

М 87356

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана

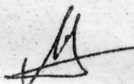
На правах рукописи
УДК 621.039.533.07

Мишанов Анатолий Викторович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТНОГО КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО
СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ХВЕСЮК В. И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ТИХОНОВ В. Б.

кандидат технических наук, с. н. с.
ПЕТРОВСОВ В. А.

Ведущая организация: Институт физики АН Беларуси

Защита состоится "28" ИЮНЯ 1993 года в 14⁰⁰ часов на
заседании специализированного Совета К 053.15.08 в Московском
государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по
адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул. "Б"

С диссерт-

Авторефер

Ученый со
специализирован
к. т. н.,

В. Ю. Н.

Подписан

Заказ 297

П. Л.

M 87356

Актуальность тем.

Создание мощных ускорителей плазмы, способных генерировать потоки рабочего вещества со средними направленными энергиями, составляющими единицы кэВ, удельными мощностями в десятки МВт/см² при длительности генерации в несколько мс, является одной из важных проблем физики плазмы и плазмодинамики. Плазменные потоки с такими параметрами могут найти применение в термоядерных исследованиях (например, для моделирования процессов на первой стенке термоядерного реактора-токамака в условиях срыва тока), при создании систем накачки мощных лазеров, в космических исследованиях, а также в различных технологических приложениях (азотирование, поверхностная закалка и т. п.).

Наиболее близкие к вышеперечисленным параметрам характеристики имеет плазма, генерируемая импульсными плазменными ускорителями (С. Д. Гришин, А. В. Лесков, Н. П. Козлов. Плазменные ускорители. - М.: Машиностроение, 1983. - 231 с.). Но в работе (А. А. Поротников. Плазменные ускорители. - М.: Машиздат, 1973. - 106 с.) было показано, что для получения плазменных потоков с подобными характеристиками, используя традиционные ИПУ, возникает ряд серьезных трудностей, связанных с организацией плазменных процессов в ускорительном канале.

Так, было обнаружено, что при увеличении мощности разряда ИПУ возникает аномальное явление "прианодного скольжения тока". Его суть состоит в своеобразной автоизоляции анода, связанной с обеднением прианодной зоны ионами и возникновением вблизи анода большого скачка потенциала, что, в конечном итоге, приводит к возникновению токов выноса и сильной эрозии анода (А. И. Морозов, А. К. Виноградова. Стационарные компрессионные течения// Физика и применение плазменных ускорителей/ Под ред. А. И. Морозова. - Минск: Наука и техника, 1974. - С. 72 - 102).

Кроме того, в экспериментальных исследованиях мощных плазменных ускорителей с эквипотенциальными сплошными электродами была обнаружена неустойчивость зоны ионизации, причем двух типов:



вращательная и продольно-колебательная (П. Е. Ковров, А. П. Шубин. Сильноточный коаксиальный плазменный ускоритель в квазистационарном режиме // Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А. И. Морозова. - Минск: Наука и техника, 1974. - С. 103 - 141). Данные неустойчивости приводят к сильным колебательным процессам в плазме, уменьшающим эффективность ее ускорения.

Как показывает анализ протекания плазменных процессов в ускорительном канале, проведенный А. И. Морозовым (А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. Стационарное течение плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы. Вып. 8 / Под ред. М. А. Леонтовича. - М.: Госатомиздат, 1974. - С. 3 - 87), избежать возникновения эффекта "прианодного скольжения тока" и неустойчивости зоны ионизации можно в результате перехода ускорителя на двухступенчатую работу и реализации в ускорительном канале ионного токопереноса. Для этого в качестве первой ступени используется входной ионизационный блок (ВИБ), где осуществляется создание и предварительный разгон плазмы, что повышает эффективность ее ускорения в основной ступени, а также препятствует возникновению зоны ионизации. Реализация ионного токопереноса может быть возможна лишь при использовании специальных систем:

- анодного трансформера (T_a), обеспечивающего эмиссию ионов из плазмы, необходимую для переноса тока в ускорительном канале, а для формирования плазменной эмиттирующей поверхности (ПЭП) используются специальная магнитная система и генераторы плазмы - анодные ионизационные камеры (АИК);

- катодного трансформера (T_k) с магнитным экранированием элементов конструкции, необходимого для безэрозионного приема высокоэнергетичных ионов и обеспечения их эффективной рекомбинации.

Ускорители подобного класса получили название: коаксиальный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ), идея и основные физические принципы которого были сформулированы А. И. Морозовым (А. И. Морозов. Принципы коаксиальных (квази)стационарных плазменных ускорителей (КСПУ) // Физика плазмы - 1990. - Т. 16, вып. 2. - С. 131-146).

В данной работе разработана концепция компактного КСПУ, где впервые использован активный анодный трансформер θ -типа и осесимметричный входной ионизационный блок. Проведены исследования генерации и динамики течения плазмы в продольном азимутальном магнитном поле. Разработана и изготовлена полномасштабная модель компактного КСПУ, на которой получены первые интегральные электрические характеристики.

Цели работы.

1. Разработка концепции создания КСПУ компактной геометрии с активным анодным трансформером θ -типа.

2. Изучение динамики плазменных процессов в трактах θ -Та:

- исследование влияния внешнего продольного магнитного поля на характеристики АИК и параметры генерируемой плазмы;
- исследование динамики течения плазмы в криволинейном магнитном канале вдоль азимутального магнитного поля, моделирующего собственное поле основного разряда.

3. Разработка принципиально новой конструкции и изготовление полномасштабной модели осесимметричного ВИБ. Проведение экспериментальных исследований электрических характеристик и параметров генерируемой плазмы при наличии и отсутствии внешнего азимутального магнитного поля, создаваемого током, протекающим через катодный трансформер.

4. Разработка конструкции и изготовление активного анодного трансформера θ -типа, где для формирования плазменной эмиттирующей поверхности впервые используется собственное азимутальное магнитное поле основного разряда (дополнительные магнитные системы отсутствуют), а анодные ионизационные камеры размещаются непосредственно в ускорительном канале.

5. Компоновка основных блоков компактного КСПУ: ВИБ, Тк и θ -Та. Изготовление полномасштабной модели. Проведение экспериментальных исследований интегральных электрических характеристик.

Научная новизна работы.

1. Впервые изучено влияние внешнего продольного магнитного поля, величиной до 0,5 Тл, на вольт-амперную характеристику, токи

выноса и приэлектродные падения потенциала в коаксиальном плазменном ускорителе (работающем на водороде), где разрядные токи составляли 8...14 кА при длительности импульса 100...500 мкс. Полученные результаты показали возможность размещения АИК непосредственно в магнитную конфигурацию θ -Та.

2. Впервые исследована динамика течения плотной (с концентрацией порядка 10^{14} см $^{-3}$), частично замагнитенной ($\omega_{ce} \gg \Gamma$ и $\omega_{ci} < \Gamma$) водородной плазмы в криволинейном магнитном канале, вдоль азимутального магнитного поля с индукцией до 0.3 Тл. Полученные результаты позволяют найти оптимальные значения параметров плазменного потока, магнитного поля и конструкции транспортирующего канала, когда потери плазмы минимальны (меньше 20%).

3. Впервые разработан, изготовлен и исследован ВИБ "кольцевого" типа, который позволяет формировать однородные по азимуту кольцевые квазистационарные плазменные потоки, что дает возможность исключить из традиционной схемы КСПУ дрейфовый канал.

4. Впервые разработана и изготовлена модель активного θ -Та, где формирование ПЭП происходит за счет собственного азимутального магнитного поля T_k , а АИК расположены непосредственно в зоне ускорительного канала в четырех секциях (по два в каждой секции), работающих независимо друг от друга.

5. На основе проведенных экспериментов и разработанных устройств ВИБ и θ -Та, изготовлена и испытана полномасштабная модель компактного КСПУ, впервые получены интегральные электрические характеристики, подтверждающие наличие в ускорительном канале электродинамического механизма ускорения.

Практическая ценность работ.

1. Найден оптимальные режимы генерации и транспортировки плотной плазмы в криволинейных магнитных каналах с углом поворота 90°, где потери составляют не более 20%. Данные результаты могут быть полезны при проектировании систем формирования и очистки плазменных потоков от различных примесей (в том числе капельной фазы), для термоядерных устройств, а также многих технологических установок, например в машиностроении и микроэлектронике.

2. Разработанный компактный КСПУ в первую очередь (конечно, при увеличении энерговыклада в основной разряд) может быть использован в термоядерных исследованиях как инжектор плазмы для заполнения магнитных ловушек. Кроме того, имея на выходе, уже на сегодняшний день, плазменный поток с удельной мощностью в десятки МВт/см², данный ускоритель может найти широкое применение для моделирования процессов на первой стенке термоядерного реактора-токамака в условиях срыва тока. Большой интерес представляет также использование зоны компрессии компактного КСПУ в качестве мощного источника коротковолнового излучения (добавляя в ускоряемый водородный поток дозированные количества примесей тех или иных тяжелых элементов, можно будет получить из области компрессии излучение соответствующих параметров). Имея небольшие геометрические и массовые характеристики, в сочетании с возможностью получить плазменные потоки с высоким энергосодержанием (в десятки кДж), данный ускоритель может использоваться в космических исследованиях (например, для моделирования взаимодействия летательных аппаратов с мощными потоками заряженных частиц). И, наконец, большой интерес представляет использование компактного КСПУ в технологии: азотирование поверхности, модифицирование поверхностного слоя изделий за счет поверхностной закалки, аморфизации и т.п. Немаловажную роль в использовании данного устройства в технологических приложениях может сыграть относительная (в сравнении с существующими моделями) простота конструкции в сочетании с высокой надежностью основных функциональных блоков, что в итоге снижает себестоимость в его изготовлении и обслуживании.

На защиту выносятся:

- сравнительный анализ различных концептуальных схем КСПУ, выбор базовой схемы;
- экспериментальный сценарий для испытания КСПУ и его основных узлов: состав, основные параметры, принцип работы;
- результаты исследований работы коаксиального плазменного ускорителя и характеристик генерируемых им плазменных потоков во

внешнем продольном магнитном поле;

- экспериментальные результаты течения плазмы в криволинейном магнитном канале, при отсутствии и наличии касания плазмы с металлической стенкой;

- конструкция и результаты экспериментальных исследований ИИБ с кольцевой геометрией электродов;

- исследование течения плазмы в модели секции e -Та: описание конструкции специального двухканального АИК и модели секции, экспериментальные результаты;

- конструкция e -Та;

- конструкция полномасштабной модели компактного КСПУ, результаты предварительных испытаний.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на докладах VI Всесоюзной конференции по новой технике (Харьков, 1987 г.), VII Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам (Харьков, 1988 г.), XI Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы (Новосибирск, 1989 г.), Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (Москва, 1991 г.), а также на научных семинарах в ХФТИ (Харьков, 1989 г.), ИТФ СО АН (Новосибирск, 1990 г.), ИАЭ им. Курчатова, ТРИНИТИ и МВТУ им. Баумана (Москва, 1988 - 1991 гг.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и библиографического описки из 53 наименований. Она содержит 118 страниц текста и 73 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, кратко рассмотрено состояние исследований по созданию КСПУ. На основе публикаций экспериментальных и теоретических исследований существующих полномасштабных моделей КСПУ проведен выбор

оптимальной схемы КСПУ, поставлены цели и задачи исследований. Кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе приведено описание экспериментальной установки, предназначенной для испытаний КСПУ и его элементов. Представлен состав и основные характеристики вакуумной системы, системы газоснабжения, системы электропитания и синхронизации с общим энергозапасом в 100 кДж, а также системы диагностики.

Во второй главе рассматривается работа коаксиального плазменного ускорителя с профилированным центральным электродом (АИК) в продольном магнитном поле. Приведены конструкции исследуемых ускорителей и магнитных систем, а также их основные параметры. Изучено влияние, оказываемое внешним продольным полем на интегральные электрические характеристики разряда АИК, проанализировано качественное изменение протекания плазменных процессов в разрядном промежутке и на выходе ускорителя.

Так, было обнаружено, что наложение внешнего продольного магнитного поля с индукцией до 0,3 Тл на АИК приводит к тому, что у плазменного потока внутри разрядного промежутка появляется азимутальная составляющая скорости, (движение плазмы приобретает спиралеобразный характер). Вместе с этим наблюдается уменьшение прианодного падения потенциала с 70 до 5 В, что, вероятно, является одной из причин наблюдаемого уменьшения токов выноса (более 30% от разрядного тока). При этом на выходе ускорителя образуется расфокусированный бестокковый плазменный поток, движущийся вдоль магнитных силовых линий.

Показано, что АИК при работе во внешнем магнитном поле обеспечивает необходимые параметры плазмы для формирования плазменной эмиттирующей поверхности. При отсутствии токов выноса удается снизить воздействие собственных магнитных полей ускорителя на магнитную конфигурацию транспортной системы θ -Та.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований транспортировки плотной частично замагниченной

плазмы в криволинейном магнитном канале, имеющем топологию и величину магнитного поля, сходную с θ -Та. Приведены результаты исследований динамики течения плазмы в "чистом" (без контакта со стенками) азимутальном магнитном поле, а также при наличии металлической стенки, находящейся под разными потенциалами. В частности, зондовые измерения распределения концентрации поперек канала (вдоль радиуса) во входном и выходном сечениях, а также фоторегистрация течения плазмы позволили найти наиболее оптимальные сочетания характеристик инжектируемой плазмы и магнитного поля, при которых достигается наиболее эффективная транспортировка. Для оценок этой величины использовалось значение интегрального коэффициента однородности распределения концентрации плазмы вдоль канала из выражения:

$$K_0 = \frac{\int_{r_1}^{r_2} n_{\text{ВХ}}(r) \cdot dr}{\int_{r_1}^{r_2} n_{\text{ВЫ}}(r) \cdot dr},$$

где: $n_{\text{ВЫ}}(r)$ и $n_{\text{ВХ}}(r)$ - локальные значения концентраций плазмы на входе и на выходе магнитного канала, r_1 - радиус внутренней границы канала, r_2 - радиус металлической пластины, расположенной по внешнему обводу струи. Значения коэффициента K_0 для различных случаев течения плазмы приведены на рис. I. Показано, что вставленная внутрь магнитного канала металлическая пластина оказывает существенное воздействие на течение плазмы. На основе проведенных экспериментов найдено оптимальное значение азимутального магнитного поля (0,15...0,2 Тл) в криволинейном магнитном канале с металлической стенкой, при котором происходит наиболее эффективная транспортировка плазменного потока ($K_0 \approx 0,8$) и одновременно сохраняется довольно хороший контакт плазмы со стенкой.

В четвертой главе рассмотрена схема и приведена конструкция принципиально новой модели компактного КСПУ, в котором впервые используется активный анодный трансформер θ -типа (где плазменная эмиттирующая поверхность формируется за счет собственного азимутального поля T_k , а АИК расположены непосредственно в зоне ускорительного канала) и осесимметричный ВИБ. Приведено подробное описание всех элементов компактного КСПУ и экспериментальные

результаты их испытаний. Показана довольно высокая эффективность и надежность работы всех узлов и устройств.

Приведены результаты исследования компактного КСПУ с активным θ -Та. Показана устойчивая синхронная работа всех блоков КСПУ. Получены его основные электрические характеристики (рис. 2). Показано, что ВАХ разряда основной ступени аппроксимируется степенной зависимостью $U_p \sim I_p^{2.85}$, что почти вплотную приближается к теоретической, где $U_p \sim I_p^3$. Это указывает на наличие в ускорительном канале электродинамического механизма ускорения плазмы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Впервые разработана схема, создан и испытан компактный КСПУ с ВИБ кольцевого типа и активным четырехсекционным θ -Та.

2. Создан экспериментальный стенд для испытания КСПУ и его элементов, включающий вакуумную систему, систему газоснабжения, блок электропитания с системой синхронизации, а также систему диагностики.

3. Изучена работа АИК во внешнем продольном магнитном поле. Показано, что внешнее магнитное поле уменьшает эффект "скольжения" тока вдоль анода. В результате снижаются прианодный скачок потенциала и токи выноса. Эксперименты однозначно указывают на возможность помещения АИК в магнитную конфигурацию θ -Та, что позволяет сделать более компактной конструкцию последнего и увеличивает эффективность использования генерируемой АИК анодной плазмы.

4. Найдены и реализованы методы транспортировки плотной частично замагниченной плазмы вдоль азимутального магнитного поля. Обнаружено, что расположенная по внешнему обводу потока плазмы металлическая стенка, находящаяся под "плавающим" потенциалом, существенно повышает эффективность транспортировки. Показана возможность формирования плазменной эмиттирующей поверхности только за счет собственного магнитного поля КСПУ, что намного упрощает конструкцию и удешевляет создание активного

θ -Та, при сохранении его мощностных характеристик.

5. Впервые в первой ступени КСПУ используется ускоритель с кольцевой геометрией электродов, генерирующий на входе в ускорительный канал равномерный по азимуту поток плазмы. Это позволяет исключить из схемы КСПУ дрейфовый канал и сделать КСПУ более компактным при сохранении его мощностных характеристик.

6. Получены интегральные электрические характеристики компактного КСПУ. Обнаружено хорошее соответствие экспериментальной ВАХ с теоретической.

7. Основываясь на результатах проведенных экспериментов создан КСПУ, обладающий следующими преимуществами:

а) осесимметричная система ВИБ;

б) наличие активного θ -Та, в котором:

- инжекция плазмы осуществляется вдоль силовых линий магнитного поля;

- ПЭП формируется в собственном магнитном поле КСПУ;

- конструкция АИК обеспечивает осесимметричность ПЭП и возможность регулирования распределения концентрации плазмы (а значит, и плотности эмиттируемого ионного тока) вдоль продольной координаты.

Реализованные усовершенствования обеспечивают компактность, дешевизну, надежность и удобство данной конструкции КСПУ для различных применений (в том числе технологических).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.М. Зимин, Е.Н. Мастюков, А.В. Мишанов. Транспортировка плазмы в криволинейных магнитных каналах// Плазменные энергетические установки. - М.: МВТУ, 1988. - С. 68 - 82.

2. Е.Н. Мастюков, А.В. Мишанов, В.И. Хвесик. Изучение транспортировки плазмы в криволинейных магнитных полях// Тезисы докладов VII-ой Всесоюзной конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. - Харьков: 1989. - С. 45 - 46.

3. Е.Н. Мастюков, А.В. Мишанов, В.И. Хвесик. Процессы формирования плазмы анодного θ -трансформера// Тезисы докладов VII-ой Всесоюзной конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. - Харьков: 1989. - С. 41 - 42.

4. Е.Н. Мазыков, А.В. Мишанов, В.И. Хвеськи. Влияние продольного магнитного поля на процессы в импульсном генераторе плазмы// Тезисы докладов XI Всесоюзной конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. - Новосибирск: 1989. - С. 135 - 136.

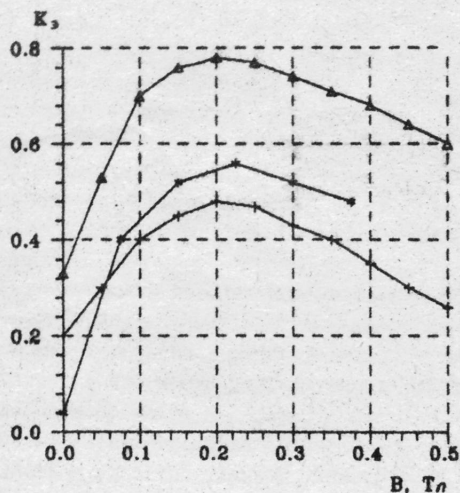


Рис. 1. Зависимость коэффициента однородности распределения концентрации плазмы K вдоль канала при наличии и отсутствии металлической пластины (пластина располагалась по внешнему обводу плазменной струи)

- Δ - пластина имеет "плавающий" потенциал
- +
- пластина "заземлена"
- *
- пластина отсутствует

U_p , кВ

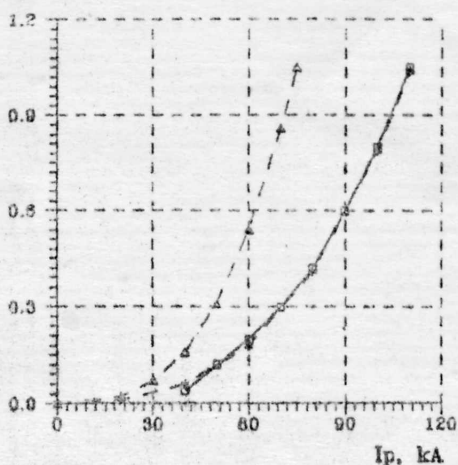


Рис. 2. ВАХ основного разряда компактного КСПУ:

Δ - $U_p = 0.25 \cdot 10^{-11} \cdot I^3$

$*$ - $U_p = 0.25 \cdot 10^{-11} \cdot I^{2.45}$

$\square$ - ВАХ основного разряда в штатном режиме