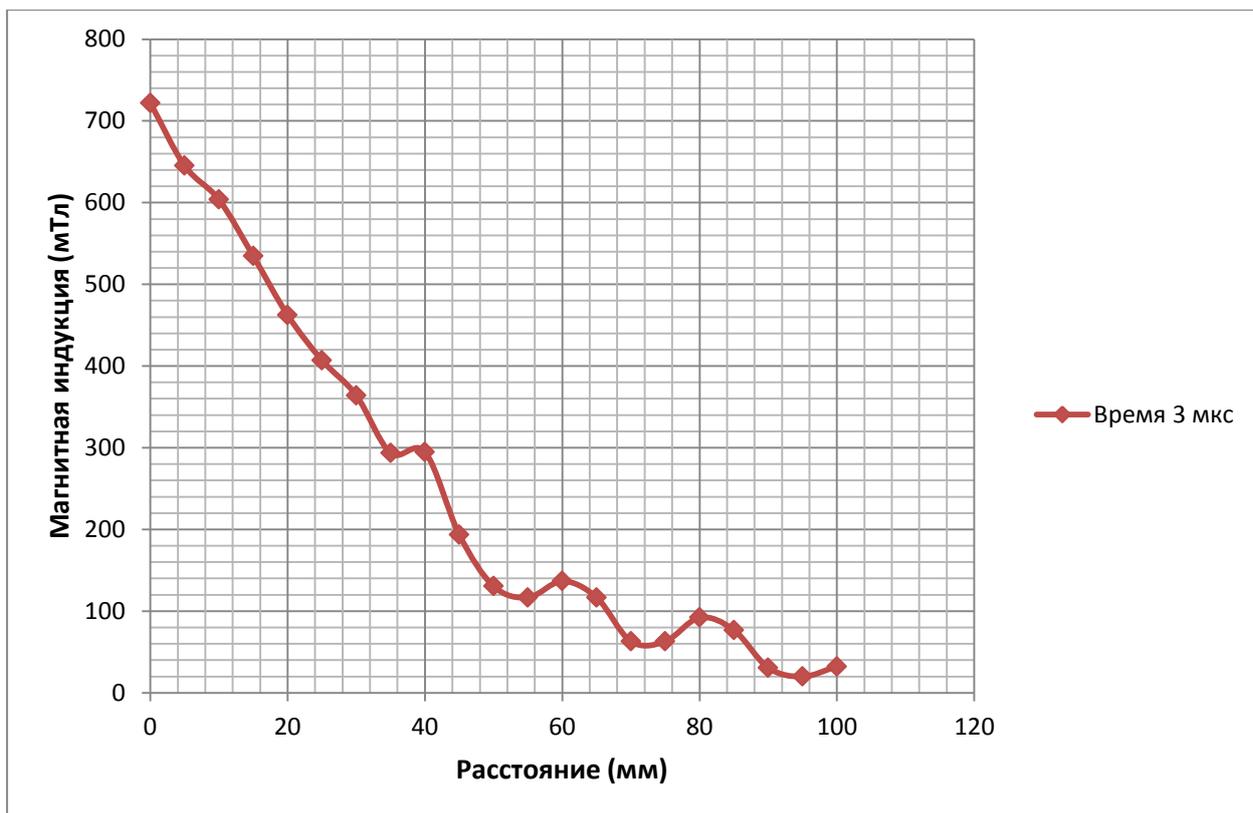


Рисунок 79 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 3мкс для модели «KL»

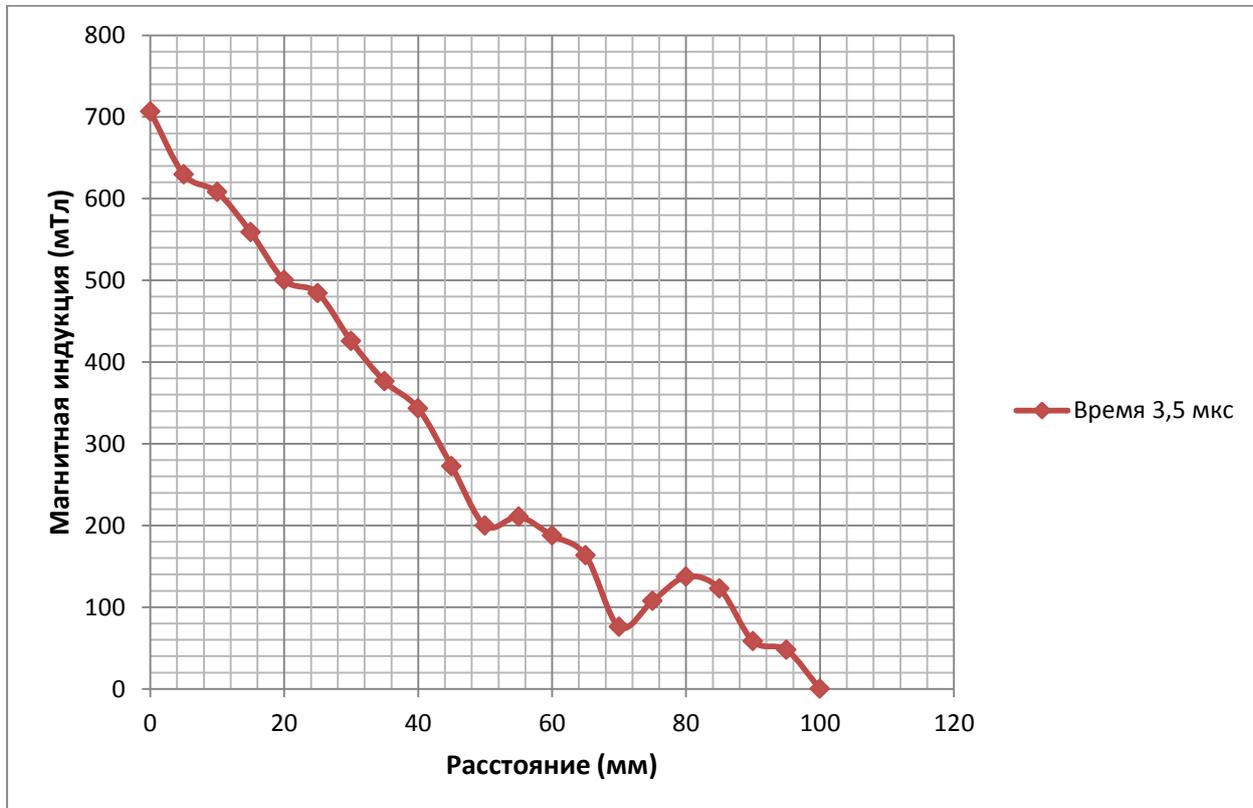


Рисунок 80 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 3,5мкс для модели «KL»

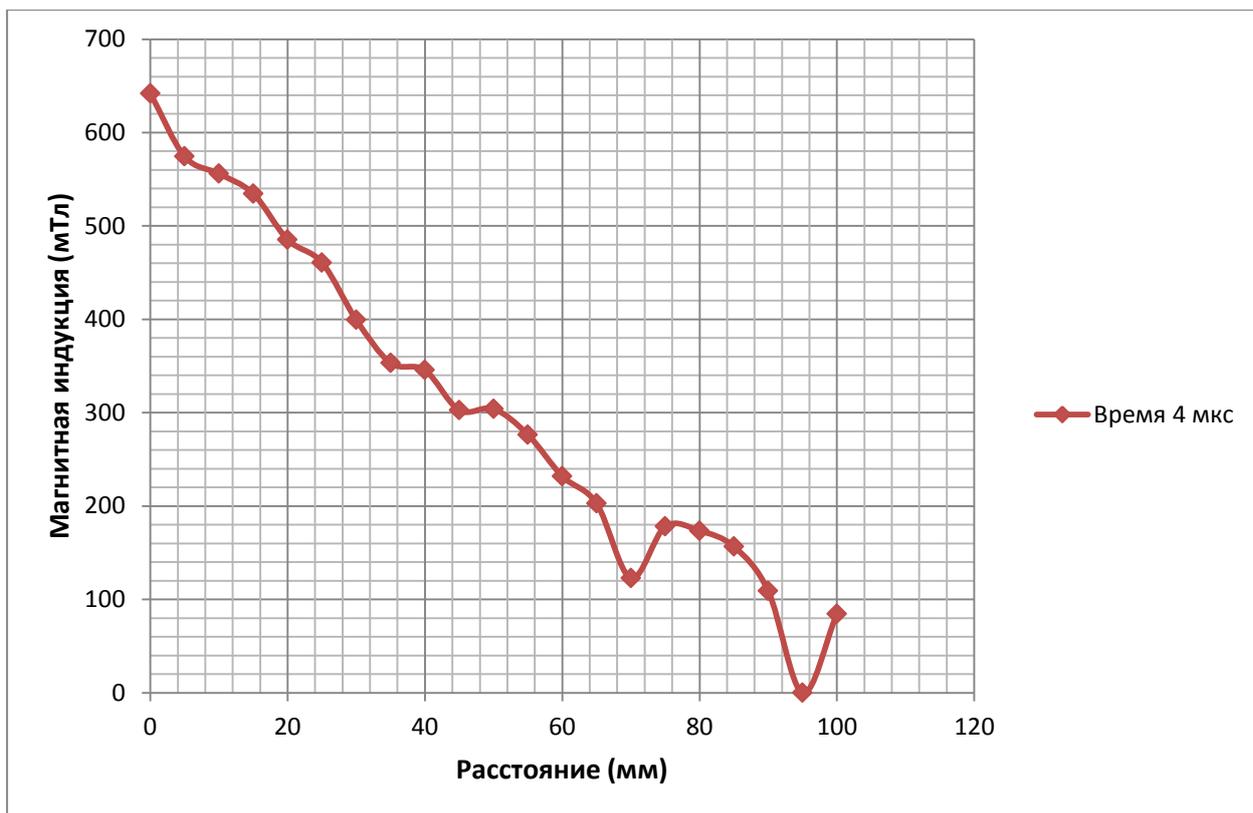


Рисунок 81 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 4мкс для модели «KL»

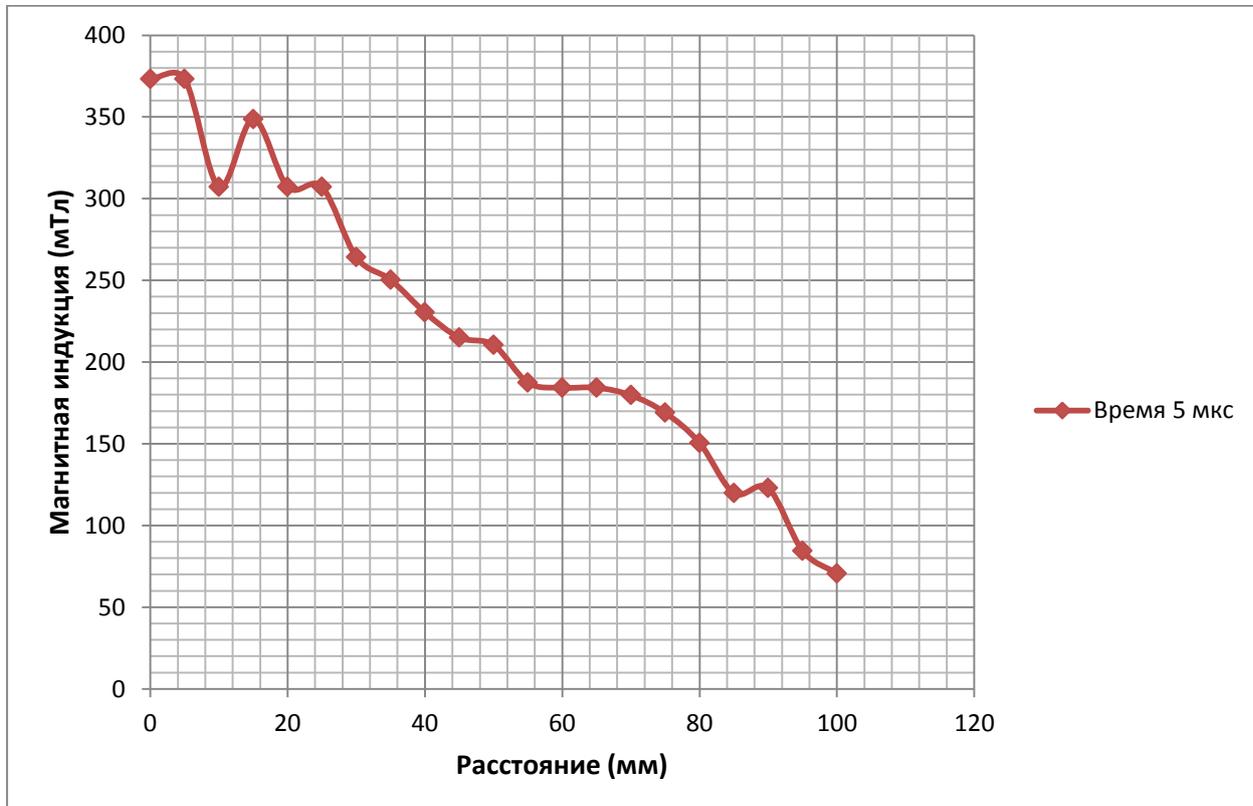


Рисунок 82 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 5мкс для модели «KL»

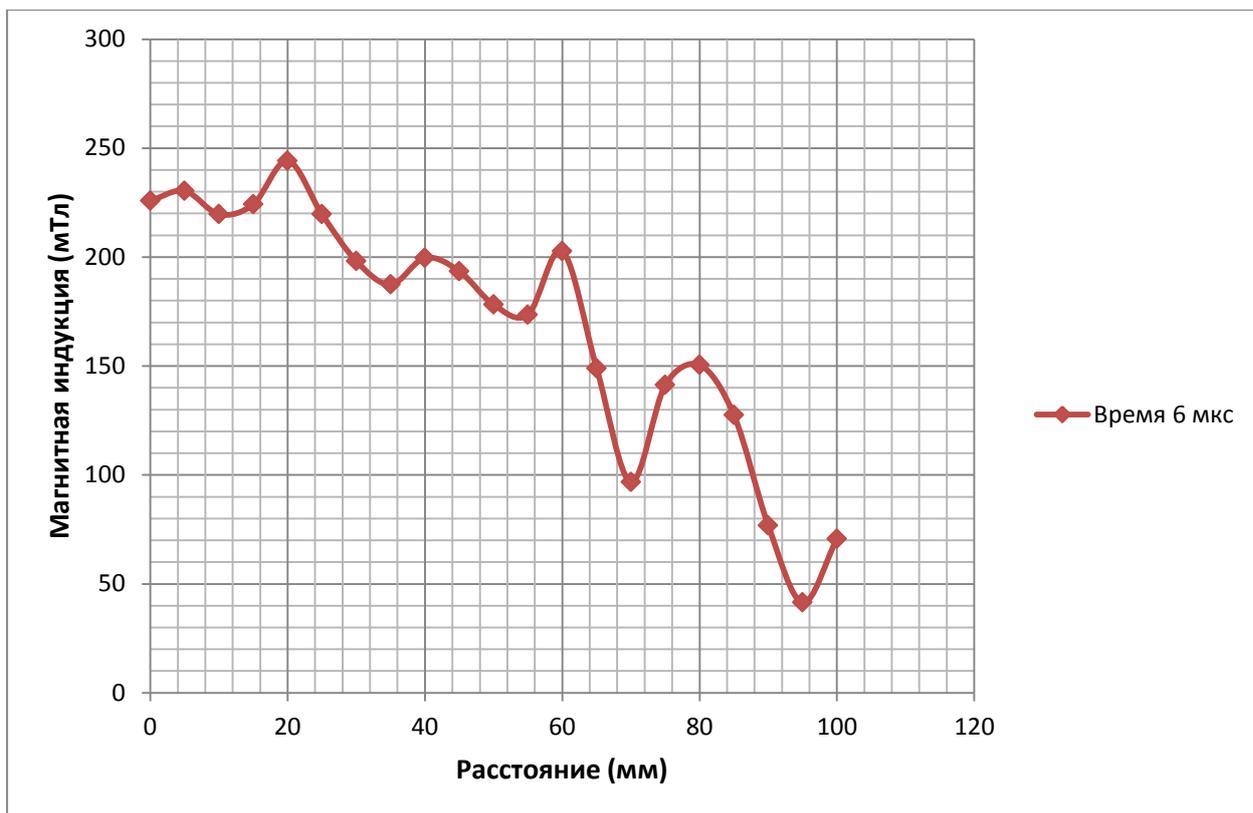


Рисунок 83 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 6 мкс для модели «KL»

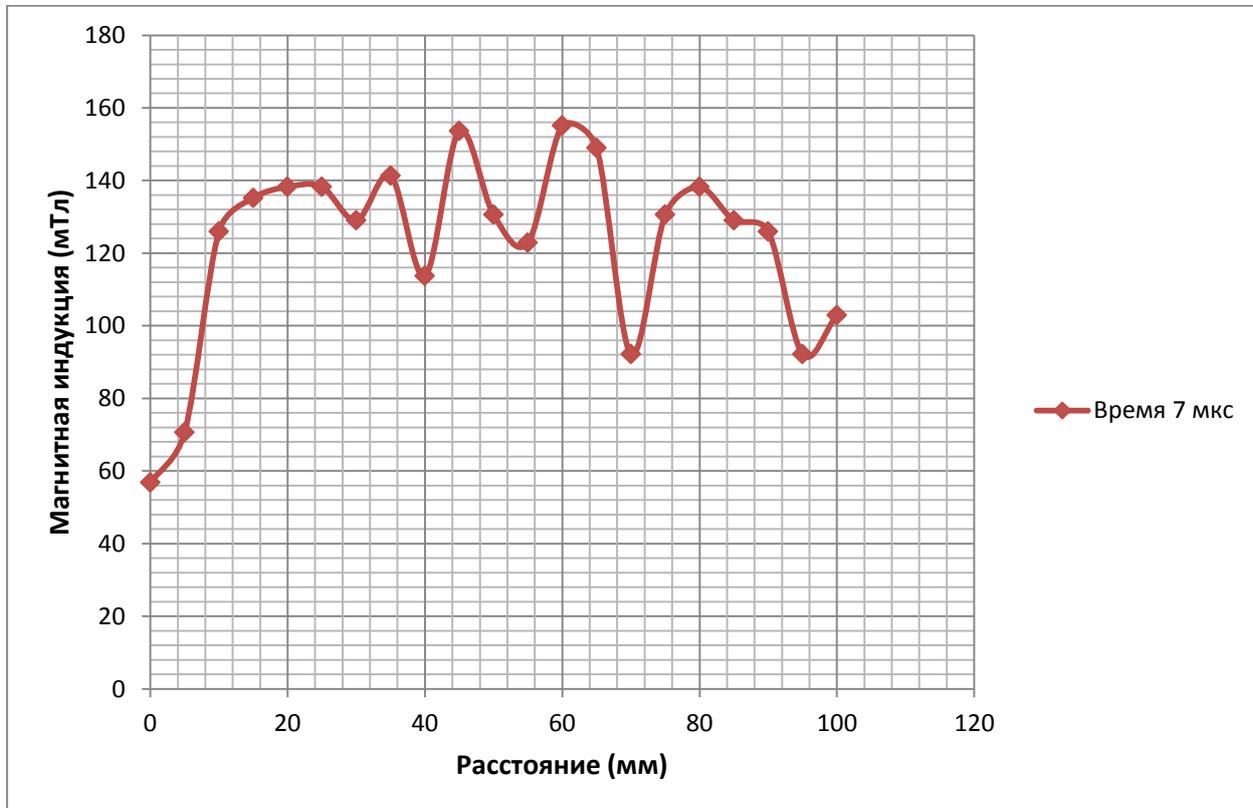


Рисунок 84 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 7 мкс для модели «KL»

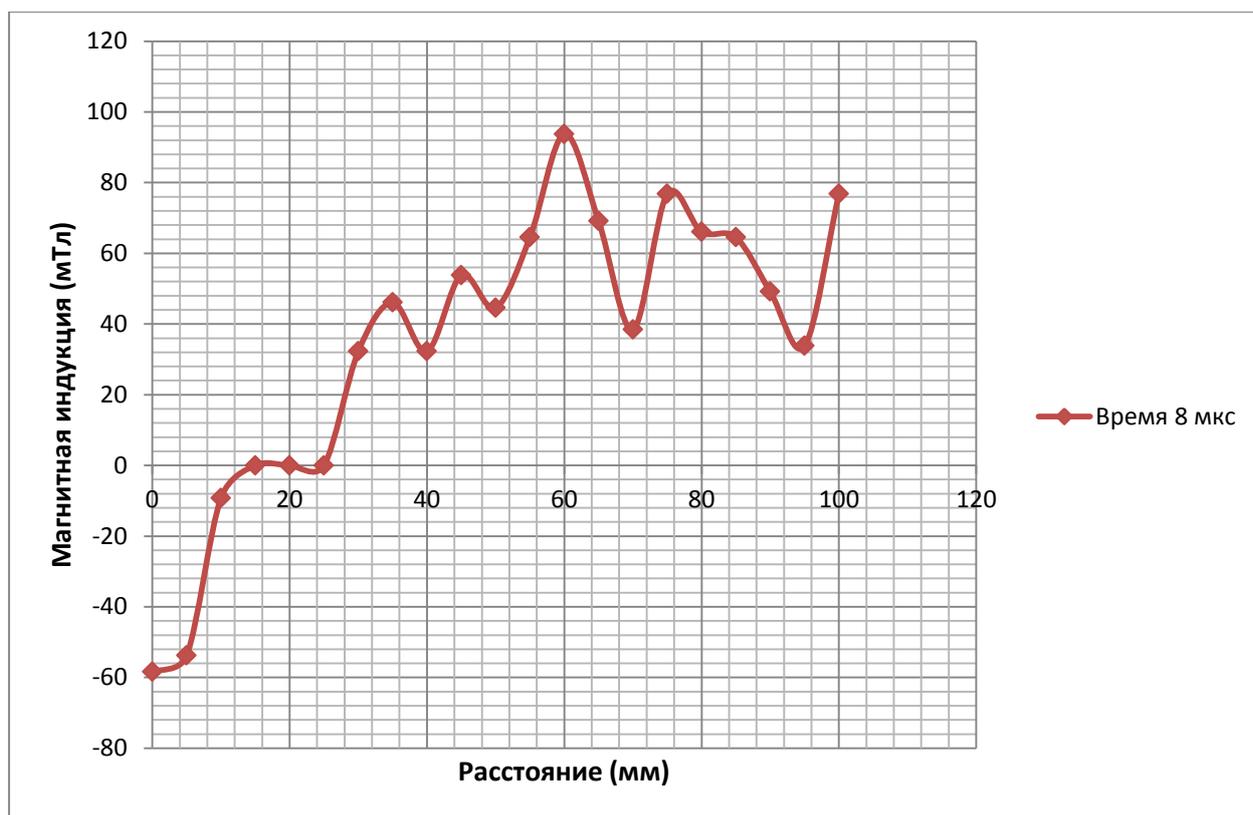


Рисунок 85 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 8мкс для модели «KL»

Результаты магнитозондовых измерений для модели с двойным обратным токоподводом «М» представлены на рисунках 86...98. Модель «М» имеет то же значение начальной индуктивности разрядного контура, что и модель «KL», соответственно, приблизительно такую же длительность разряда (см. осциллограммы разрядного тока, представленные на рисунках 63 и 64). Это позволяет сравнивать диаграммы изменения величины магнитной индукции по длине канала в одинаковые моменты времени. Видно, что при том же, и даже несколько меньшем максимальном значении магнитной индукции 0,65-0,70 Тл, в целом по длине канала магнитное поле возросло. Это видно из сравнения диаграмм, полученных в равные моменты времени, например, диаграмм, представленных на рисунках 78 и 91, соответствующих моменту времени 2,5 мкс.

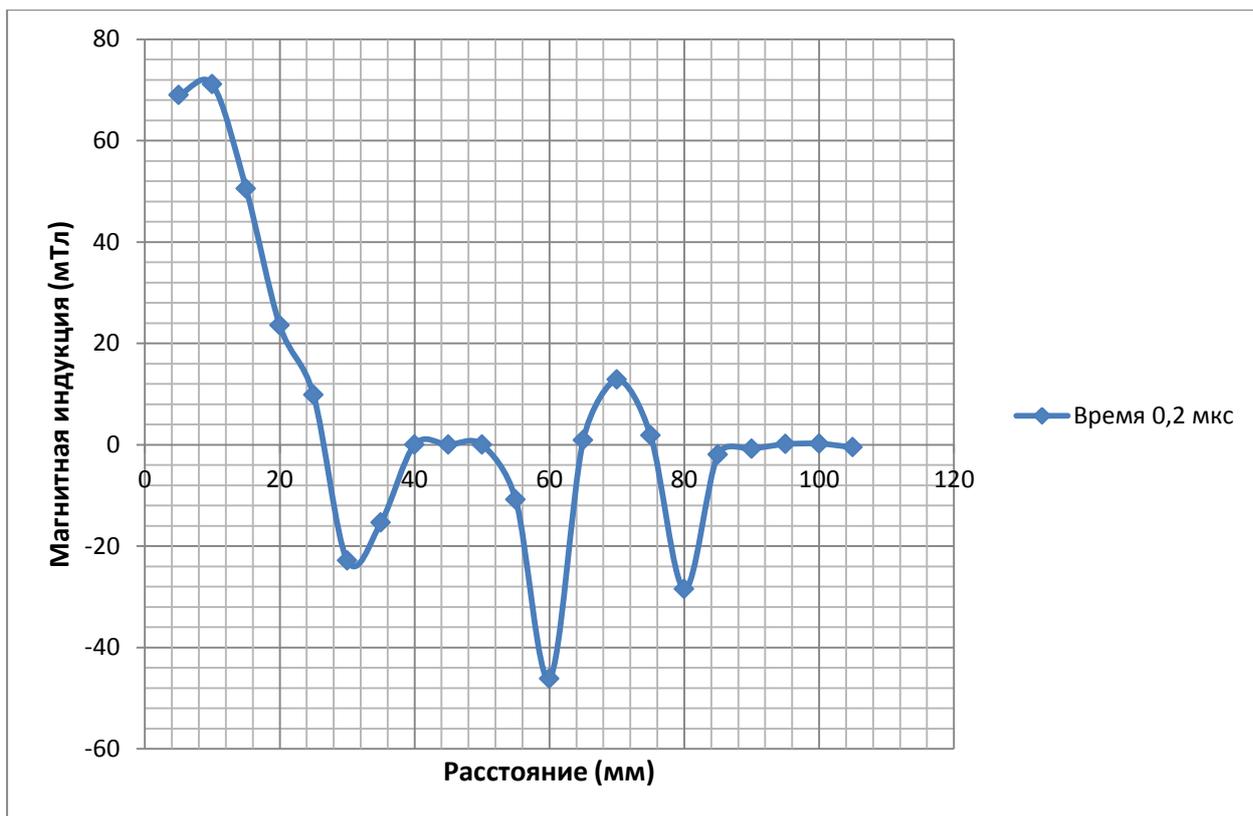


Рисунок 86 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,2мкс для модели «М»

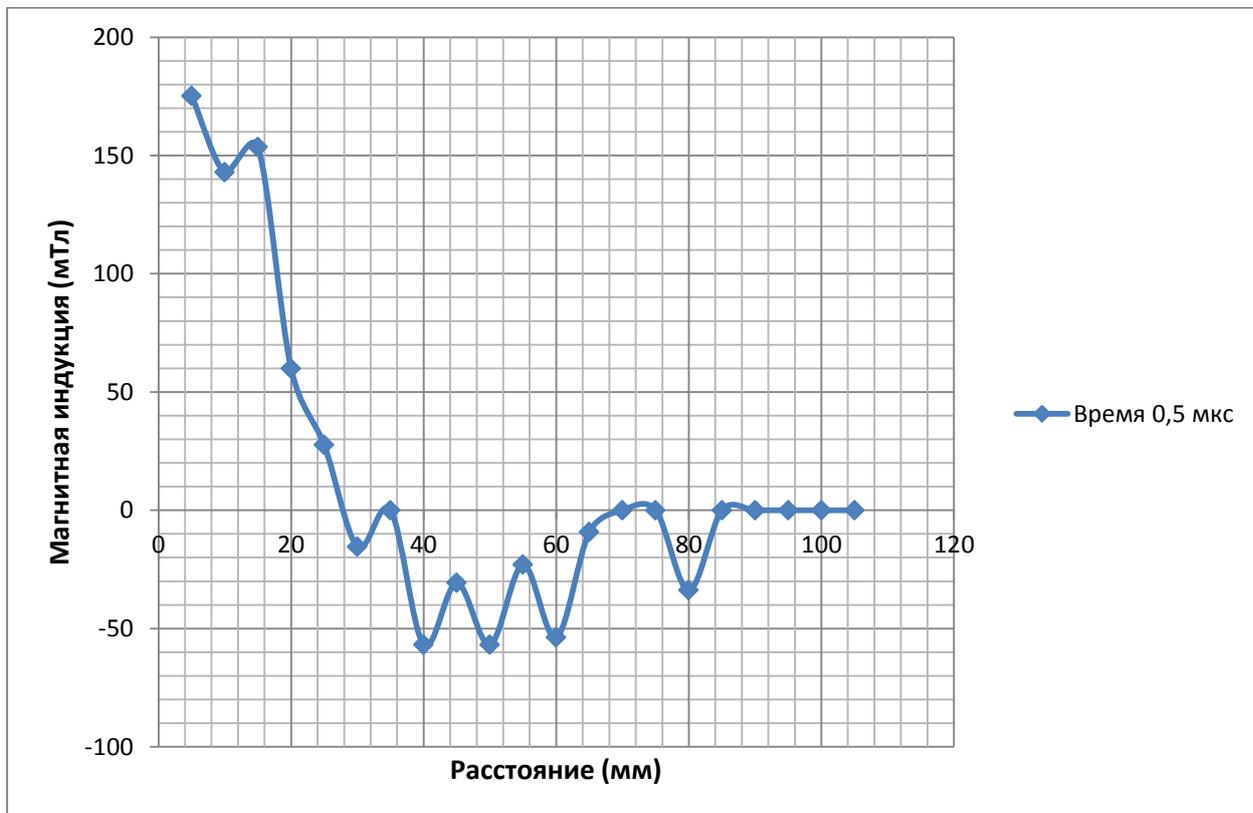


Рисунок 87 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 0,5мкс для модели «М»

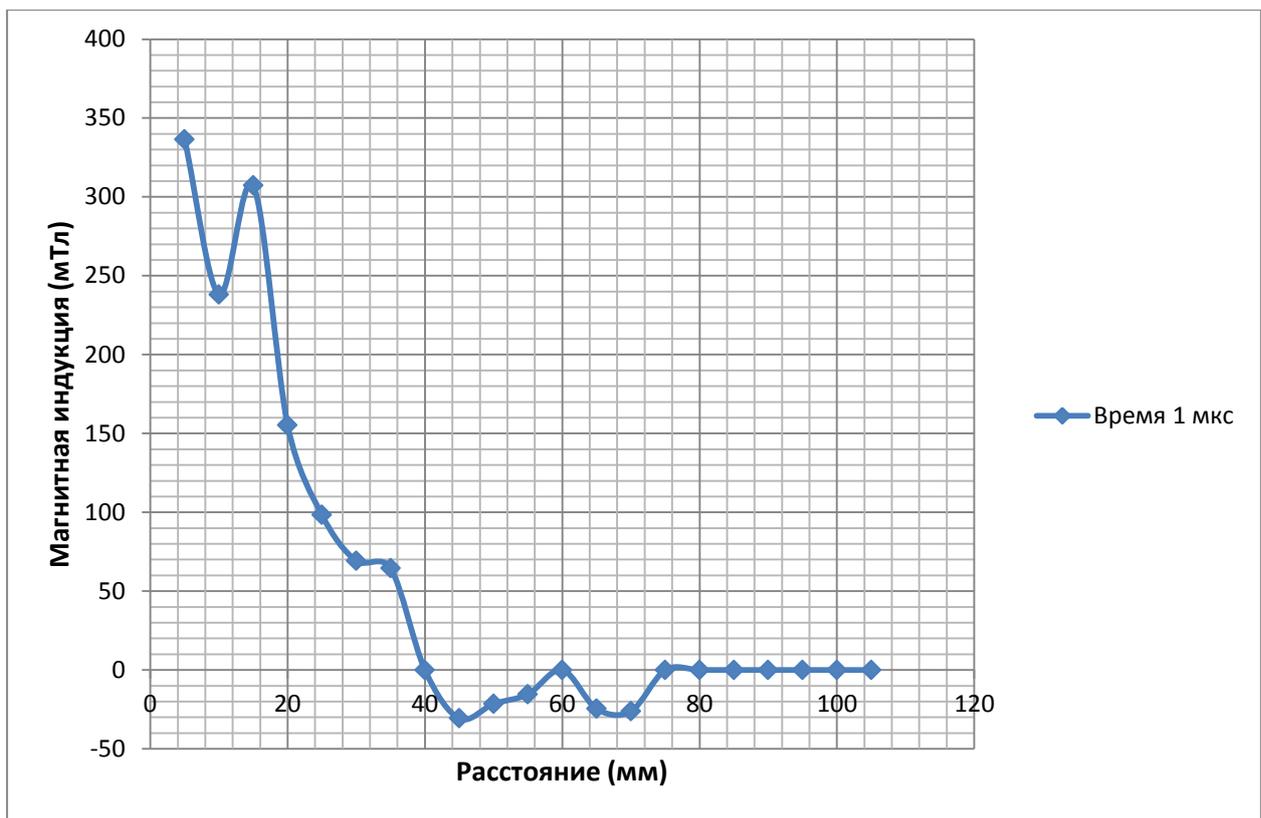


Рисунок 88 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1 мкс для модели «М»

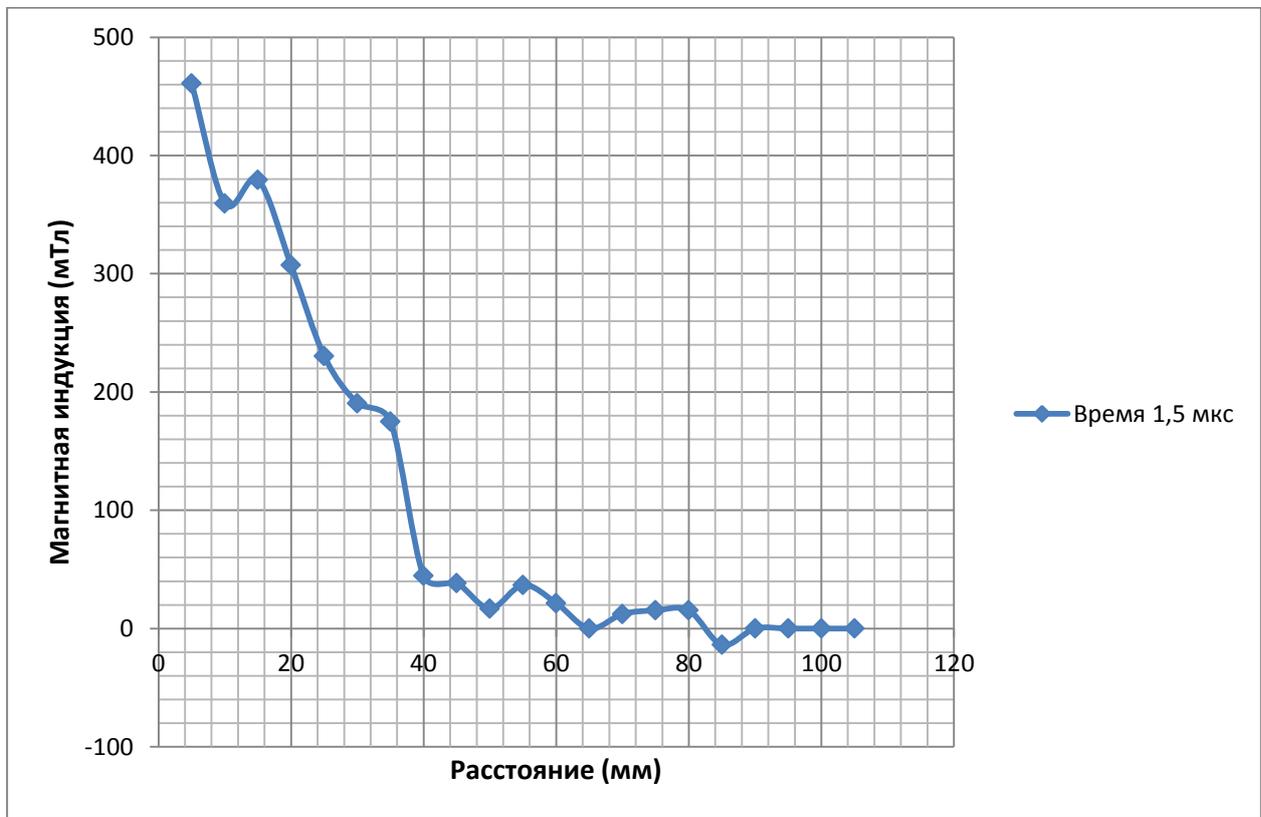


Рисунок 89 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 1,5 мкс для модели «М»

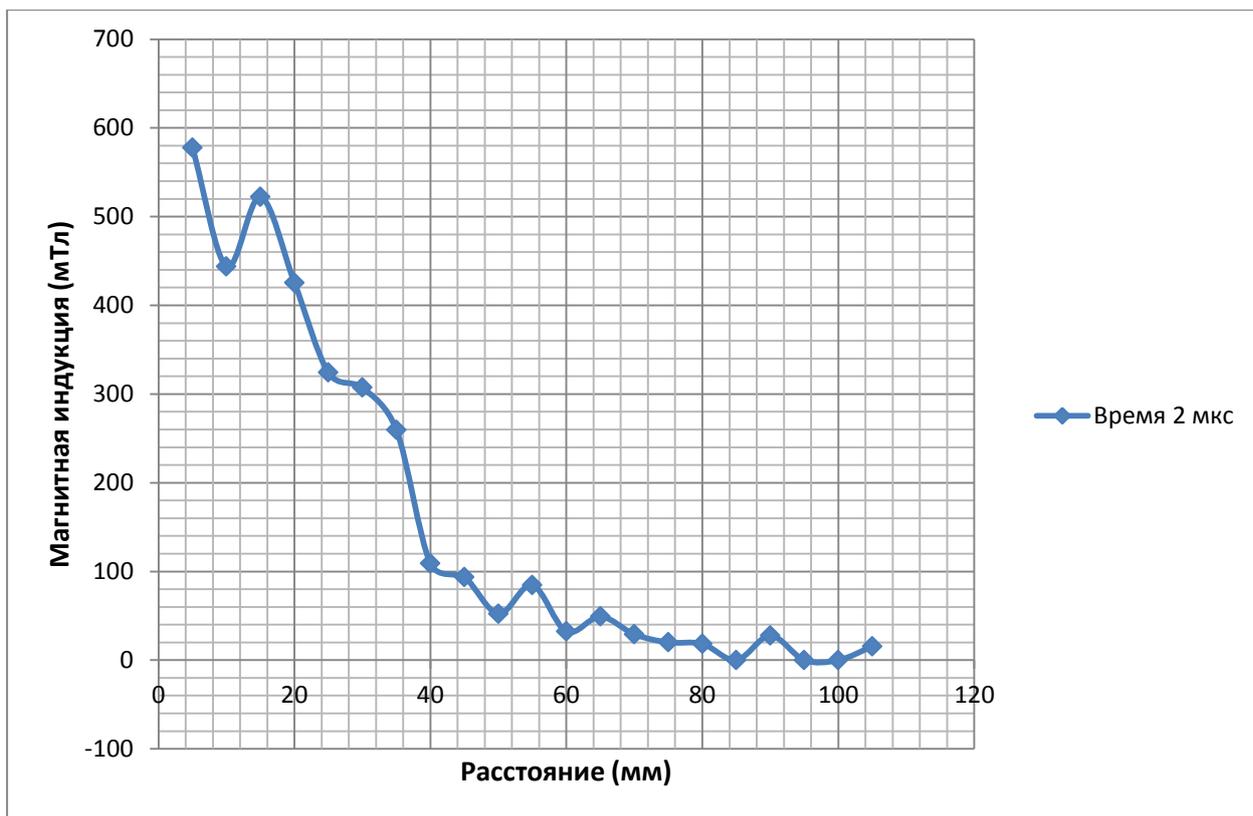


Рисунок 90 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2мкс для модели «М»

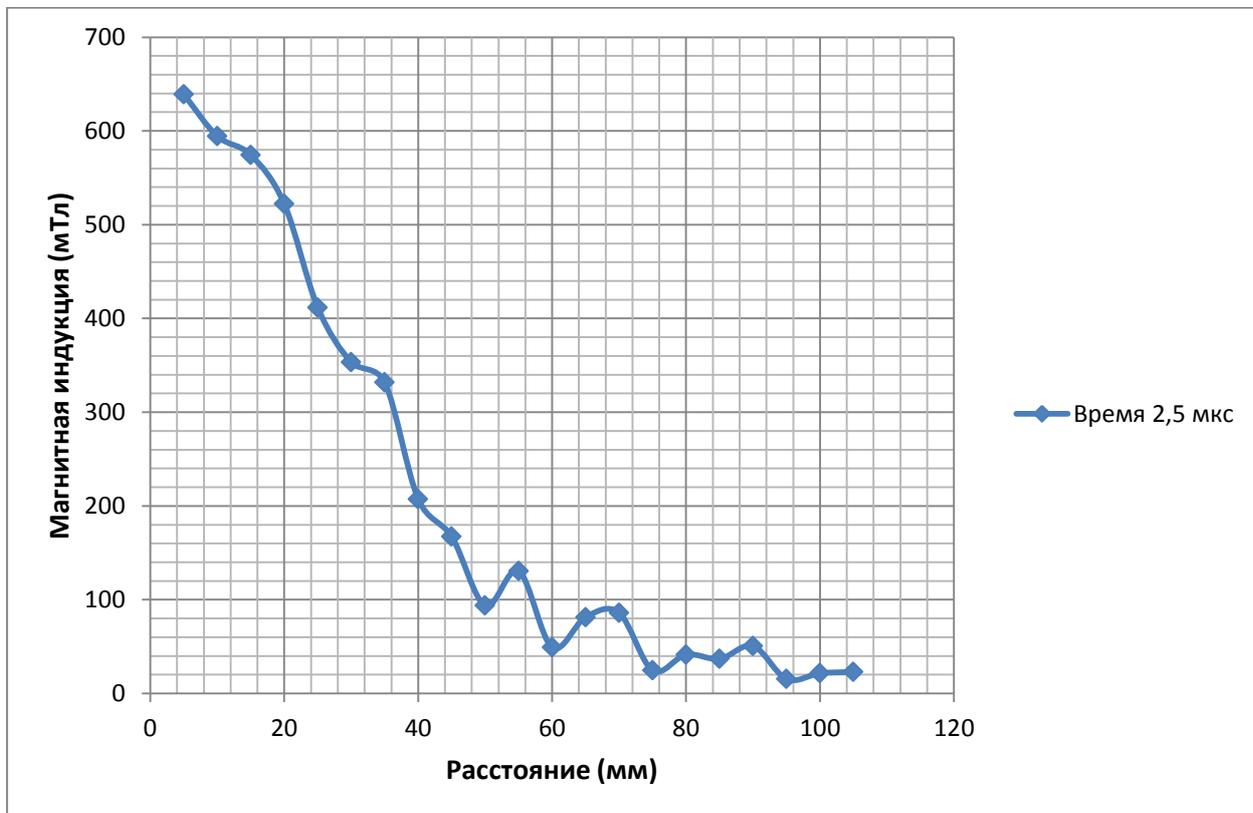


Рисунок 91 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 2,5мкс для модели «М»

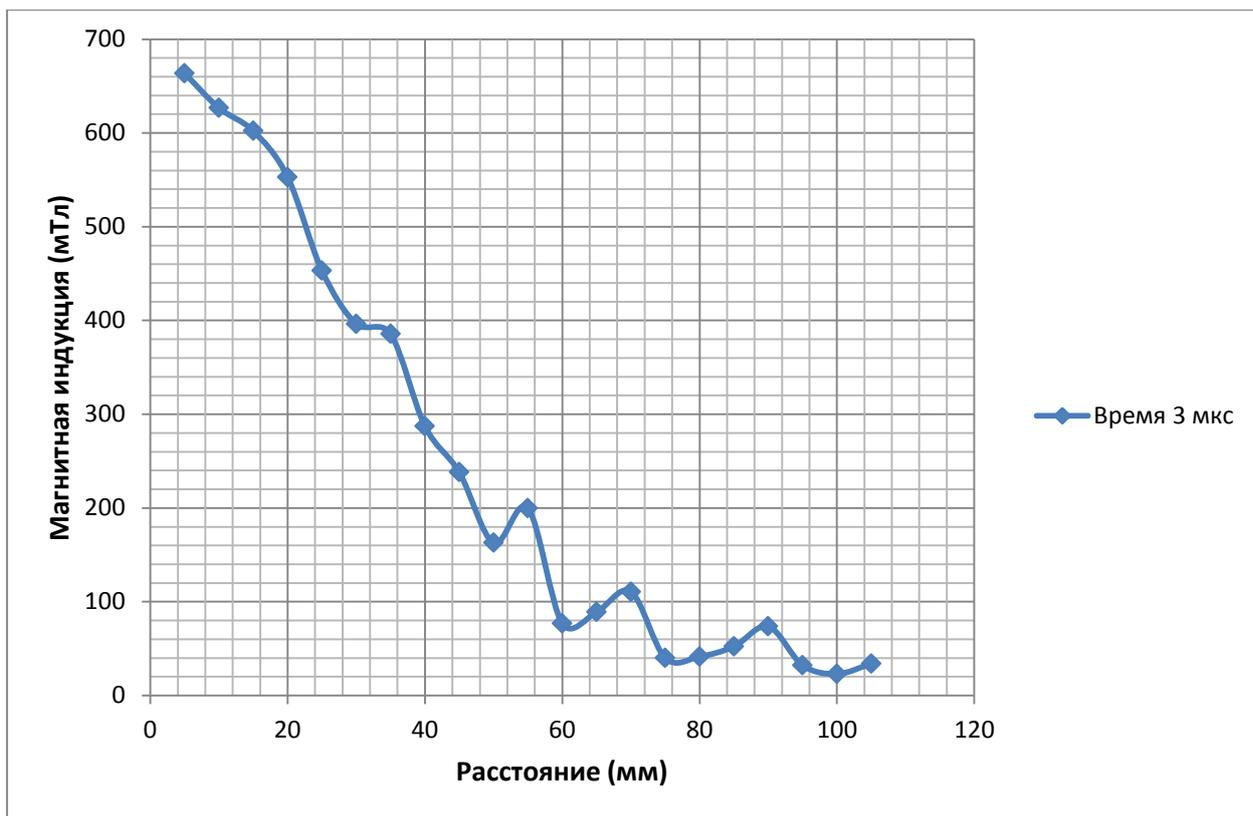


Рисунок 92 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 3мкс для модели «М»

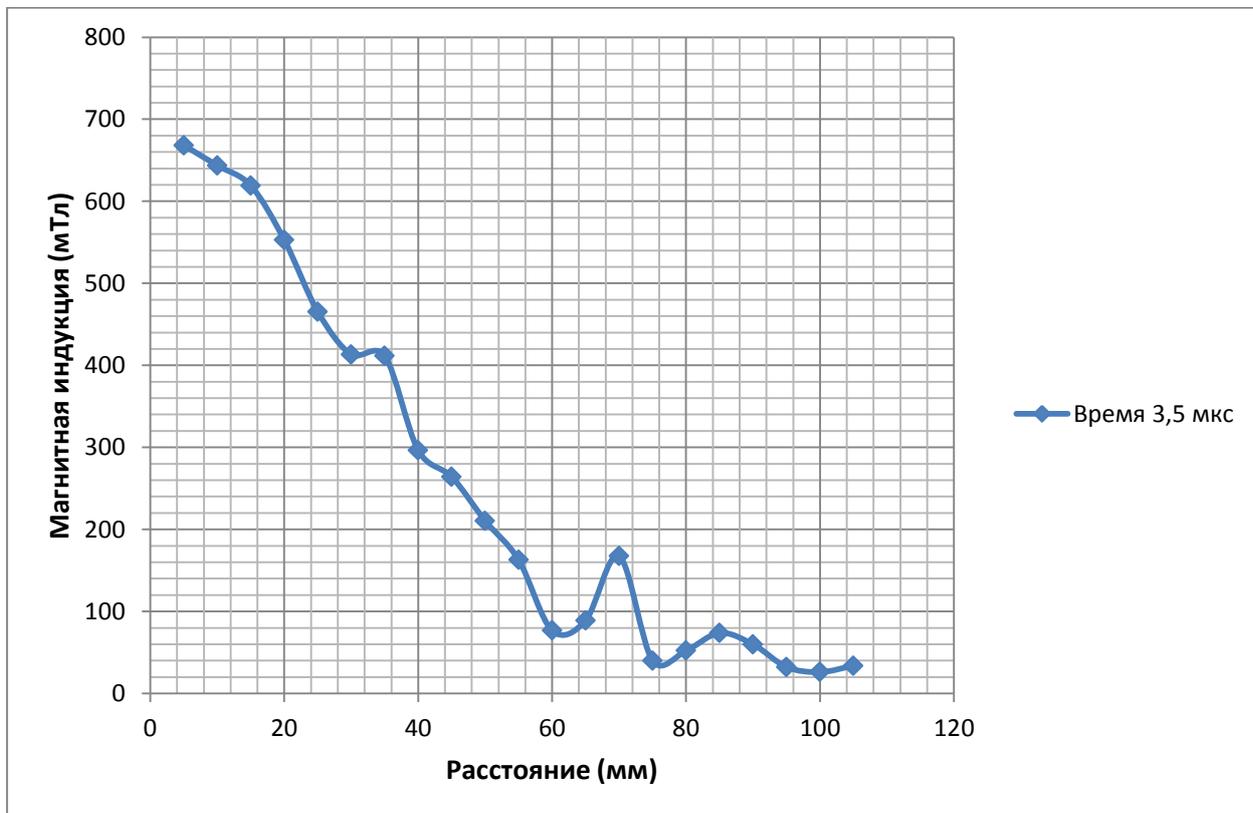


Рисунок 93 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 3,5мкс для модели «М»

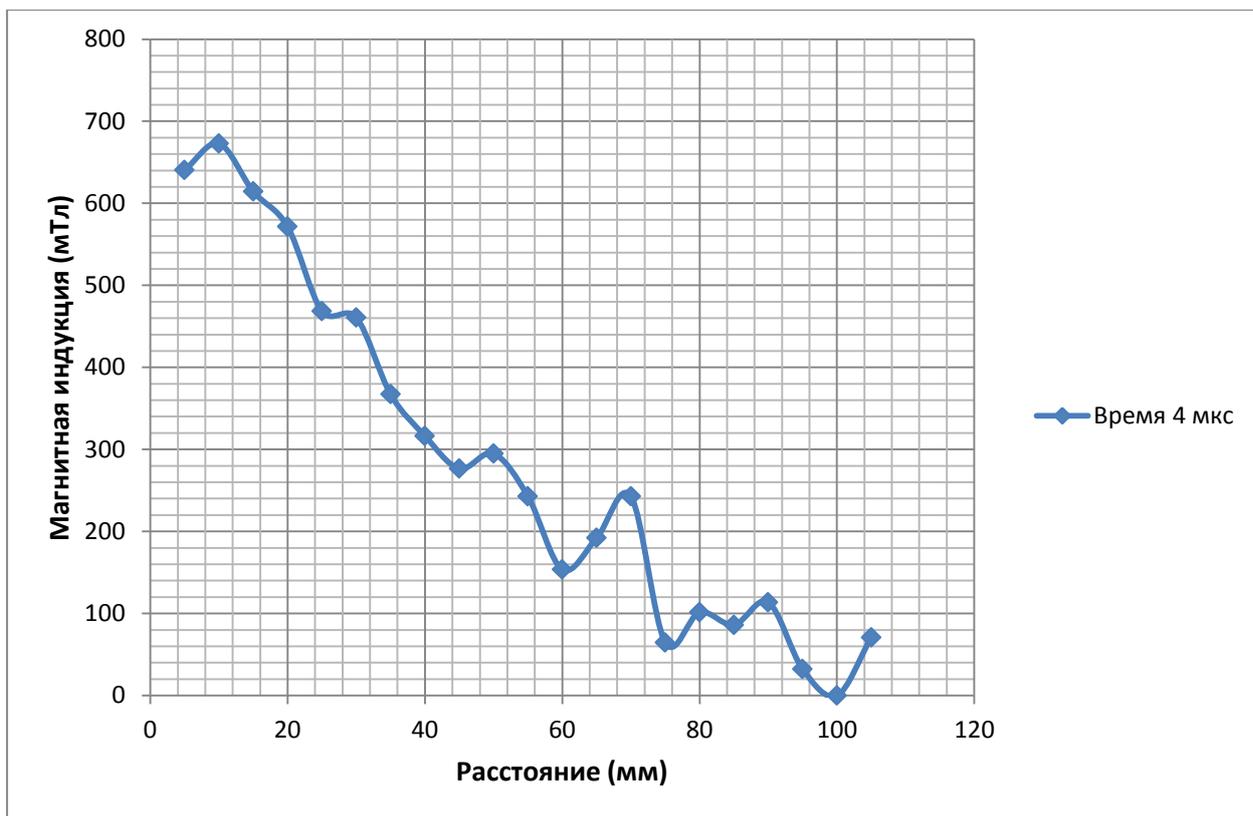


Рисунок 94 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 4мкс для модели «М»

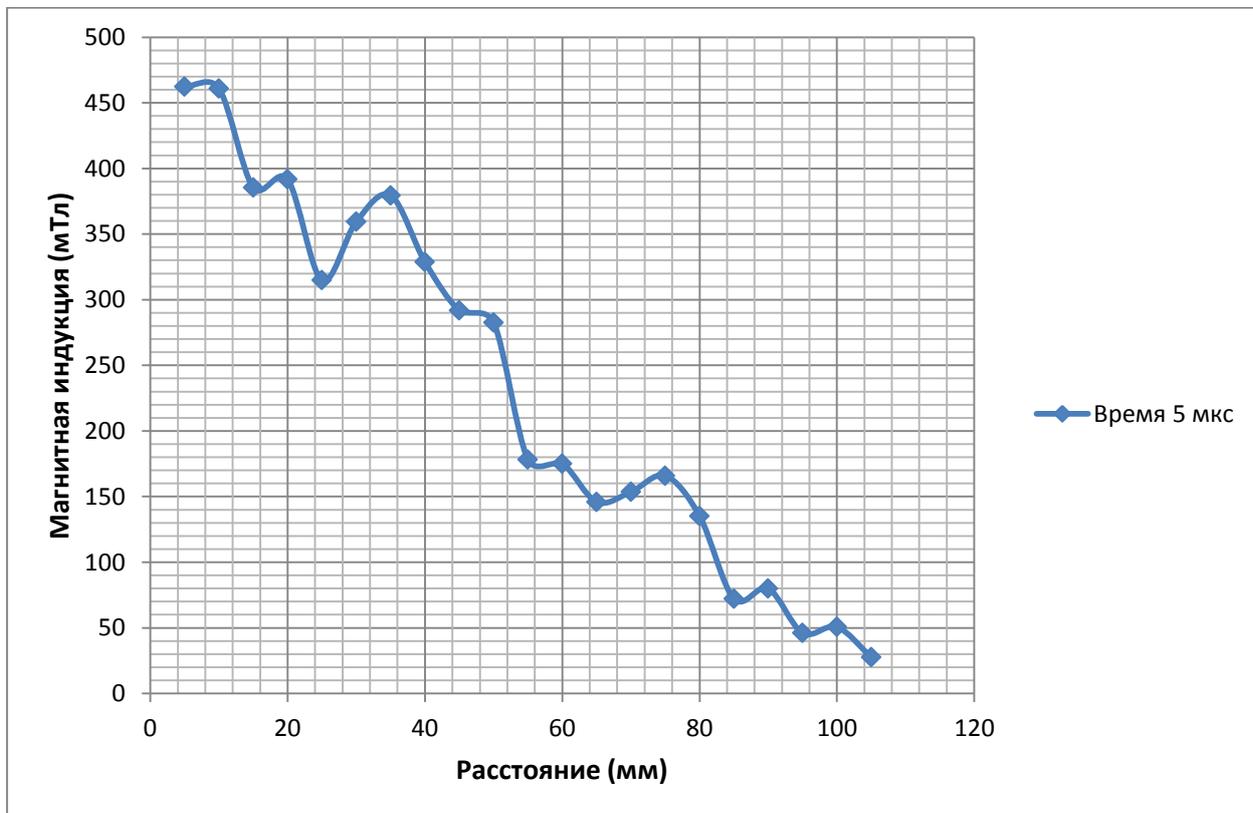


Рисунок 95 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 5мкс для модели «М»

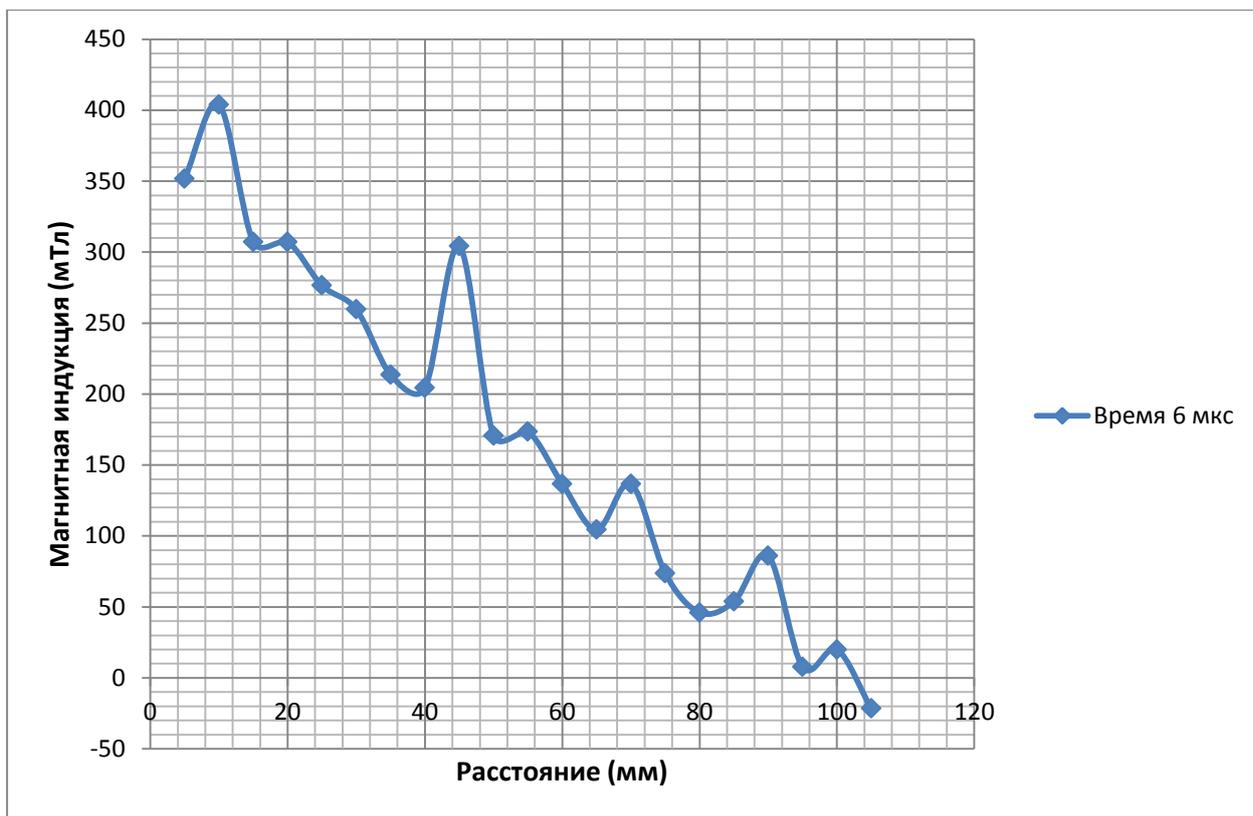


Рисунок 96 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 6 мкс для модели «М»

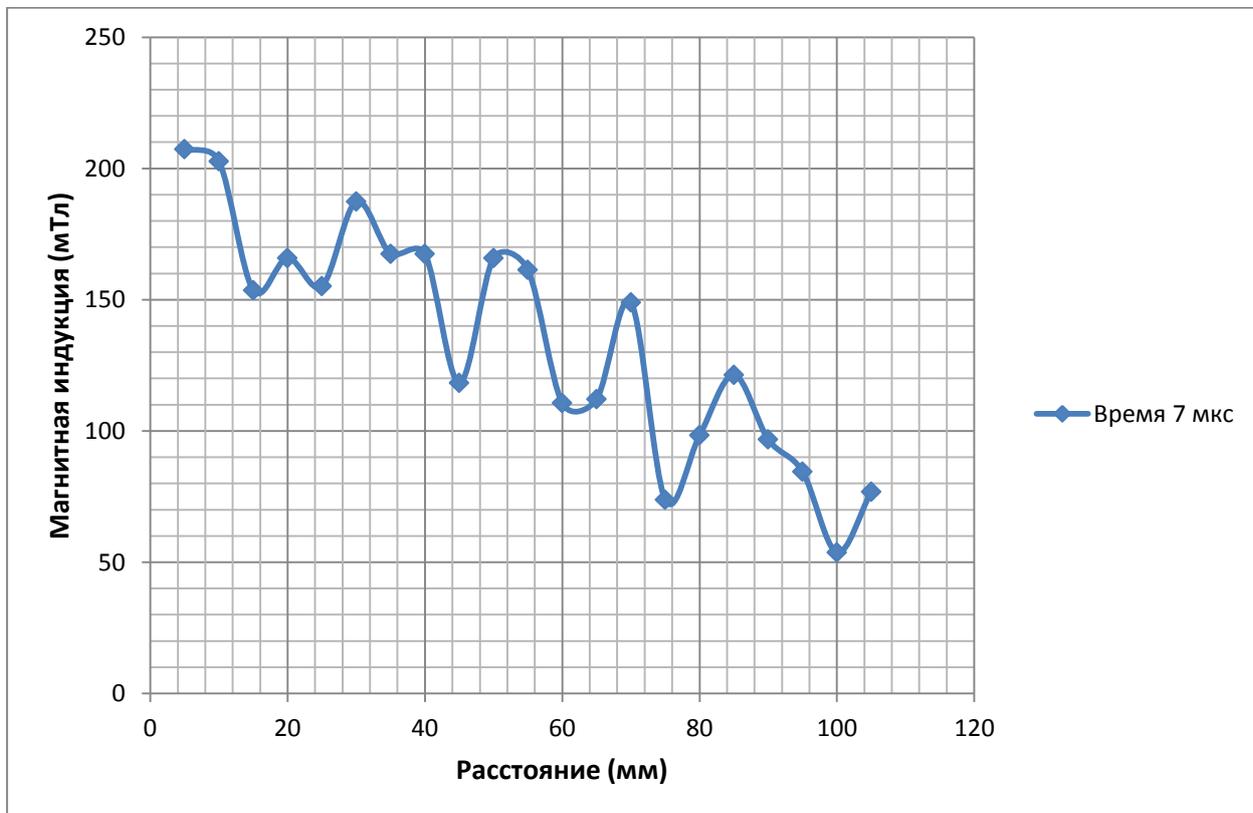


Рисунок 97 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 7 мкс для модели «М»

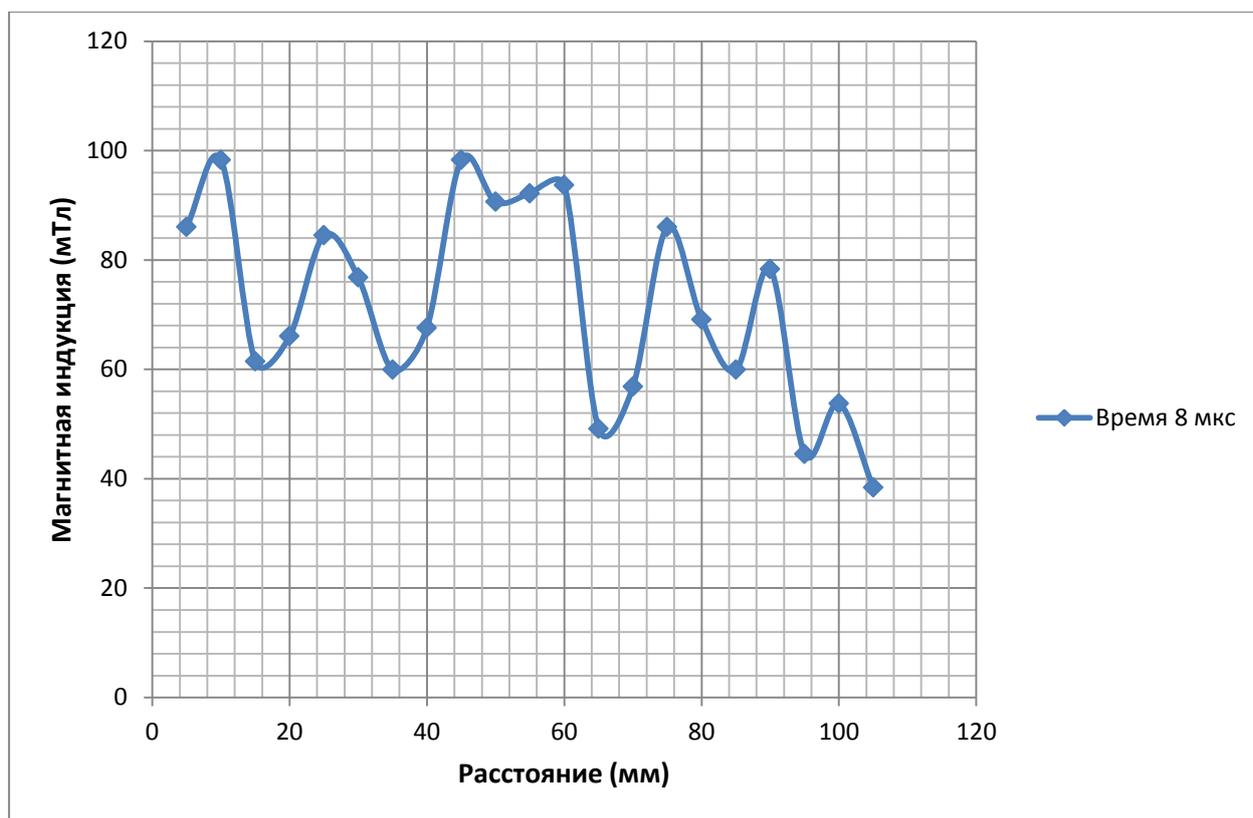


Рисунок 98 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при времени 8мкс для модели «М»

При аналогичном сравнении результатов магнитозондовых измерений по всем трём моделям надо учитывать, что из-за значительного различия разрядов моделей, в частности длительности первого полупериода разряда базовой модели «К» и модифицированной модели «М» отличаются в 1,3 раза. Соответственно, не совпадают узловые точки осциллограмм тока и магнитного поля. Для того, чтобы более корректно осуществить сопоставление полученных результатов, графики сравниваемых моделей целесообразно перестроить при безразмерной (относительной) величине времени, аналогично расчётной модели, приведенной в разделе 4.2 данной работы.

Формула 4.17 вытекает из формулы 4.16 при ряде преобразований. Величина сопротивления разрядного контура приблизительно равна 1мОм. При постановке данной величины в формулу, преобразуем её в вид 4.16, при этом пренебрегая членом с сопротивлением, так как в данном случае  $R^2/4L_0^2 \ll 1/L_0C$ .

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (4.16)$$

$$\tau = \frac{t}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4.17)$$

где  $\tau$  – безразмерное время,

$t$  – размерная величина времени,

$L$  – индуктивность электрической цепи,

$C$  – ёмкость батареи.

Вид осциллограмм моделей «М», «KL» и «К», наложенных друг на друга при безразмерных (относительных) величинах времени, представлен на рисунке 99.

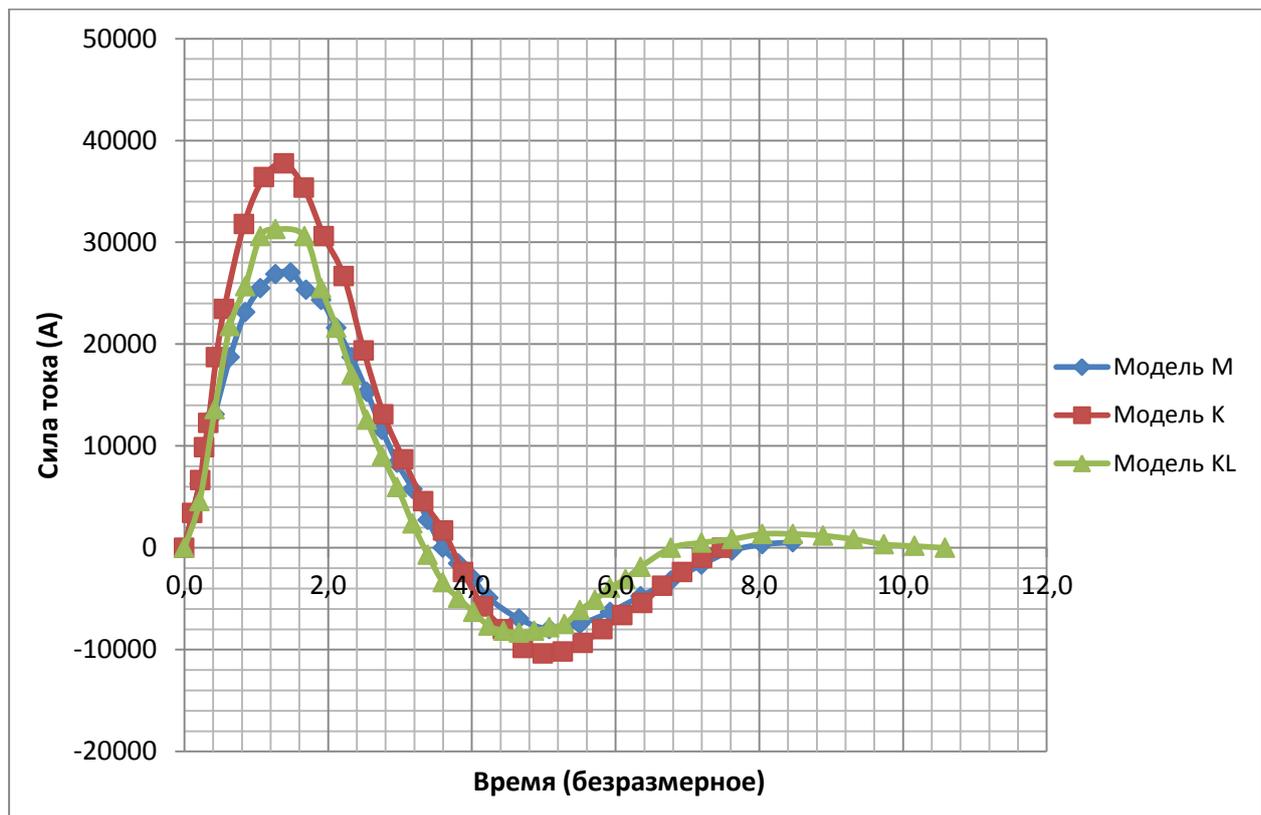


Рисунок 99 – Осциллограммы тока моделей «М», «KL» и «К» при безразмерной величине времени

Как видно из рисунка 99, наблюдается практически точное согласование осциллограмм в точках максимума и минимума, а также при пересечении с осью,

что даёт возможность более корректно сравнить и сами результаты магнитозондовых измерений. В частности, длительность первого полупериода разрядного тока для всех трех моделей приблизительно соответствует величине  $\pi$ , отклонение от которой объясняется влиянием на длительность разряда омического сопротивления.

Для анализа результатов магнитозондовых измерений, представленных на рисунках 66...98, приведём их к безразмерной (относительной) величине времени и наложим друг на друга. Полученные результаты представлены ниже, на рисунках 100...112. Для наглядности, комментарии, описывающие развитие разряда, приведены в подписях к рисункам.

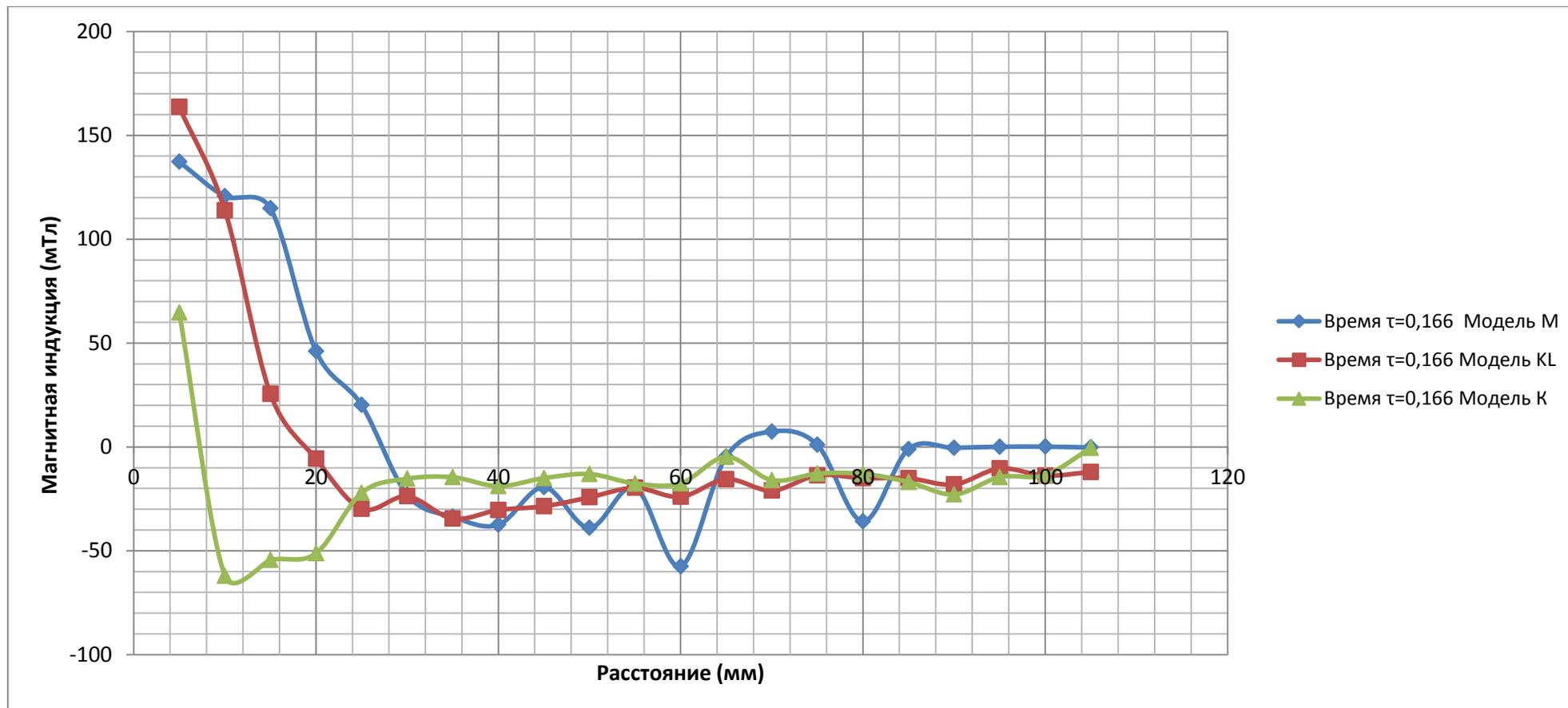


Рисунок 100 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 0,166 для моделей «М», «KL» и «K». Величина магнитного поля базовой модели «K» в начале разрядного канала существенно ниже, чем у модернизированных моделей «KL» и «M». Это приблизительно соответствует магнитному полю неподвижных участков разрядной цепи, показанного на рисунке 61, так как разряд в плазме еще не получил должного развития

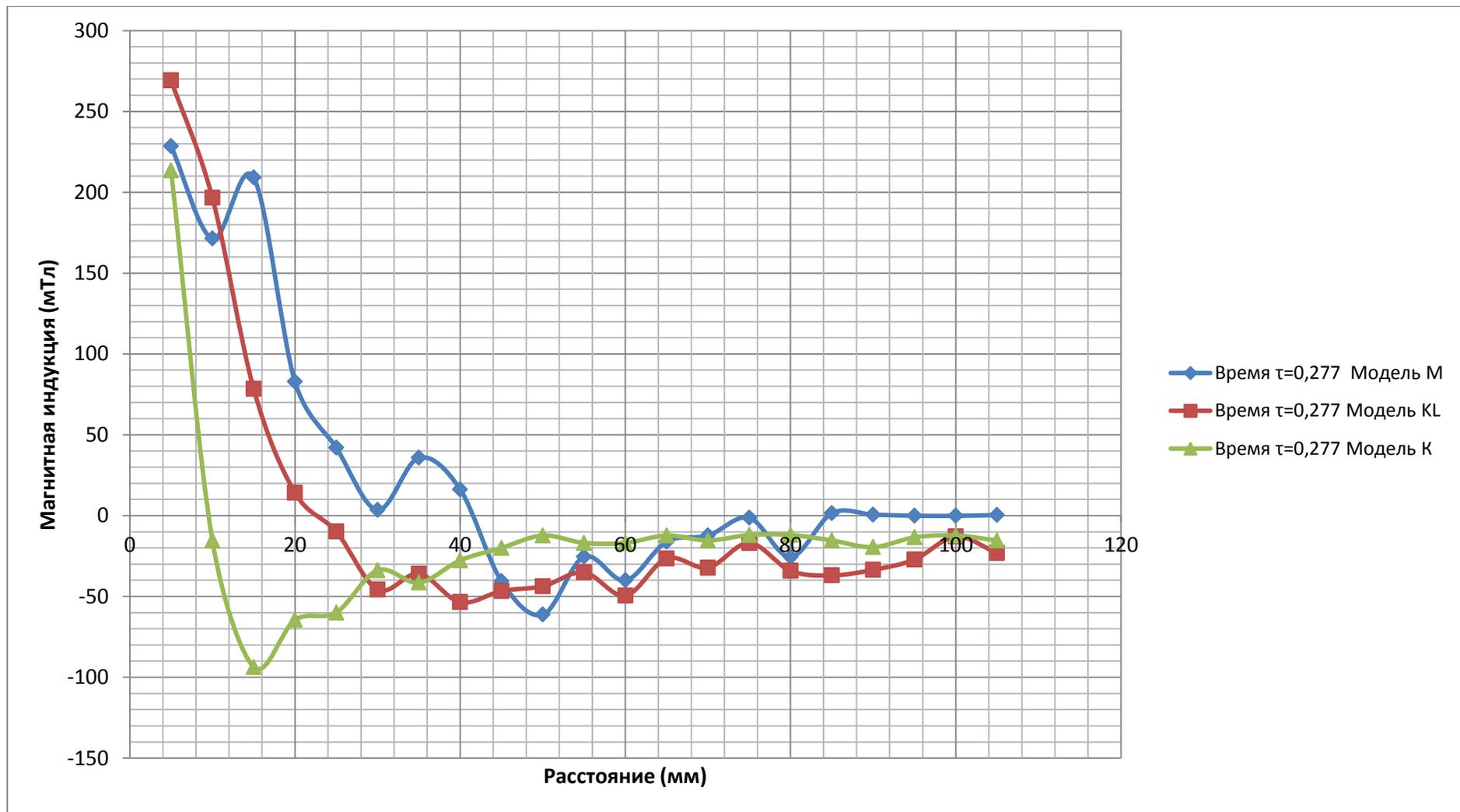


Рисунок 101 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 0,277 для моделей «М», «KL» и «K». Характер распределения магнитных полей сохраняется. Наблюдается заметно бóльшая величина магнитного поля модели «М» с двойным обратным ток подводом

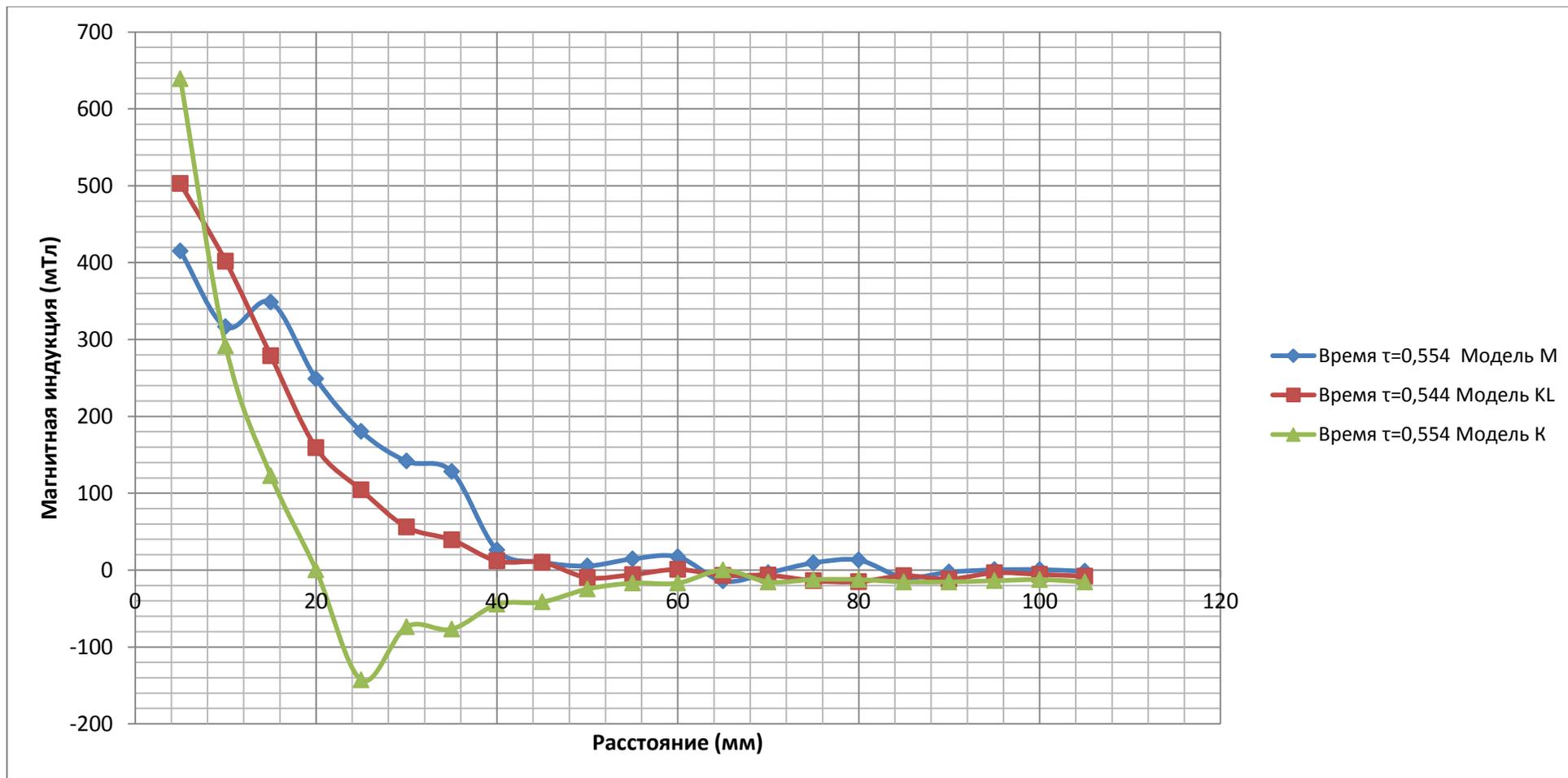


Рисунок 102 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 0,554 для моделей «М», «KL» и «K». Характер распределения магнитных полей сохраняется. Наблюдается существенное отставание точки переполюсовки сигнала с магнитного зонда базовой модели «K» по времени, что соответствует меньшей скорости токового слоя и, следовательно, меньшей скорости плазменного сгустка

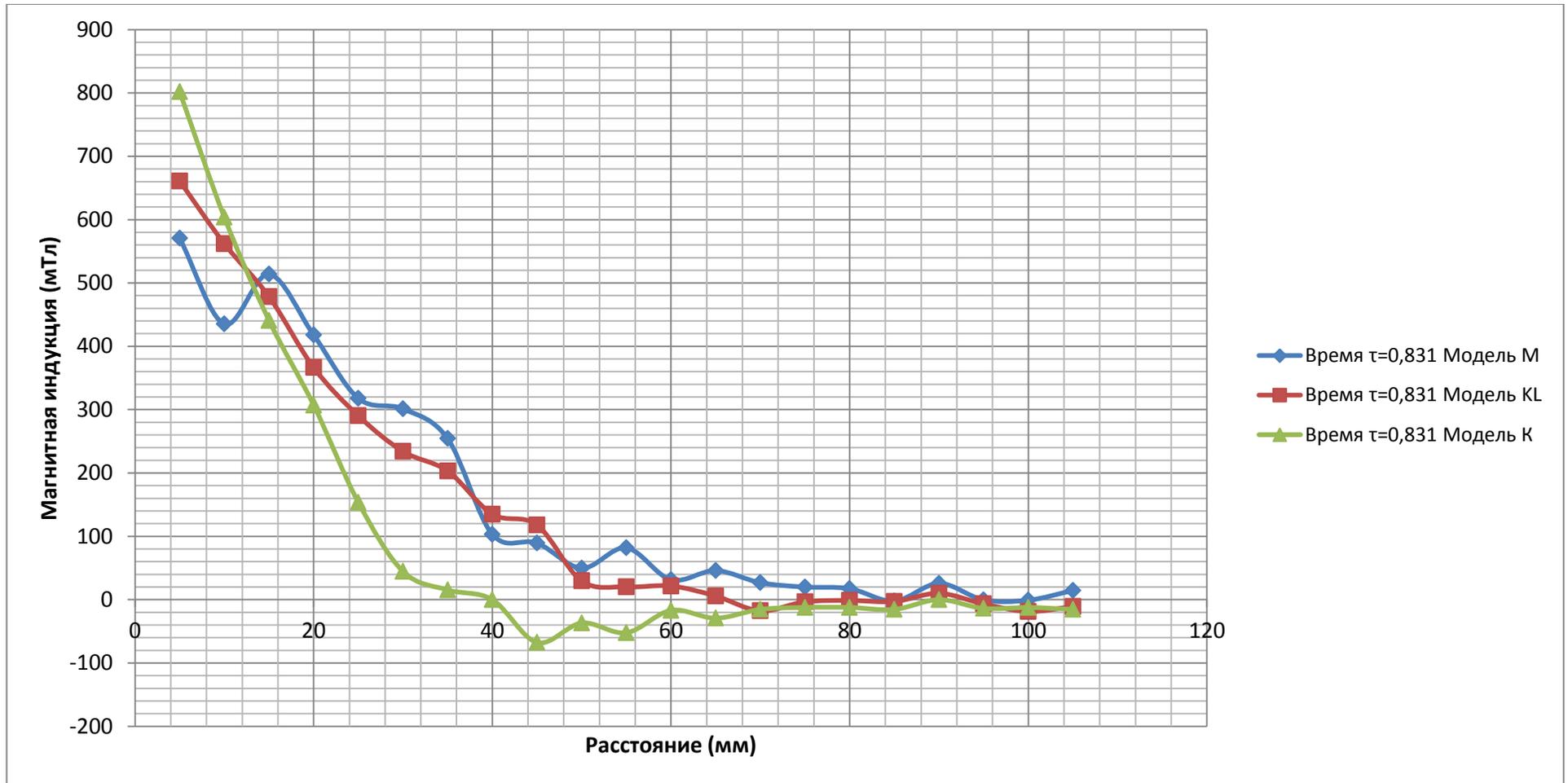


Рисунок 103 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 0,831 для моделей «М», «KL» и «К». Величины магнитных полей моделей «М» и «KL» с разным типом ошиновки, но с одинаковой начальной индуктивностью, выравниваются. Точка переплюсовки сигнала с магнитного зонда базовой модели «К» по-прежнему заметно отстает от сигнала с модернизированных моделей «М» и «KL» по времени

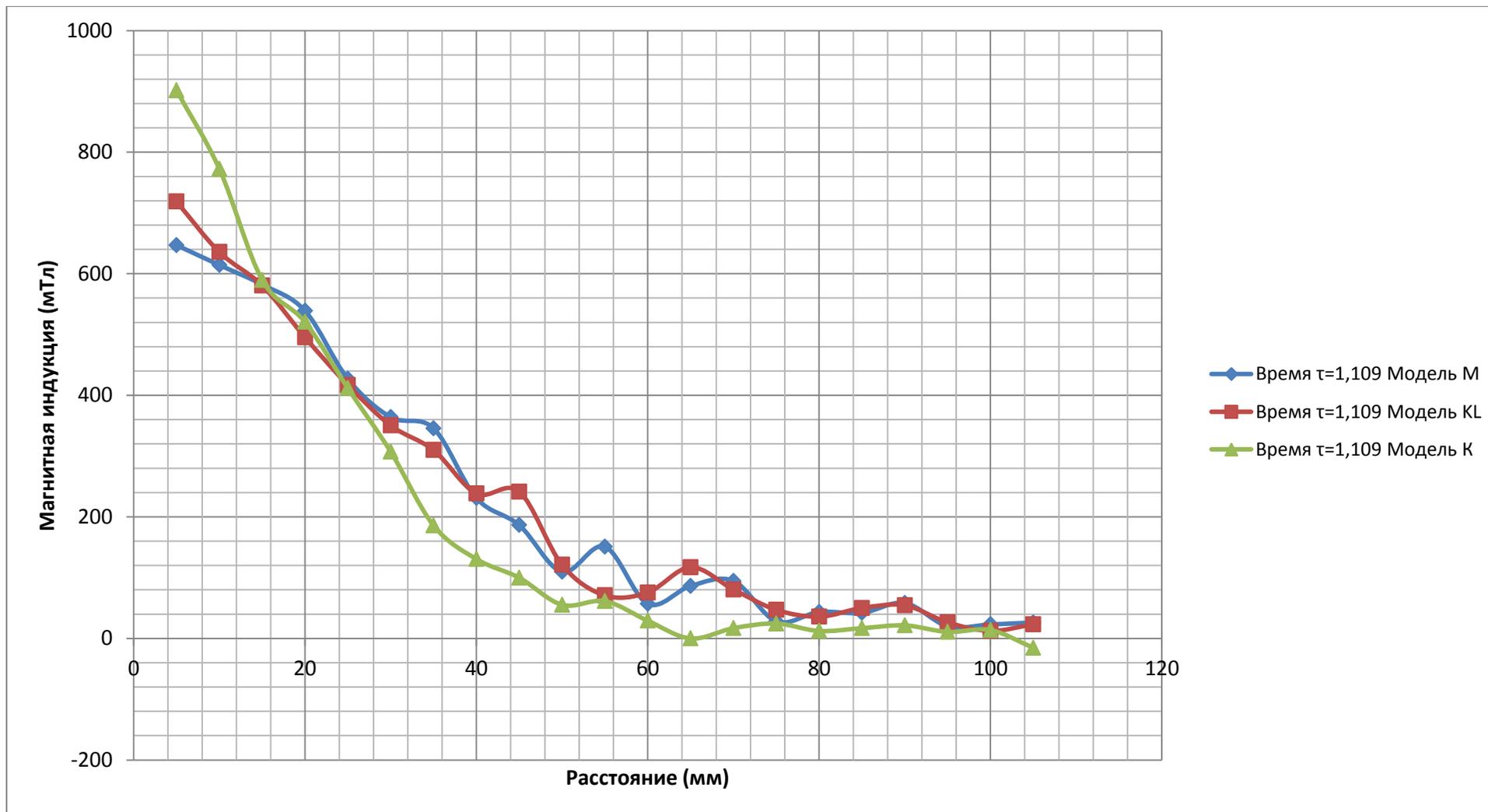


Рисунок 104 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 1,109 для моделей «М», «KL» и «K». Токовый слой базовой модели «K» постепенно «догоняет» токовые слои моделей «М» и «KL»

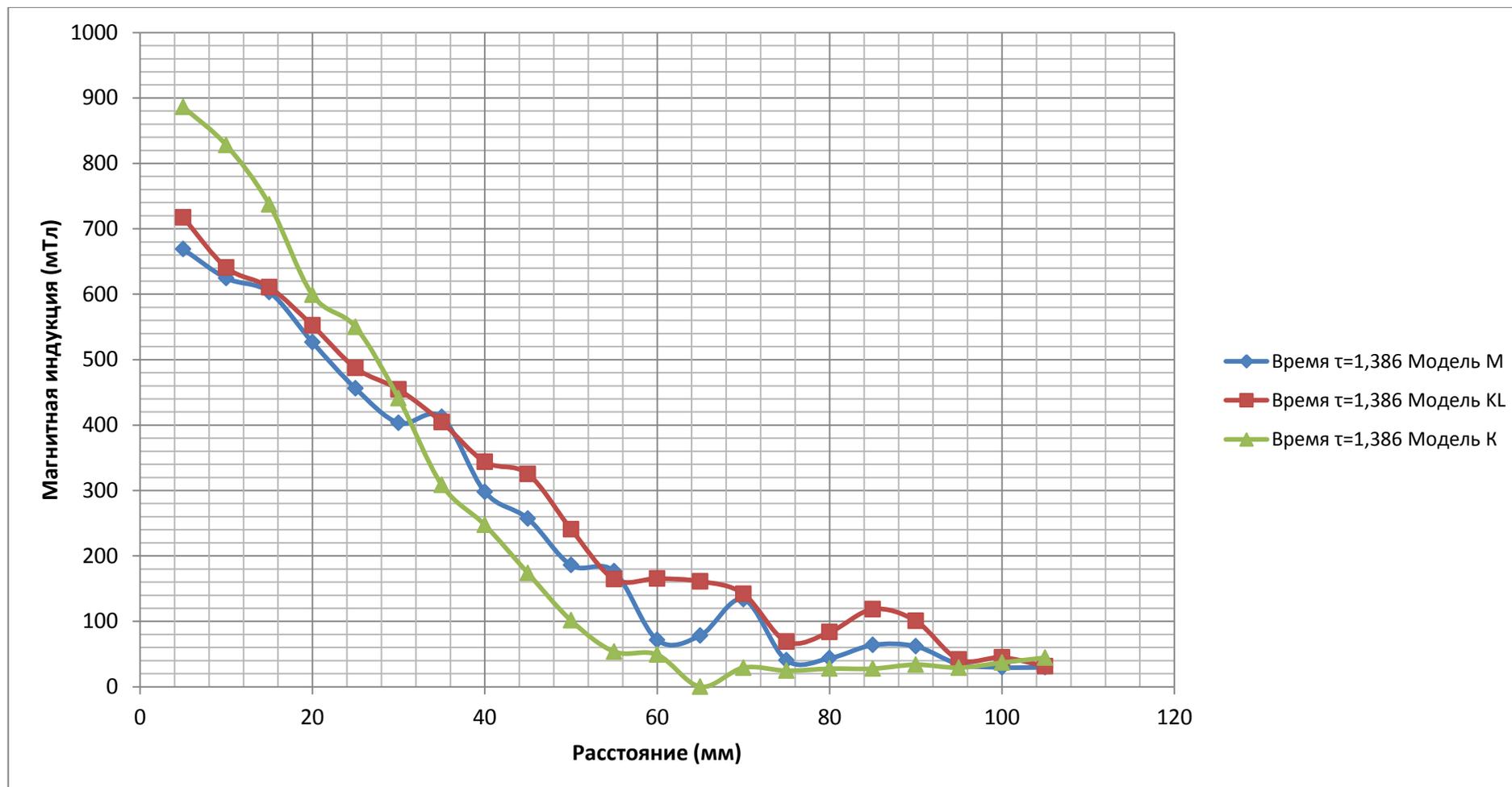


Рисунок 105 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 1,386 для моделей «М», «KL» и «K». Точки переполюсовки сигнала с магнитного зонда и, соответственно, величина смещения токового слоя всех трех моделей выровнялись. Появилось заметное превышение магнитного поля у базовой модели «K», что объясняется бóльшим значением амплитуды разрядного тока

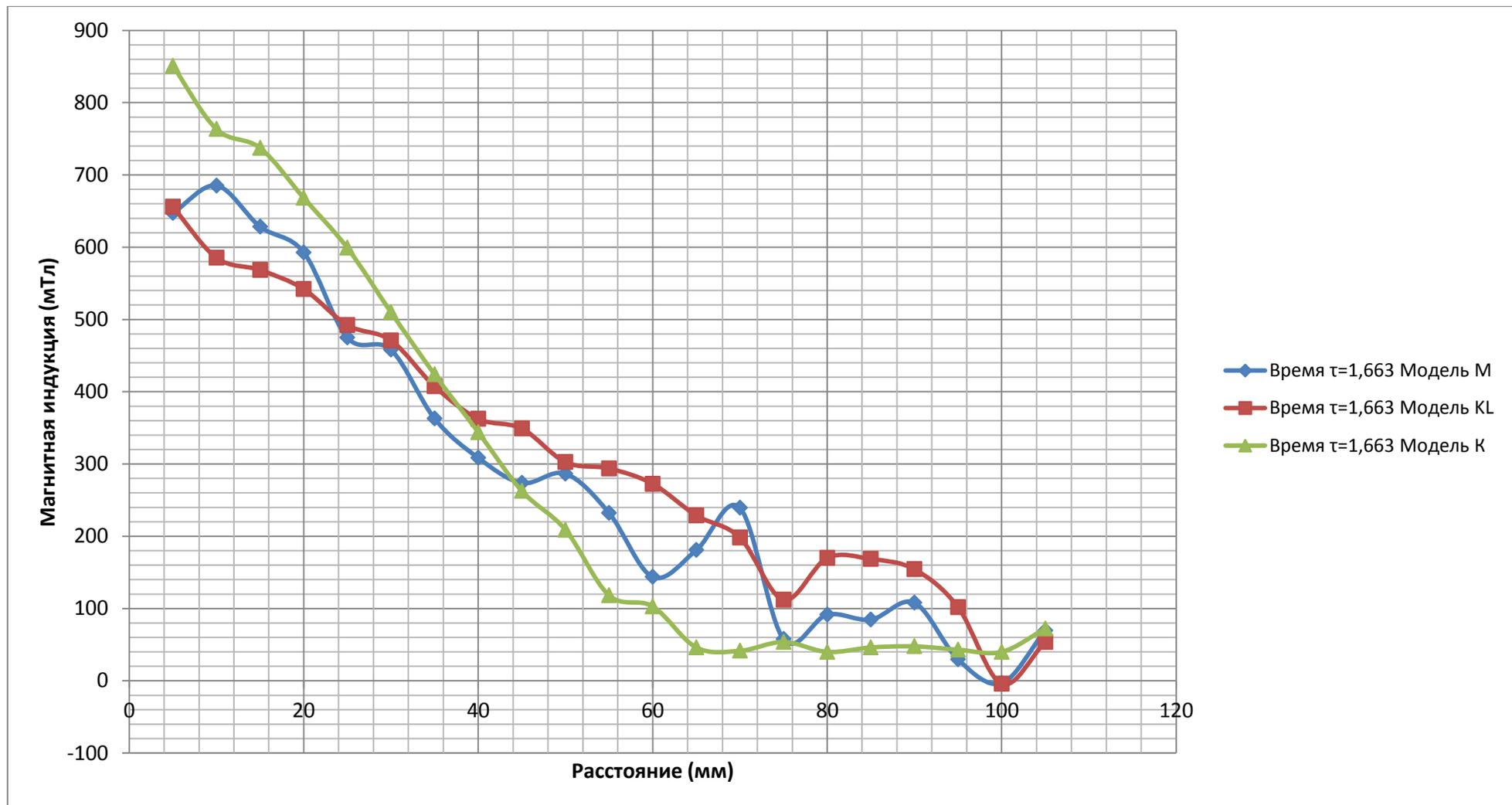


Рисунок 106 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 1,663 для моделей «М», «KL» и «K». Безразмерное время приблизительно соответствует максимуму разрядного тока у всех трех моделей. В этот момент наблюдается превышение магнитного поля у базовой модели «K»

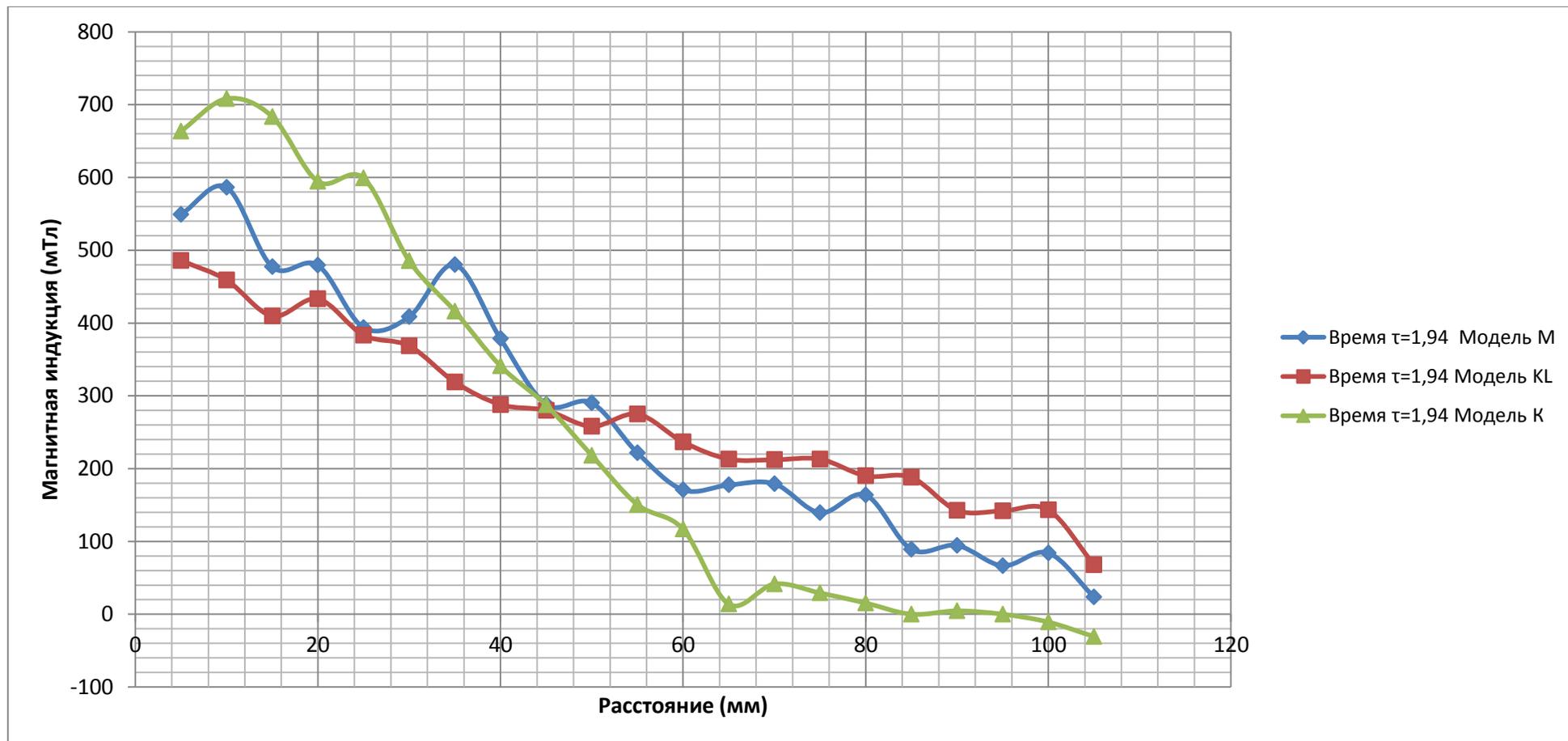


Рисунок 107 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 1,94 для моделей «М», «KL» и «K». Безразмерное время соответствует началу нисходящего участка осциллограмм разрядного тока. Опять наблюдается заметное отставание точки переполюсовки сигнала с магнитного зонда базовой модели «K». У базовой модели токовый слой занимает по длине примерно 60 мм разрядного канала, в то время как у модернизированных моделей «KL» и «M» – около 100 мм

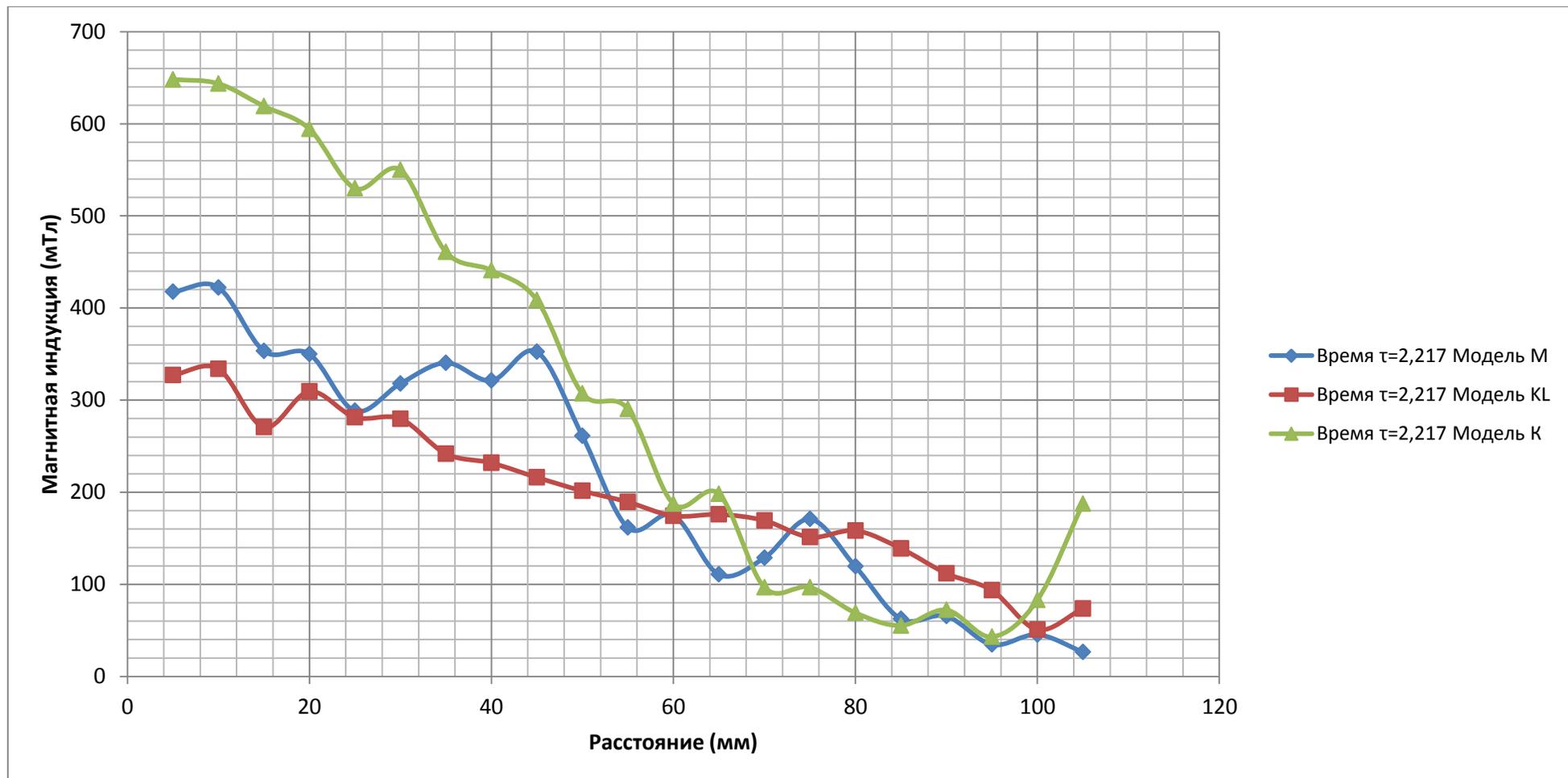


Рисунок 108 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 2,217 для моделей «М», «KL» и «K». На нисходящей ветви осциллограмм разрядного тока величины магнитных полей снижаются. Наблюдается существенное превышение величины магнитного поля базовой модели «K», объясняющееся формированием тóкового вихря бóльшей интенсивности

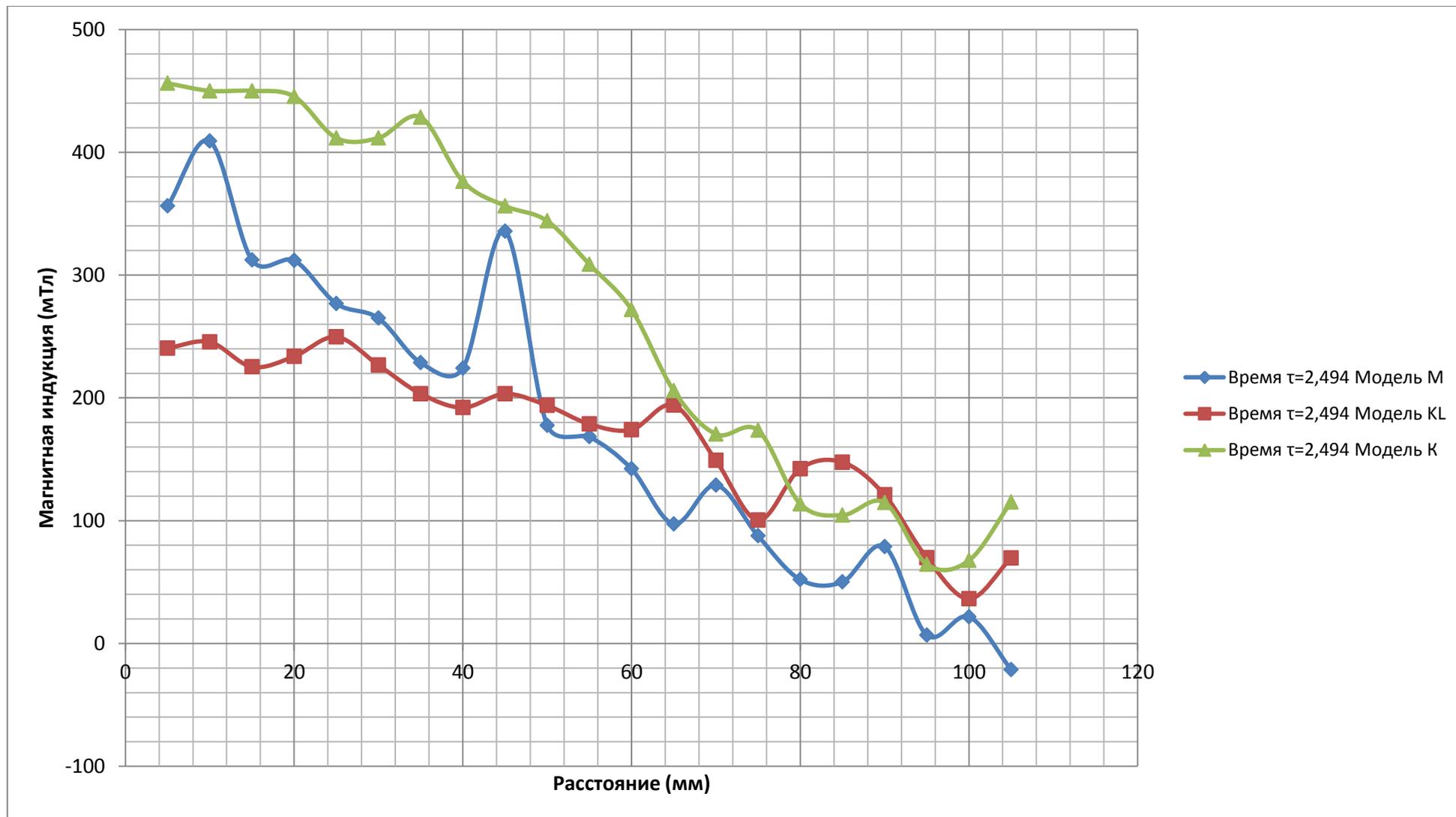


Рисунок 109 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 2,494 для моделей «М», «KL» и «К»

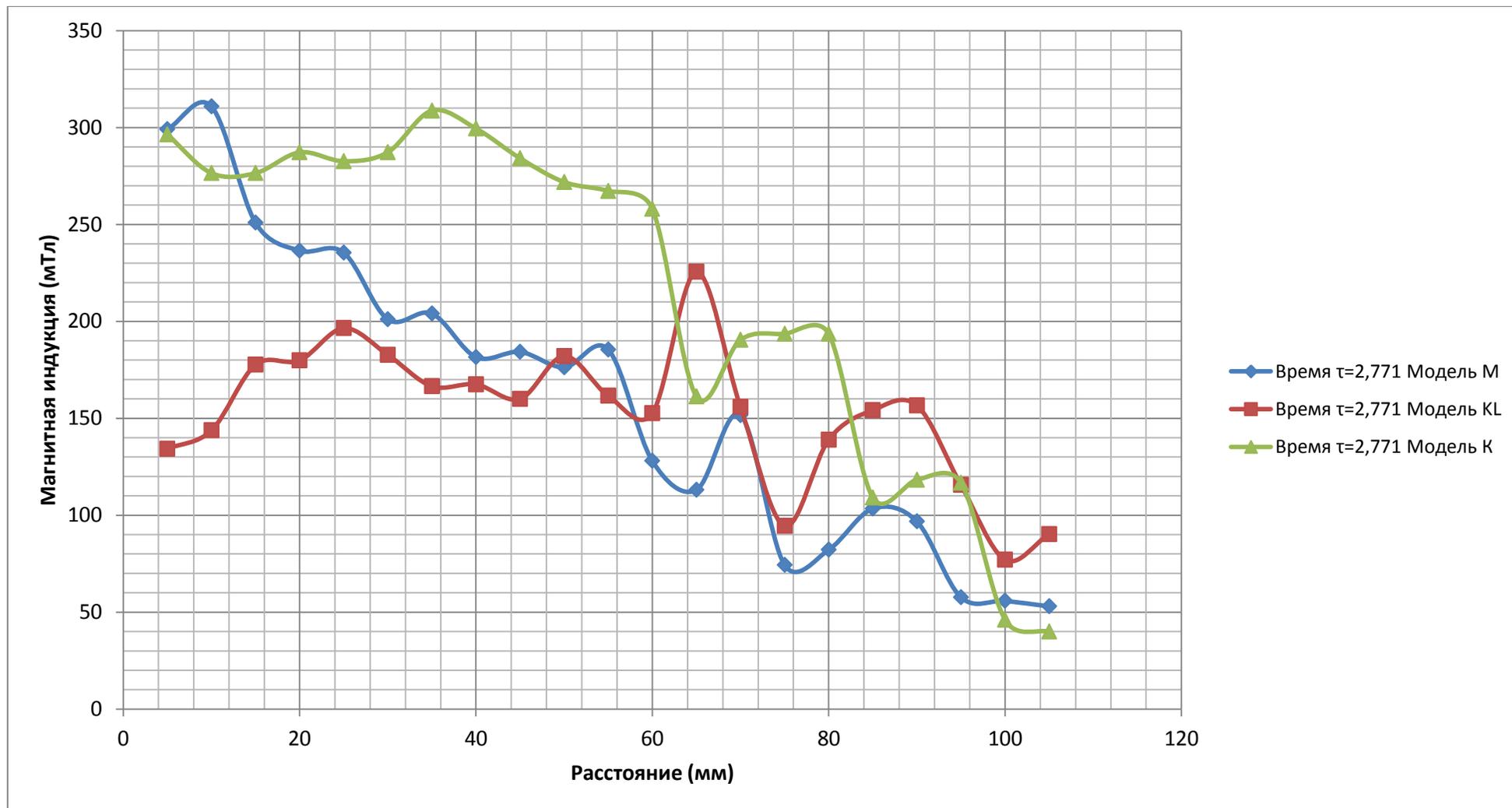


Рисунок 110 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 2,771 для моделей «М», «KL» и «K». Общий характер кривых распределения магнитного поля на нисходящей ветви осциллограмм разрядного тока (рисунки 106-108) сохраняются

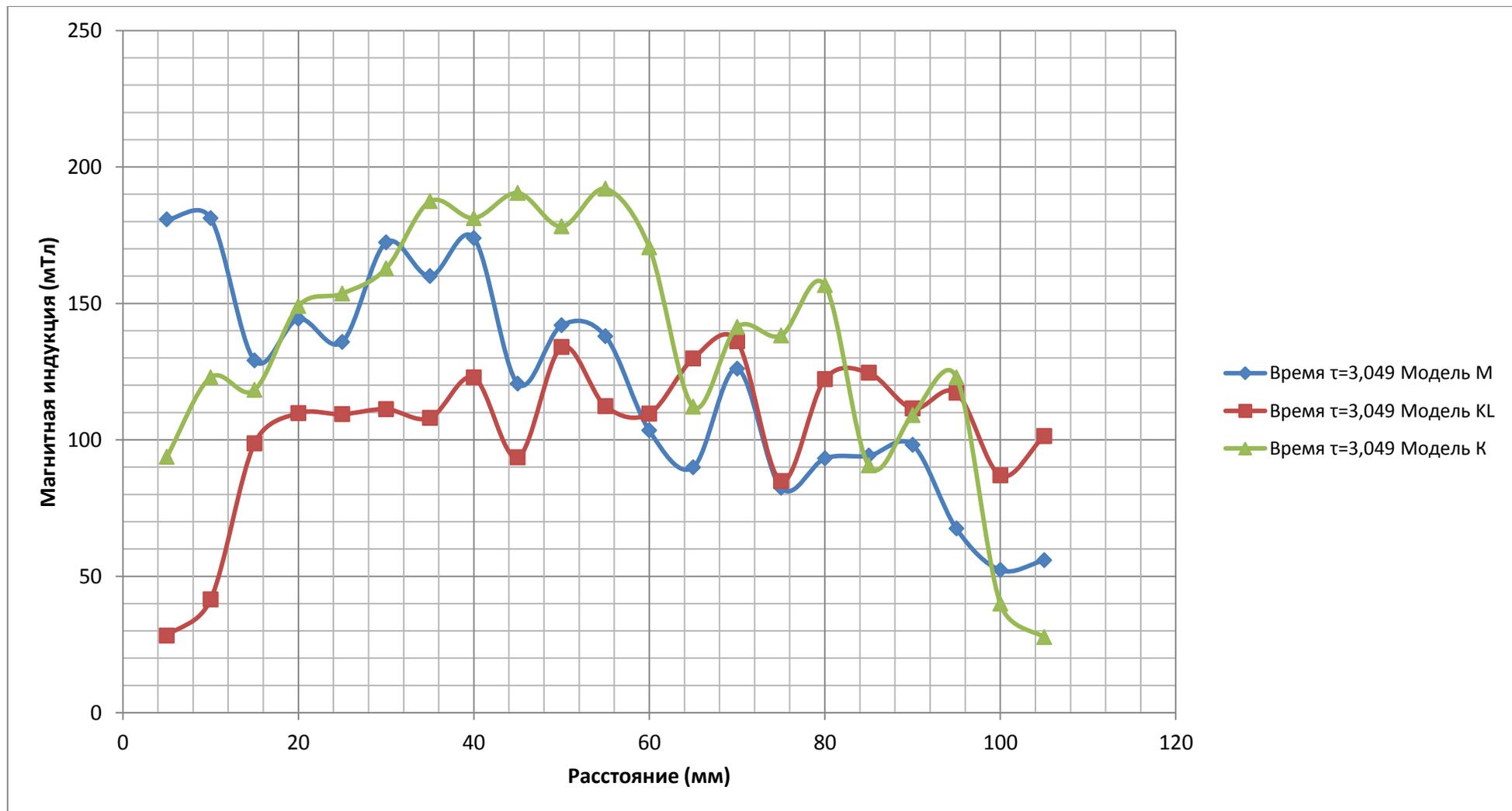


Рисунок 111 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 3,049 для моделей «М», «KL» и «K». Временная точка, приближающаяся к нулю разрядного тока. Величины магнитных полей не равны нулю из-за развившегося в разрядном канале токового вихря

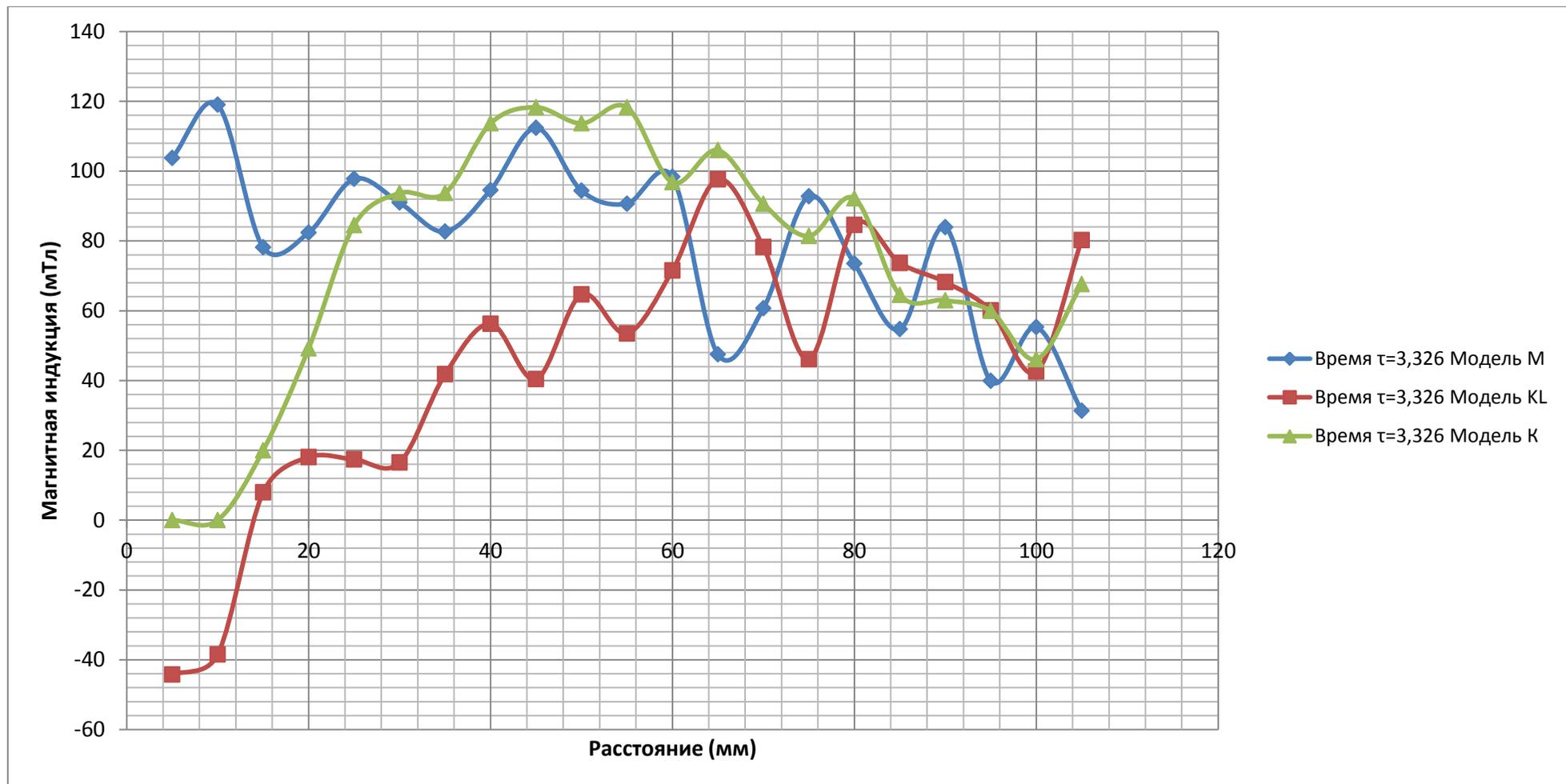


Рисунок 112 – Диаграмма изменения величины магнитной индукции по длине канала при безразмерном времени 3,326 для моделей «М», «KL» и «K». Временная точка приблизительно соответствует нулю разрядного тока (конец первого полупериода осциллограммы). В начале разрядного канала можно наблюдать начало развития вторичного токового слоя, соответствующего второму (отрицательному) полупериоду осциллограммы

Анализируя графики на рисунках 100...112, надо отметить, что наиболее эффективное воздействие на поток плазмы наблюдается в непосредственной близости к торцевому изолятору. Аблирующий сгусток плазмы находится у торцевого изолятора в течение первых 2 мкс, что соответствует 1-й половине первого полупериода. Согласно рисунку 99, при переходе к безразмерному времени, это промежуток времени от 0 до 1,4 единицы времени (безразмерного). Согласно графикам 100...105, в этот промежуток времени в разрядном канале модели с двойным обратным токоподводом наблюдаются бóльшие значения индукции магнитного поля по сравнению с базовой моделью и моделью с искусственно увеличенной индуктивностью.

Результаты магнитозондовых измерений во втором полупериоде разрядного тока в данной работе не приводятся, так как различия магнитных полей всех трех исследованных моделей не существенны, а различия носят случайный и нерегулярный характер.

Выполненная оценка случайной погрешности магнитозондовых измерений показала, что ее величина во всех случаях измерений в плазме разряда не превышала 10%, а при измерениях на воздухе – 2%. Для примера на рисунке 113 приведен один из графиков функции  $B(x)$  с отображением пределов изменения случайной погрешности.

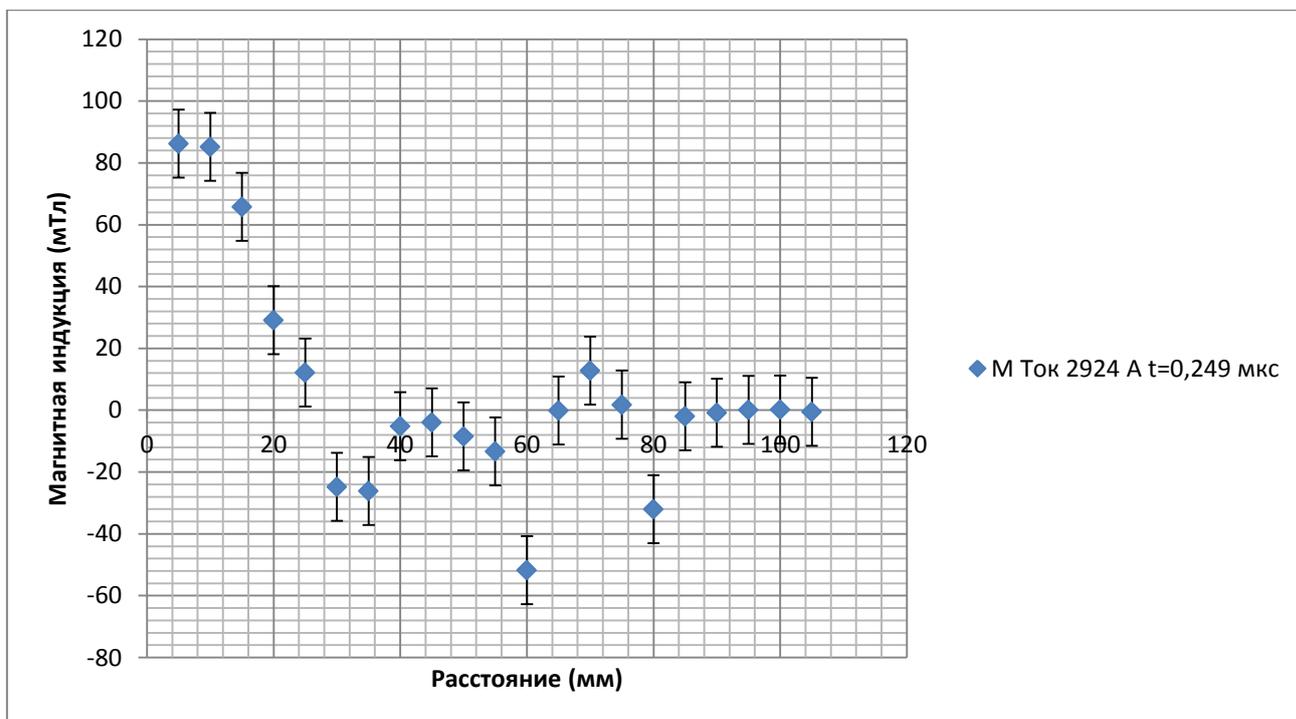


Рисунок 113 – График зависимости величины магнитной индукции от расстояния с отображением диапазона случайной погрешности измерений

Таким образом, результаты магнитозондовых измерений подтверждают факт увеличения собственного магнитного поля в разрядном канале АИПД при использовании в его конструкции двойного обратного токоподвода, который был установлен при расчетном анализе процессов происходящих в двигателе. Данный прирост составляет в среднем 20%. Этот результат делает более обоснованным предположение об увеличении удельного импульса тяги за счет повышения электромагнитной составляющей тяги в АИПД с двойным обратным токоподводом.

#### 4.5 Схемы двухступенчатых АИПД

Наличие самосогласованного разряда в АИПД базовой схемы не позволяет независимо регулировать расход рабочего тела и эффективно осуществлять ускорение сгустка плазмы. Применение двухступенчатой схемы дает возможности по оптимизации ввода энергии и массы в ускорительный канал, варьируя параметры каждой из ступеней. В результате,

как показали предыдущие исследования, удастся повысить величину удельного импульса тяги, что в принципе позволяет значительно снизить массу запасаемого рабочего тела и, соответственно, ЭРДУ.

Двухступенчатые ИПД представлены в настоящее время с двумя видами разрядных каналов: коаксиальным и рельсотронным. Обе схемы имеют свои преимущества и недостатки.

Коаксиальная модель отличается хорошо выраженной осевой симметрией разряда, высокой надёжностью и отказоустойчивостью. Простейшая принципиальная схема двухступенчатого АИПД коаксиальной схемы представлена на рисунке 114 [37]. Он имеет две батареи, для каждой ступени соответственно, внутренний электрод (катод), являющийся общим для обеих ступеней и два внешних электрода (анод 1-й и 2-й ступени). Недостатком коаксиальной схемы, как отмечалось ранее, является торцевая система подачи РТ, которая не позволяет обеспечить большие значения суммарного импульса тяги при приемлемых габаритах двигателя.

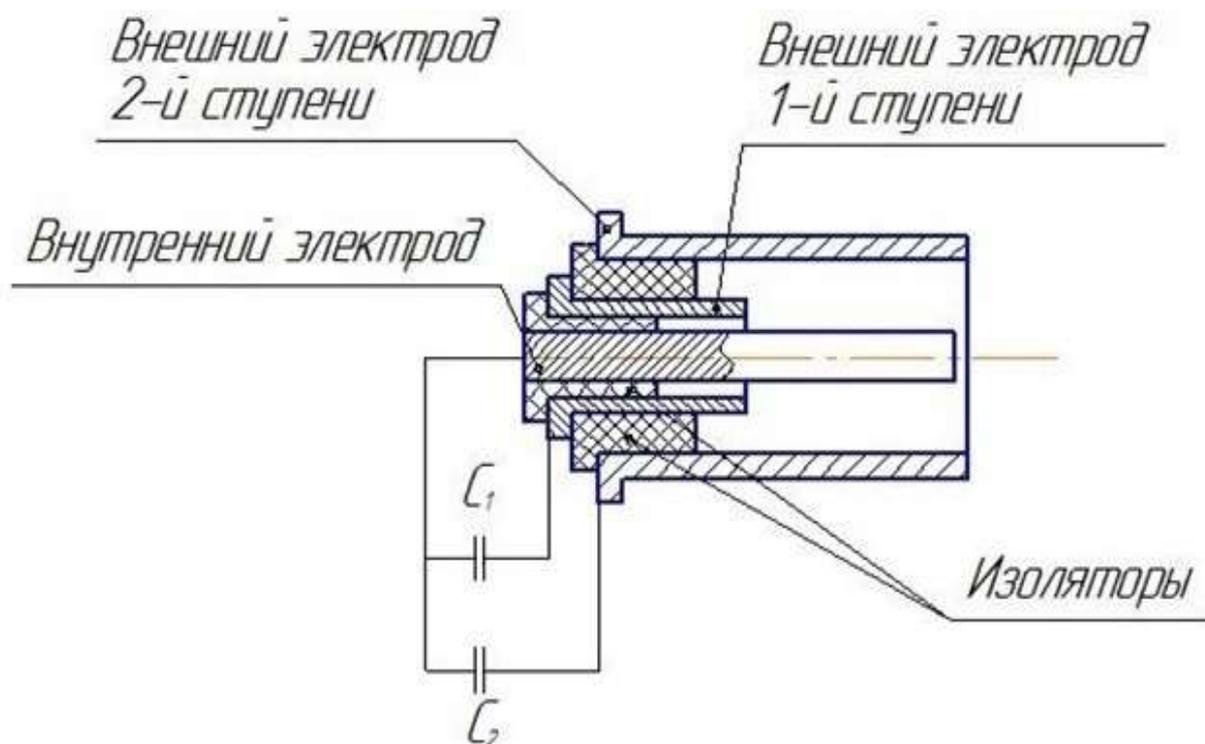


Рисунок 114 – Принципиальная схема двухступенчатого коаксиального АИПД [34]

Работы по исследованию АИПД продолжаются в России и ряде других стран. Так в 2007 году в Саутгемптонском университете в Англии проводились исследования многоступенчатых схем ускорения плазмы, которые предполагают разделение функций разряда по дозированию и ускорению сгустка плазмы [14].

Внешний вид и схема разрядного канала двухступенчатого АИПД с торцевой системой подачи рабочего тела и разрядным каналом рельсотронного типа представлены на рисунках 115 и 116.

Вторая модель двухступенчатого АИПД с торцевой системой подачи и коаксиальным разрядным каналом, исследовавшаяся в Саутгемптонском университете, представлена на рисунке 117.

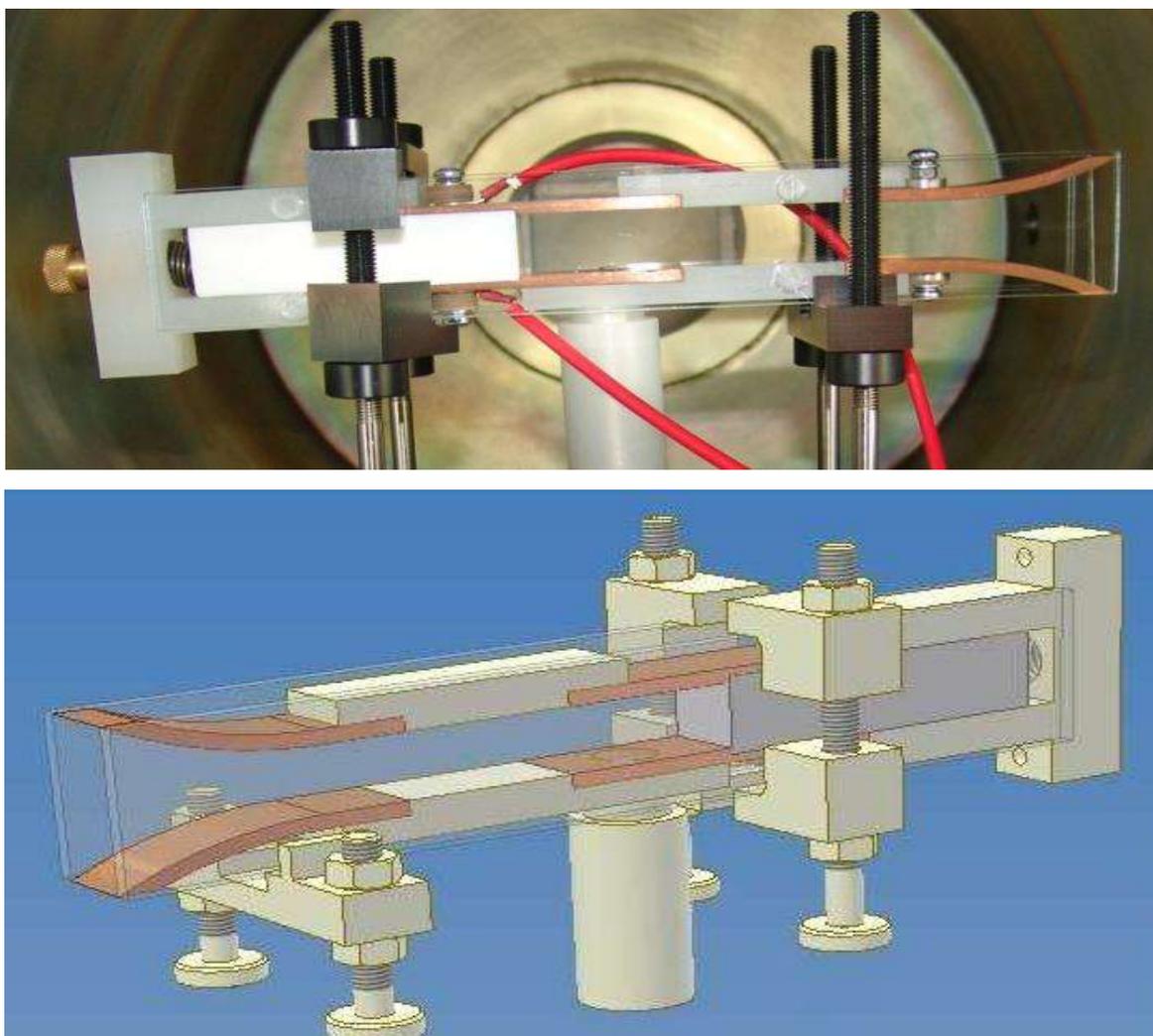


Рисунок 115 – АИПД с рельсотронным РК и двухступенчатой системой ускорения плазмы [14]

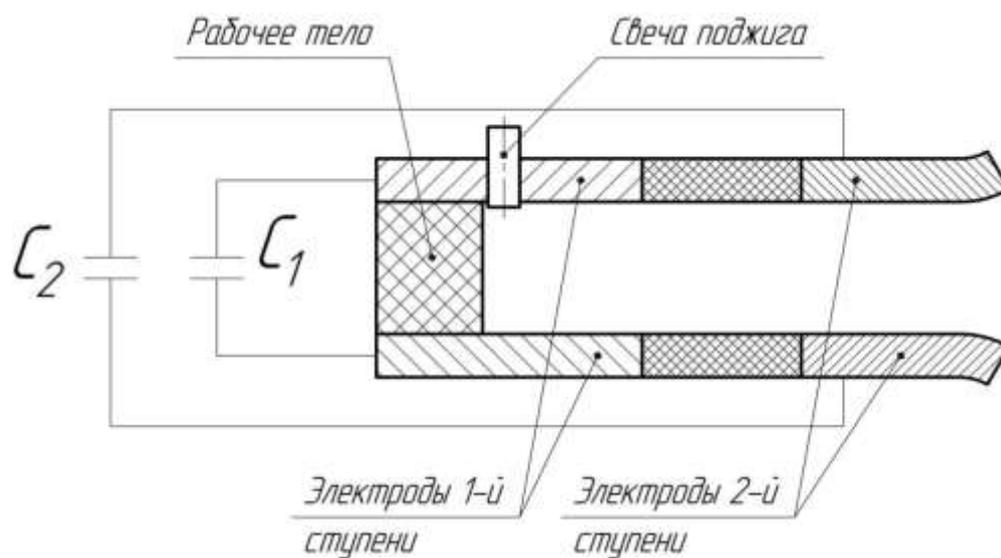


Рисунок 116 – Схема двухступенчатого АИПД с рельсотронной системой ускорения [14]

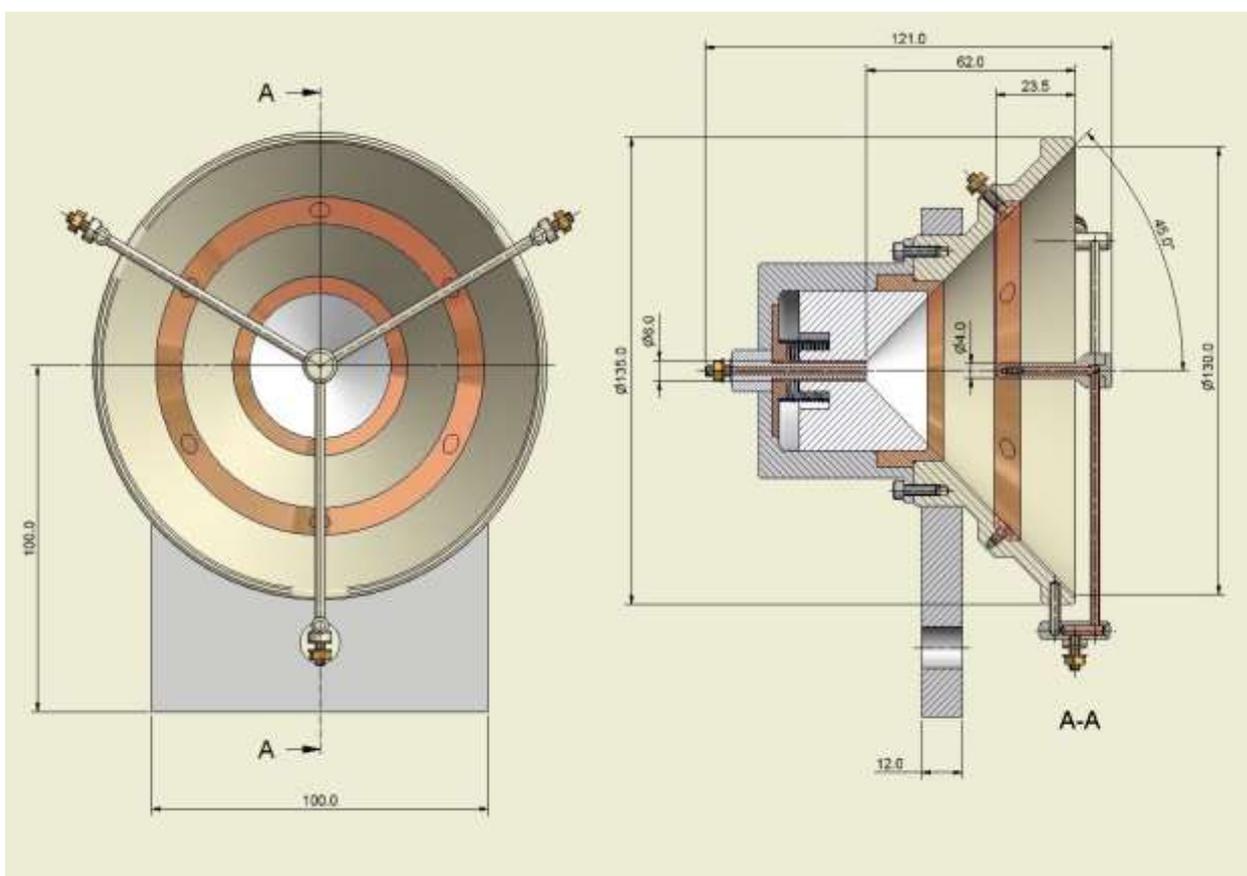


Рисунок 117 – Двухступенчатый АИПД коаксиальной схемы [14]

Данные, представленные в публикациях, показывают, что работы с вышеупомянутыми двухступенчатыми моделями проводились с целью максимального разнесения по времени срабатывания первой и второй

ступени. Тягово-энергетические характеристики моделей в печати не публиковались.

В НИИ ПМЭ МАИ автором настоящей работы была разработана и испытана новая схема двухступенчатого АИПД рельсотронного типа, показанная на рисунке 118.

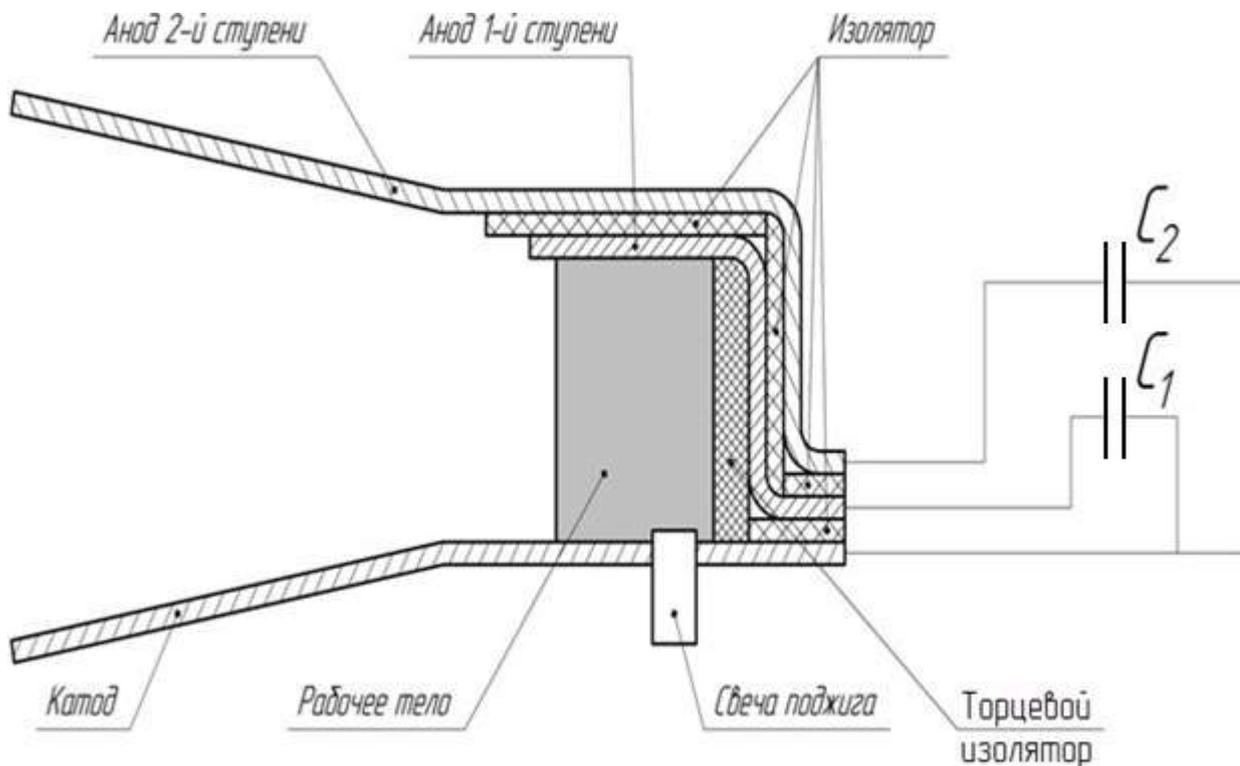


Рисунок 118 – Схема двухступенчатого АИПД,  
разработанная в НИИ ПМЭ МАИ [34]

В отличие от известной схемы, приведенной на рисунке 116, здесь катод является общим для первой и второй ступеней. Компактность ускорительного канала и использование боковой системы подачи рабочего тела, делают ее более перспективной к применению при создании двигателей нового поколения с высоким удельным импульсом тяги и повышенным суммарным импульсом тяги. На данную схему был получен патент [38].

#### 4.6 Базовый вариант лабораторного образца двухступенчатого АИПД.

Для проведения экспериментального исследования модели двухступенчатого АИПД был выбран базовый вариант конструкции.

Внешний вид базового варианта лабораторного образца двухступенчатого АИПД, соответствующего по принципиальной схеме рисунку 118, представлен на рисунке 119.



Рисунок 119 – Лабораторная модель АИПД с двухступенчатой системой ускорения

Полярность электродов, а собственно и название катод и анод, является актуальным только в течение интервала времени соответствующего протеканию тока первого полупериода, после чего полярность меняется.

Схема разрядного канала базовой модели двухступенчатого АИПД показана на рисунке 120. Модель включает две конденсаторные батареи, систему токоподводов, катод и два анода. Двигатель имеет два разрядных канала рельсового типа, один – дозирующий 1, второй – ускоряющий 2. Верхняя и нижняя стенки каналов образованы катодом 3, общим для двух ступеней, и двумя анодами 4 (один из которых соединен с батареей первой ступени  $C_1$ , другой – с батареей второй ступени  $C_2$ ) 5, а боковые стенки – шашками из твердого диэлектрика 6, являющегося рабочим веществом. Торцевой керамический изолятор 7 разделяет общий катод 2 и анод первой ступени 3. Керамический изолятор 8 разделяет аноды первой и второй ступеней. В торцевом керамическом изоляторе 7 со стороны поверхности, обращенной в ускорительный канал 1, выполнено углубление – форкамера, глубина которого не менее 3 мм. Свеча (игнайтер) 8, предназначенная для поджига разряда, размещена в отверстии общего катода, обращенном к торцевому изолятору.

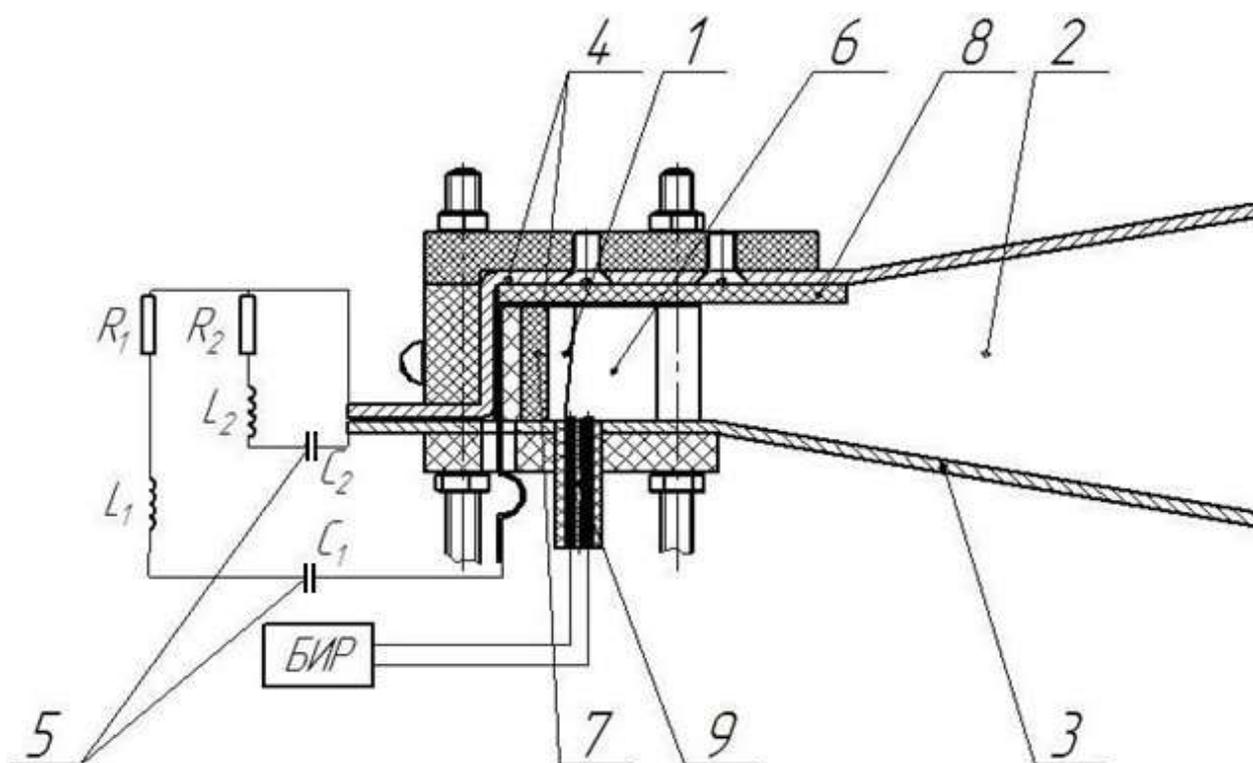


Рисунок 120 – Схема двухступенчатого АИПД базовой конструкции.

Работа с данной моделью проводилась с целью максимального согласования ввода энергии и массы в разрядные каналы, а как следствие, повышения среднемассовой скорости истечения плазменного сгустка, при неизменных расходах рабочего тела за импульс и энергии батареи. Основные изменения модели велись с целью согласования по времени срабатывания между первой и второй ступенью. Такая работа была направлена, прежде всего, на предотвращение преждевременного срабатывания второй ступени.

Данная модель должна иметь более высокие тягово-энергетические характеристики, нежели базовая модели с той же ёмкостью батареи и геометрией РК. Подобное направление опирается, прежде всего, на возможность двухступенчатой системы разделять функцию плазмообразования и ускорения, что является необходимым для получения более высоких скоростей истечения.

#### **4.7 Результаты экспериментов с двухступенчатыми моделями АИПД**

Экспериментальные исследования двухступенчатого АИПД новой схемы (рисунок 118) проводились на стенде ИУ-1 НИИ ПМЭ МАИ. Внешний вид модели представлен на рисунке 119 [39-47].

На первом этапе исследований изучались различные режимы работы ступеней при их отдельном и совместном функционировании. Было установлено, что одним из недостатков, проявляющихся при совместной работе, является фактор преждевременного срабатывания второй ступени. На рисунке 121 приведены осциллограммы разрядных токов двигателя при совместной работе ступеней.

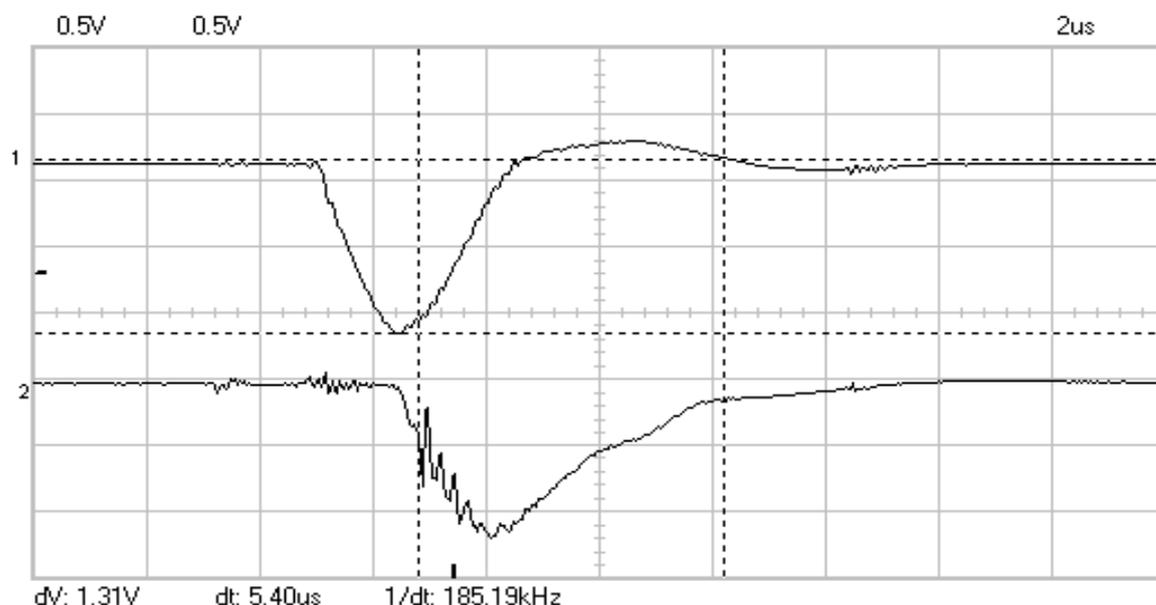


Рисунок 121– Осциллограммы разрядного тока 1-й (верхняя осциллограмма) и 2-й (нижняя осциллограмма) ступеней двухступенчатого АИПД

Видно, что срабатывание второй ступени начинается уже в середине первого полупериода работы первой ступени. При этом основная батарея  $C_2$  разряжается не в основном сгустке плазмы. Ускоряющее воздействие проявляется только в части плазмоида. Такой характер работы АИПД приводит к значительному снижению среднемассовой скорости истечения.

Для устранения данного недостатка было предложено существенно увеличить расстояние между анодами обеих ступеней с целью увеличения паузы между их запуском. Из осциллограмм, приведенных на рисунке 122, видно, что в этом случае запуск второй ступени происходил на втором полупериоде разряда первой ступени. Это способствует лучшему согласованию ввода энергии и массы в разряд.

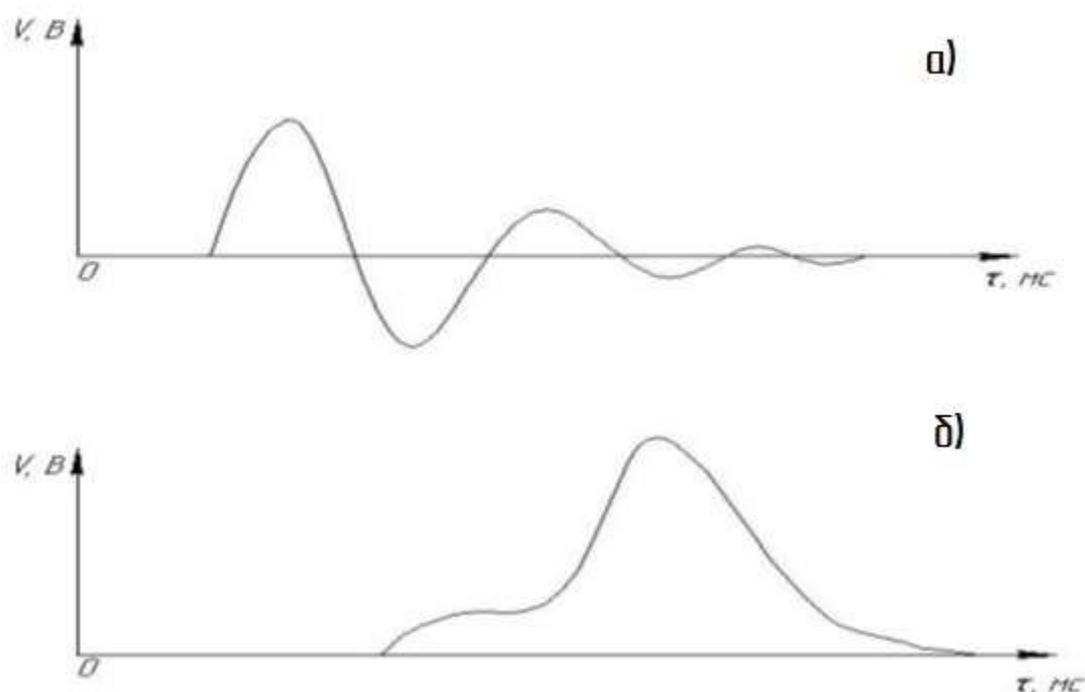


Рисунок 122 – Осциллограмма разрядного тока 1-й (а) и 2-й (б) ступени двухступенчатого АИПД после изменения РК

Характеристики, полученные в результате испытаний лабораторных образцов двухступенчатого АИПД новой схемы, представлены в таблице 12. Варианты модели различаются между собой величиной ёмкости батарей. Конструкция и геометрия РК в данном эксперименте не изменялась.

Таблица 12 – Характеристики лабораторных образцов двухступенчатых АИПД

Образец АИПД	Энергия разряда I ступени W, Дж	Энергия разряда II ступени W, Дж	Суммарная энергия разряда W, Дж	Удельный импульс тяги $J_{sp}$ , м/с	Цена тяги $C_T$ , Вт/мН
1	20	42,7	62,7	7100	209
2	10	42,7	52,7	13300	188
3	8	42,7	50,7	22000	137

Из приведенных в таблице 12 данных следует, что применение двухступенчатой схемы ускорения плазмы позволяет увеличить удельный импульс тяги приблизительно вдвое по сравнению с одноступенчатыми АИПД с той же энергией разряда.

В процессе проводившихся испытаний был отмечен факт появления науглероживания шашек рабочего тела при снижении энергии первой батареи ниже некоторого минимума. Это свидетельствует о необходимости уменьшения рабочей площади шашки при снижении энергии первой ступени.

Для более эффективного временного согласования работы первой и второй ступеней двухступенчатого двигателя необходимо стремиться к задержке выхода плазмы из разрядного канала первой ступени. Это можно реализовать в схеме АИПД с так называемой «обратной первой ступенью» изображенной на рисунках 123 и 124.

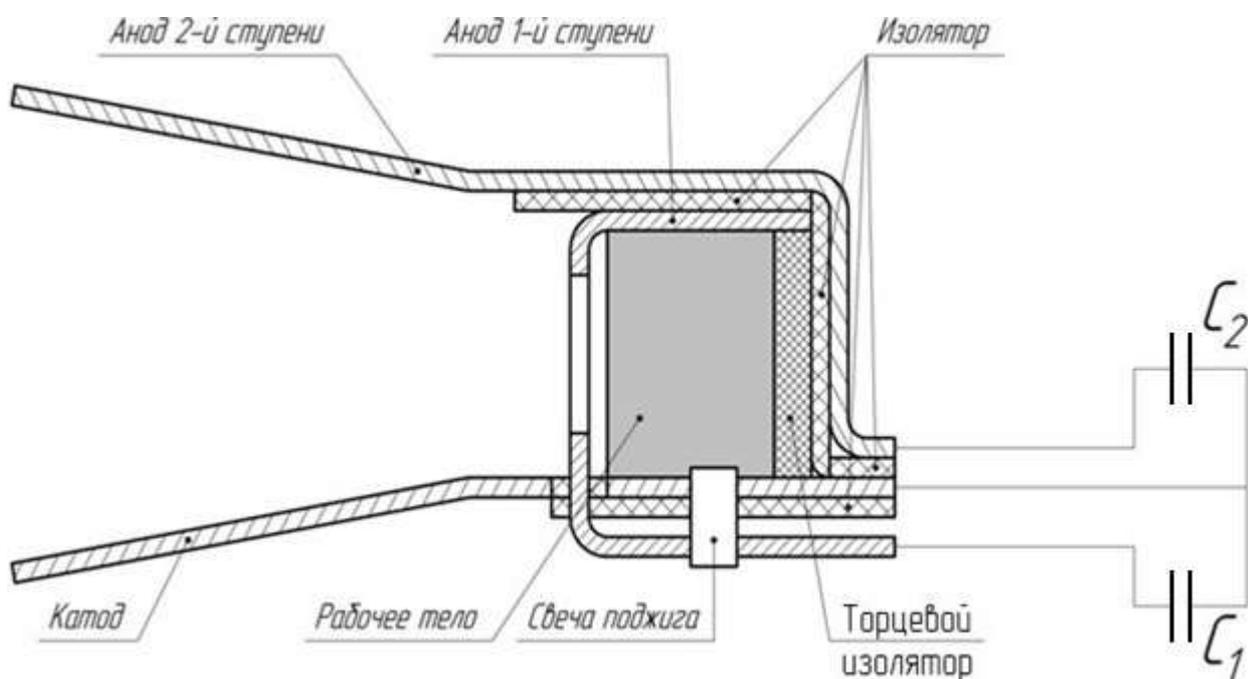


Рисунок 123 – Принципиальная схема РК с обратным электродом.

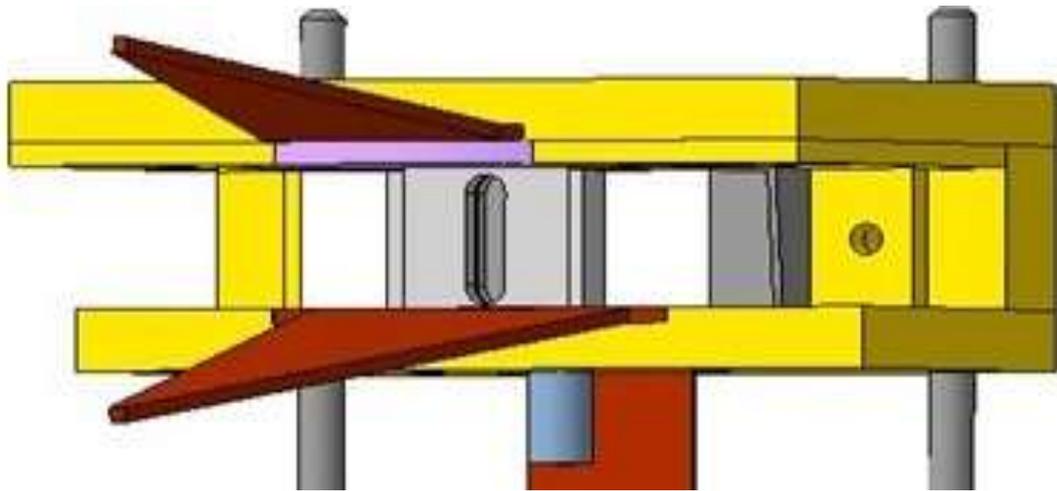


Рисунок 124 – Внешний вид РК с обратным электродом.

Здесь электроды первой ступени расположены таким образом, что электромагнитная сила в ее разрядном канале сдерживает плазменный поток до его полного образования, а затем направляет на вторую ступень, создающую основную тягу двигателя.

В целом, полученные результаты испытаний двухступенчатой модели АИПД и их сравнение с данными испытаний одноступенчатых двигателей с той же энергией разряда показывают, что применение двухступенчатой схемы позволяет, в перспективе, увеличить удельный импульс тяги приблизительно вдвое по сравнению с одноступенчатыми образцами. Вместе с тем, сложность процессов взаимодействия двух ступеней ускорения требует дальнейшего экспериментального и расчетно-теоретического исследования их совместных рабочих процессов. Внедрение полученных результатов в прототипы летных образцов двухступенчатых АИПД возможно только после длительной экспериментальной отработки их лабораторных образцов.

В результате будет увеличиваться значение скорости истечения РТ из двигателя и тяга, тяговый КПД. Кроме этого в дальнейшем надо рассмотреть возможность увеличения магнитного поля в разрядной камере второй ступени рабочего тела и ряда других. Это позволит понять проблемы

согласования. Эффективность всех указанных направлений по увеличению удельного импульса тяги должны быть поддержано экспериментальными исследованиями по локально-временным распределениям в разрядном канале магнитных полей, плотности электрического тока, концентраций ионов и нейтральных компонентов объёмных электромагнитных сил и концентрации электронов (соответственно и ионов) плазмы и локально-временного согласования полей плотности заряженных компонентов плазмы с объёмными электромагнитными силами.

## Заключение.

По результатам проведённых теоретически-расчётных, а также экспериментальных работ был произведён анализ полученных результатов всех исследованных вариантов лабораторных моделей.

Опираясь на приведённые графики, можно однозначно утверждать, что разработанные схемы АИПД типа «М» имеют преимущество по удельным характеристикам по сравнению с базовой моделью.

В целом, по данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Проведён анализ структуры массы АИПД. Показано, что преимущественное влияние на улучшение его массогабаритных характеристик оказывает повышение удельной энергоёмкости конденсаторов и повышение удельного импульса тяги.

2. Выполнено экспериментальное исследование моделей АИПД рельсовой геометрии с различными схемами ускорительного канала и параметрами электрической цепи. Установлено, что схема двигателя с асимметричным разрядом и схема АИПД с двойным обратным токоподводом в определенном диапазоне энергий позволяют в каждом случае повысить удельный импульс тяги до 15 %. На конструкцию АИПД с двойным обратным токоподводом получен патент.

3. Проведён расчётный анализ влияния конфигурации разрядной цепи на процесс ускорения в АИПД. Полученные теоретические результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.

4. Проведены магнитозондовые исследования моделей АИПД, который показал, что на моделях с двойным обратным токоподводом, прирост величины магнитного поля составляет в среднем около 20 %. Этот результат делает более обоснованным предположение об увеличении удельного импульса тяги за счет повышения электромагнитной составляющей тяги в АИПД с двойным обратным токоподводом.

5. Разработана и исследована модель с двухступенчатой схемой ускорения. Показано что удельный импульс тяги лабораторной модели может быть увеличен в 2 раза по сравнению с базовой моделью. На конструкцию двухступенчатого АИПД получен патент.

6. Проведённые исследования свидетельствуют о возможности разработать лётные варианты АИПД на новом уровне. Конкретный двигатель может быть создан при определённых требованиях ТЗ на АИПД для конкретных КА.

### Список сокращений и условных обозначений

АИПД – абляционный импульсный плазменный двигатель

БИР – блок инициирования разряда

БНЭ – блок накопитель энергии

БПУ – блок питания и управления

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВСК – высокоскоростная камера

ГСО – геостационарная орбита

ДУ – двигательная установка

ИД – ионный двигатель

ИПД – импульсный плазменный двигатель

КА – космический аппарат

КДУ – космическая двигательная установка

КЛА – космический летательный аппарат

КПД – коэффициент полезного действия

МКА – малый космический аппарат

РК – разрядный канал

РН – ракетоноситель

РТ – рабочее тело

СПД – стационарный плазменный двигатель

СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела

ТТРД – твердотопливный ракетный двигатель

ЭРД – электроракетный двигатель

ЭРДУ – электроракетная двигательная установка

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

### Список использованных источников

1. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Жустрина О.С., Ильина И.Ю. История создания малых космических аппаратов «Канопус-В» №1 и белорусского КА. ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» 2012. - С. 2-7.
2. Петрукович А.А., Никифоров О.В., Малые спутники для космических исследований. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. Т/3. Выпуск 4. 2016. - С. 22-31.
3. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Журнал «Вопросы электромеханики». Труды НПП ВНИИЭМ. – 2005. –т. 102. – С. 12-27
4. Морозов А.И., Шубин А.П. Космические электрореактивные двигатели. М., «Знание» 1975.
5. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М., «Атомиздат», 1978.
6. Патент на изобретение - № 2664892 РФ. Абляционный импульсный плазменный двигатель/ Дьяконов Г.А., Лебедев В.Л., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Семенихин С.А., Заяв.: № 2017142943, 08.12.2017. Оpubл.: 23.08.2018 Бюл. № 24.
7. Циолковскій, К.Э. Изслѣдованіе мировыхъ пространствъ реактивными приборами / Циолковскій К.Э.// Научное обозрѣніе – 1903. – №5. – 31 с.
8. Циолковский К.Э. Труды по ракетной технике: монография/ Циолковский К.Э.; под ред. Тихонравова М.К. – М.: Оборонгиз, 1947. – 368 с.
9. Циолковскій К.Э. Изслѣдованіе мировыхъ пространствъ реактивными приборами (дополненіекъ I и II части труда того-же названія): монография. – Калуга: Типографія СеменоваС.А., 1914. – 20 с.
10. Пец Л.А., Симонов А.И., Храбров В.А. Как создавали первые ЭРД // Земля и Вселенная, 2005. № 6. С. 57-60.
11. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Хрусталеv М.М., Яковлев В.Н.

Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011, № 5. –с.30-40.

12. Казеев М.Н. Импульсные плазменные двигатели в России. // Труды МАИ. Выпуск №60. [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

13. Kazeev M.N., Kozlov V.F., Popov G.A., “Two-Dimensional Numerical Simulation of Coaxial APPT”, Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference on Disc [CD-ROM], USA, Pasadena, California, October 14-19, 2001 IEPC-01-159.

14. Rodrigo Marques, Stephen Gabriel and Fernando Costa. HIGH FREQUENCY BURST PULSED PLASMA THRUSTER RESEARCH AT THE UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON // The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.

15. A Micro Pulsed Plasma Thruster (PPT) for the “Dawgstar” Spacecraft. R. Joseph Cassady and W. Andrew Hoskins Primex Aerospace Company P.O. Box 97009 Redmond, WA 98073 425.885.5000.

16. Chuck Zakrzewski, Scott Benson, Joe Cassady, Paul Sanneman. Pulsed Plasma Thruster (PPT) Validation Report. NASA/GSFC June 23 2002.

17. Александров В.В., Белан Н.В., Козлов Н.П., Маштылев Н.А., Попов Г.А., Протасов Ю.С., Хвесюк В.И. Импульсные плазменные ускорители // Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1983. 247 с.

18. Tony Schönherr, Jose Luis Guiza Cepeda, Jonathan Skalden, Dennis Ilic, Georg Herdrich, Kimiya Komurasaki., Coaxial Air-Fed Pulsed Plasma Thruster Research and Development for RAM-EP Application., SEVILLE, SPAIN / 14–18 MAY 2018

19. William Yeong Liang Ling, Zhe Zhang, Haibin Tang., Progress in Fundamental Pulsed Plasma Thruster Research, Atlanta, Georgia, USA, October 8 – 12, 2017.

20. Попов Г.А., Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Орлов М.М., Трубников П.М., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Корректирующая

двигательная установка для низкоорбитальных микроспутников нового поколения. // *Авиационно-космическая техника и технология*, № 8 (16), 2004.

21. 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.

22. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П., Золотой С.А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. // *Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики» Том 114*. 2010 – С.15-26.

23. Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Хрусталёв М.М. Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных космических аппаратов // *Труды МАИ*. Выпуск №73. [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

24. Дронь Н.М., Кондратьев А.И., Хитько А.В., Хорольский П.Г. Концепция использования электроракетных двигателей на микроспутниках. // *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9 (56), 2008.

25. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // *Физика и применение плазменных ускорителей*. Минск: Наука и техника, 1974. С. 8-16.

26. Дмитриенко Б.И., Лесков Л.В., Савичев В.В., Трехов Е.С. и др. Исследование абляции диэлектрика скользящим разрядом в импульсных ускорителях // *Плазменные ускорители*. М.: Машиностроение, 1973. С. 230-233.

27. Патент на изобретение - № 2253953 РФ. 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., Заяв.: № 2003128090/06, 22.09.2003. Оpubл.: 10.06.2005 Бюл. № 16.

28. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // «Космонавтика и ракетостроение». 2008, № 3(52), М.: ЦНИИМАШ. –С.28-34
29. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Марьяшин А.Ю., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Халапян К.Г. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электро-механики» Том 133 №2 2013. – с.19-26.
30. Ходненко В.П., Хромов А.В. Математическая модель энергодвигательной системы малого космического аппарата // Вопросы электромеханики. 2011.Т.125.
31. Ходненко В.П., Колосова М.В. Корректирующие двигательные установки для перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXVII академических чтений по космонавтике. 2013. –с.98-100.
32. Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. и др. Ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: «Машиностроение», 2008. -279 с.
33. Хартов В.В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011, № 3. –С.3-10.
34. Хрусталева М.М., Любинская Н.В. Квазиодномерная физико-математическая модель ускорения плазмы в АИПД малой тяги // Авиационно-космическая техника и технология, № 10, 2006.
35. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. М.: «Машиностроение», -231 с.
36. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя с двухступенчатой схемой ускорения плазмы // XXXV Академические чтения по космонавтике. М.:, 2011.

37. Богаты йА.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорения рабочего тела // Труды МАИ. Выпуск №52. [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

38. Патент на изобретение - № 2542354 РФ. Эрозионный импульсный плазменный двигатель/ Богатый А.В., Дьяконов Г. А., Нечаев И.Л., Заяв.: № 2013143895/07, 01.10.2013. Оpubл.: 20.02.2015 Бюл. № 5.

39. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка двухступенчатого АИПД.// Сборник тезисов 9-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010». М.:, 2010.

40. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) двухступенчатой схемы. // Научные труды 37-й международной молодёжной конференции «37 Гагаринские чтения» М.:, 2010.

41. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) с разделённым механизмом ионизации и ускорения РТ. // Сборник тезисов 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011 М.:, 2011.

42. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделённым механизмом ионизации и ускорения рабочего тела. // Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике. М.:, 2012.

43. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Возможности улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД). // Сборник тезисов 11-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012» М.:, 2012.

44. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) с разделённым механизмом ионизации и ускорения рабочего тела (РТ). // Сборник тезисов Московской

молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике» М.:, 2012.

45. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Оценка путей улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД)// Материалы первой молодёжной конференции «Инновационная деятельность в науке и технике» М.:, 2012.

46. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Оценка путей улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД)// Материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М.:, 2013.

47. Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Семенихин С.А. Экспериментальные методы повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды МАИ. Выпуск №93. [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)

48. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. 389 с.

49. Popov G., Antropov N., Dyakonov G., Orlov M., Tyutin V., Yakovlev V. Experimental Study of Plasma Parameters in High-Efficiency Pulsed Plasma Thrusters // 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 2001, IERC-01-163.

50. Popov G., Antropov N. Development of Next Generation APPT at RIAME // 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 2007, IERC-2007-134.

51. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. Справочная книга. Ленинград, 1986 г.: «Энергоатомиздат», -187 с.

52. Организация объединенных наций. Доклад Комитета по использованию космического пространства в мирных целях, Генеральная Ассамблея. Официальные отчеты. 62 сессия. Дополнение № 20 (A/62/20).

53. Choueiri E. Y. A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906–1956) /E.Y. Choueiri // Journal of Propulsion and Power – 2004. – Vol. 20. – № 2. – P. 193-203.
54. Burton R.L., Rysanek F., Antonsen E.A., Wilson M.J. et al. Pulsed Plasma Thruster Performance for Microspacecraft Propulsion // Micropropulsion for Small Spacecraft. Vol. 187. Progress in Astronautics and Aeronautics, 2000. P. C. 337-352.
55. . Popov G.A., Antropov N.N. Ablative PPT. New Quality, New Perspectives // Acta Astronautica, 2006. 59. P. C. 175-180.
56. Макриденко Л., Шустов Б. Перспективные спутники ВНИИЭМ – новая ступень в развитии орбитальной космической техники // Российский космос, 2011. № 2 (62). С. 20-25.
57. Меньшиков В.А. Многофункциональная космическая система Союзного государства – центральное звено интеграции России и Беларуси в сфере высоких технологий // IV Белорусский космический конгресс. Минск, 2009.
58. Романов А.А., Селиванов А.С., Урличич Ю.М. Тенденции развития технологий сверхмалых КА и новых спутниковых систем на их основе // VII Научно-практическая конференция «Микротехнологии в авиации и космонавтике». М., 2009. С. 10-12.
59. Смирнов К.Ю., Ушаков Е.Г. Конструкция космического аппарата нано-класса ТНС-0 № 2 // VII Научно-практическая конференция «Микротехнологии в авиации и космонавтике». М., 2009. С. 12-13.
60. Zakrzwski C., Benson S., Sanneman P., Hoskins A., On-Orbit Testing of the EO-1 Pulsed Plasma Thruster, AIAA 2002.
61. . Международные тенденции создания и эксплуатации малых космических аппаратов / Лукьященко В.И., Саульский В.К., Шучев В.А. [и др.] // III Международная конференция – выставка « Малые спутники» 27 – 31 мая 2002. г. Королев, Моск. обл. ЦНИИМАШ. – Кн. 1

62. ГОСТ Р 52925—2008. Изделия космической техники. Общие требования по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартиформ, 2008. – 5 с.

63. «Электрические ракетные двигатели». ОКБ «Факел» Летные модели. Справочник <http://www.fakel-russia.com/>

64. Popov G.A., Obukhov V.A., Konstantinov M.S., Fedotov G.G., Murashko V.M., Arkhipov B.A., Koryakin A.I., Pridannikov S.Yu, Martynov M.B., Morskoy I.M. Development of Electric Propulsion System Based on SPT-140 for “Phobos – Soil” Mission”. 52<sup>nd</sup> International Astronautics Congress, Paper IAF 01-Q.03.b05, 2001.

65. Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели (ЭРД). Разработки ЭРД в России. Роль Московского авиационного института. Вестник Московского авиационного института 2005 т. 12, N 2.

66. Аватинян Г.А., Шелков Н.П., Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А. и др. Выбор корректирующей ДУ для МКА «Вулкан» // Труды III Международной конференции-выставки «Малые спутники – новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Кн. 3. 2002. С. 291-296.

67. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Издательство «Мир», Москва, 1972 г. –С.314-331.

68. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Отработка результатов наблюдений. М., Наука, 1970 г. – с. 107.

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