

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Асмедьянов Никита Равильевич

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: **ИСТОЧНИК ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ С БОЛЬШОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИЕЙ**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

Иванов А. А.

Д. ф. м. н., профессор, научный сотрудник,

ИЯФ СО РАН

...../.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018г.

Научный руководитель

Колесников Е. Ю.

Научный сотрудник, ИЯФ СО РАН

...../.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018г.

Дата защиты: «.....».....2018г.

Новосибирск, 2018

Оглавление

1. Введение	2
2. Основная часть.....	7
1. Литературный обзор.....	7
2. Описание объектов и методик исследования	9
3. Результаты измерений	21
4. Анализ полученных результатов	26
3. Заключение.....	28
4. Библиографический список.....	30
5. Приложения.....	32

1. Введение

Термоядерная энергетика — многообещающая концепция энергетики будущего. Термоядерные реакции могут эффективно происходить при характерных энергиях реагирующих частиц ~ 10 кэВ, что соответствует параметрам горячей плазмы.

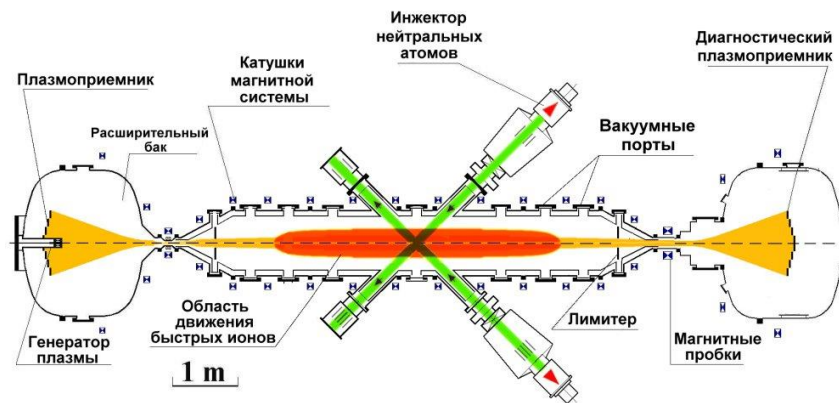


Рис. 1. Схема ГДЛ.

В лаборатории 9.1 ИЯФ СО РАН на базе магнитной ловушки открытого типа (установка ГДЛ [1]) разрабатывается проект термоядерного реактора с линейной осесимметричной конфигурацией.

На установке ГДЛ (газодинамическая ловушка Рис. 1) изучаются вопросы нагрева плазмы, поддержания её материального баланса и стабилизации неустойчивостей ловушки. Плазма в ГДЛ удерживается в течение времени ~ 1 мс и содержит две компоненты ионов: $\sim 0,1$ кэВ (мишенная плазма) и ~ 10 кэВ, плотностью $\sim 10^{13}$ см⁻³. Переход существенно к большим временам удержания плазмы в ловушке (~ 1 с) требует развития методов поддержания материально баланса плазмы. Далее следует перечень этих методов [2]:

- 1) Самым простым решением кажется *инжекция нейтрального газа* в рабочую камеру. Такой метод не годится для поддержания горячей плазмы в стационарном состоянии. В такой плазме горячие электроны с большой вероятностью выбивают валентный электрон из молекулы H_2 , образуя молекулярный ион H_2^+ . Он в свою очередь легко распадается на H^0 и H^+ . Ион водорода не может дрейфовать перпендикулярно магнитному полю в плазму, а нейтрал H^0 с характерной энергией масштаба 1 эВ в горячей

плазме обладает большим сечением столкновения и не может проникнуть в нее глубже, чем на ~ 1 мм.

- 2) *Пневматические легко-газовые пушки* разгоняют частицы замороженного водорода ($\varnothing \sim 2$ мм) до скорости ~ 3 км/с. Большой скорости инъекции таким методом достичь невозможно. При этом такие пушки являются устройствами со сложной механикой и требуют технологии создания переохлажденных частиц (пелет).
- 3) *Инжекторы нейтральных атомов* (Рис. 1)— один из способов поддержания плотности и нагрева плазмы, используемых на данный момент. Инжекторы являются весьма сложными в производстве и эксплуатации устройствами. К тому же такие источники очень дорогие.
- 4) *Плазменная пушка для пучков с небольшой кинетической энергией вдоль силовых линий магнитного поля* (рис. 1) позволяет ввести нагретую плазму через магнитную пробку в рабочую область. Перепад магнитного поля в расширителе и амбиполярный потенциал [1] создают в районе пробок энергетический барьер (потенциал Юшманова). Этот барьер не позволяет холодным электронам из расширителя попасть в центральную ячейку ГДЛ и охладить плазму. Когда происходит выстрел из плазменной пушки со стороны плазмоприемника, получившаяся струя холодной плазмы преодолевает этот барьер и позволяет холодным электронам попасть в центральную ячейку. Это приводит к значительным потерям энергии из плазмы и ее охлаждению.
- 5) *Импульсные ускорители плазмы*: плазма создаётся и ускоряется разрядом между электродами с коаксиальной геометрией. Эти устройства используются в качестве основного источника в экспериментах с плазмой, позволяя разгонять пучки с плотностью $\sim 10^{22}$ м⁻³ до скоростей ~ 100 км/с. В дальнейшем будут рассматриваться именно они, так как лучше всего подходят для поперечной инъекции плазмы.

В данной работе рассмотрен источник плазмы на основе импульсного

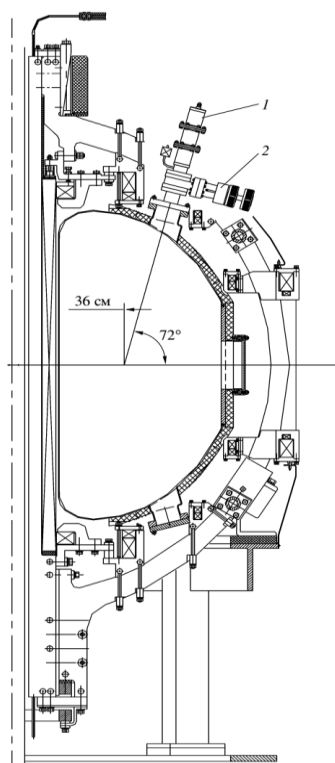


Рис. 2. Расположение источника плазмы (1) на Глобус-М.

ускорителя плазмы. Этот источник планируется использоваться для поддержания материального баланса мишенной плазмы при больших временах удержания в ловушке путем инъекции плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Инжекция пучков плазмы поперёк магнитного поля применяется на данный момент в сферическом токамаке Глобус-М в ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Рис. 2), а также на других установках, например, 3Alpha [3], [4]. Давление магнитного поля на плазму препятствует проникновению плазмы в область более сильного магнитного поля. По

фотографиям в [5] видно, что при одинаковой начальной скорости ~ 30 км/с и одинаковой плотности водородной плазмы $\sim 10^{22}$ м⁻³ при 0.2 Тл плазма не вылетает из сопла инжектора, а при 0.15 Тл уже долетает до противоположной стороны камеры.

Критерием проникновения плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля является соотношение плотности кинетической энергии струи плазмы и давления магнитного поля [6]:

1. Струя плазмы имеет большую плотность кинетической энергии ($\rho v^2/2$). Её давление больше давления магнитного поля ($B^2/8\pi$), и она его продавливает, продолжая движение поперек силовых линий магнитного поля.
2. Плотность кинетической энергии меньше плотности энергии магнитного поля. Заряды разных знаков в ней расходятся под действием силы Лоренца в разные стороны. В струе возникает собственное электрическое поле, направленное перпендикулярно

магнитному полю и вектору скорости струи. Под действием $[\vec{E} \times \vec{B}]$ -дрейфа струя продолжает движение поперек силовых линий магнитного поля.

3. Струя плазмы имеет малую плотность кинетической энергии. Этой энергии недостаточно для поддержания поляризационного электрического поля ($E^2/8\pi$). Плазма отражается от магнитного поля.

Отсюда следует, для поддержания материального баланса плазмы методом поперечной инжекции плотность кинетической энергии струи плазмы должна превышать $V^2/8\pi$ в точке инжекции.

В ИЯФ существует прототип источника плазмы аналогичного описанному

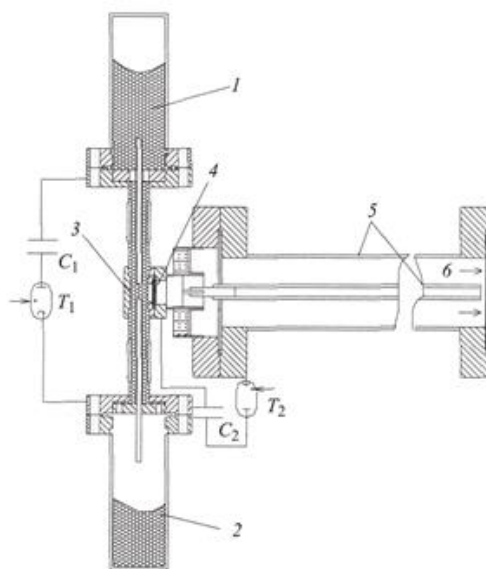


Рис. 3. Двухступенчатый источник плотной плазмы. 1, 2 — электроды первой ступени. 3 — зона разряда первой ступени, 4 — защитная сетка, 5, 6 — коаксиальные электроды второй ступени.

в [2]. В этом источнике (Рис. 3) водород, полученный путем электрического разряда в порошке TiH, поступает в пространство между коаксиальными электродами. При подаче высокого напряжения на эти электроды происходит газовый разряд, и образовавшаяся плазма ускоряется между коаксиальными электродами.

Требования к источнику на ГДЛ следующие: стабильность параметров плазменной струи, достаточная проникающая способность инжекции, высокая чистота состава плазмы. Такой источник дает возможность управления плотностью мишенной плазмы. Характерные параметры импульсного плазменного ускорителя: ускоряющее напряжение до 10 кВ, длина ускоряющего промежутка 25 см. длительность разряда ~10 мкс.

Перед установкой на ГДЛ такого источника плазмы необходимо провести измерения параметров плазмы, вылетающей из него, а также оптимизировать её скорость и плотность.

Целью данной работы является разработка системы диагностики параметров струи плазмы и системы питания плазменной пушки, а также оптимизация плазменной пушки для инъекции плазмы поперёк магнитного поля газодинамической ловушки.

Требуемое давление плазменной струи оценивается из того условия, что оно должно превышать давление магнитного поля в ГДЛ с пробочным соотношением 3. Амплитуда индукции магнитного поля при этом составляет ~ 1 Тл. Давление такого поля $p_H = B^2 / 2\mu_0 \approx 4 \times 10^5$ Па.

Давление струи измеряется косвенно, по плотности и скорости плазмы ($p = \rho v^2$). Для этого разработана система диагностик:

- Для анализа скорости используются два двойных ленгмюровских зонда, расположенных на фиксированном расстоянии
- Для измерения токов используются пояса Роговского
- Для измерения напряжений используются делители напряжения
- Для измерения плотности используется трехзеркальный интерферометр

В начале работы заведующим лаборатории 9.1 была предоставлена плазменная пушка и система питания (Рис. 3), разработанные М. Г. Атлухановым и Кириенко в 2009 году [7]. Эта пушка не позволяла контролировать количество ускоряемых молекул водорода (получены разрядом в гидриде титана на электродах 1 и 2), не имела никаких диагностик, работала не стабильно, испускала плазму, загрязненную ионами титана, а также требовала постоянной разгерметизации камеры для перезарядки TiH .

Практической частью данной работы является модернизация предоставленной плазменной пушки, исправление имеющихся недостатков, отладка методов контроля и диагностики параметров пушки и плазменной струи.

2. Основная часть

1. Литературный обзор

Вопрос о поддержании материального баланса плазмы возникает на большинстве плазменных установок как с холодной, так и с горячей плазмой. На каждой установке этот вопрос требуется решить по-своему, с учетом геометрических, физических и прочих особенностей установки. В статье [8] рассматриваются различные способы поддержания материального баланса для токамака Глобус-М, такие как: системы импульсной подачи рабочего газа в токамак, пневматические легкогазовые пушки для частиц замороженного водорода, ускорители плазмы различного рода. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Проведя анализ достоинств и недостатков различных способов поддержания материального баланса плазмы в токамаке, автор принял решение использовать плазменную пушку с большой кинетической энергией для инжекции плазмы поперек магнитного поля. В его версии пушка ускоряет плазму по такому же принципу как здесь (см. стр. 9), и подача газа в разрядную область осуществляется электрическим разрядом в гидриде титана. Автор протестировал данную пушку с различными параметрами (длина дула, напряжение на разрядном промежутке и т.п.) и экспериментально подобрал оптимальные параметры для токамака.

Пример использования аналогичного источника плазмы для поперечной инжекции на открытых ловушках можно найти в статьях [3] и [4]. В них говорится о повышении плотности плазмы в установке 3Alpha под действием поперечной инжекции плазмы.

В ИЯФ СОРАН так же возник вопрос о поперечной инжекции плазмы на установке ГДЛ, так как пушка для продольной инжекции с низкой кинетической энергией является источником холодных электронов и сильно понижает температуру электронов в рабочей области, напуск нейтрального газа в горячую плазму не эффективен, а инжекторы нейтральных атомов имеют слишком большую удельную стоимость инжектируемого вещества.

Этот вопрос начал решаться в работе [7]. В ходе неё была создана пушка, аналогичная [8] с системой питания, а так же были произведены некоторые попытки калибровки этой пушки.

Более подробно диагностика параметров таких источников плазмы рассматривается в статье [5]. В статье автор перечисляет ряд диагностик для различных параметров плазменной струи. Для плотности плазмы предложено использовать интерферометрические измерения. Для измерения скорости автор использует стрик камеру. Состав плазмы измерен спектрометром, энергия струи — калориметром, давление — пьезодатчиком.

2. Описание объектов и методик исследования

Принцип действия плазменной пушки

- *Физический принцип ускорения плазмы* [8]

В пространство между двумя коаксиальными (Рис. 4) электродами, находящимися под разностью потенциалов несколько киловольт, подается нейтральный газ (в используемом источнике это водород), в электрическом поле происходит пробой газа. Образуются ионы и электроны.

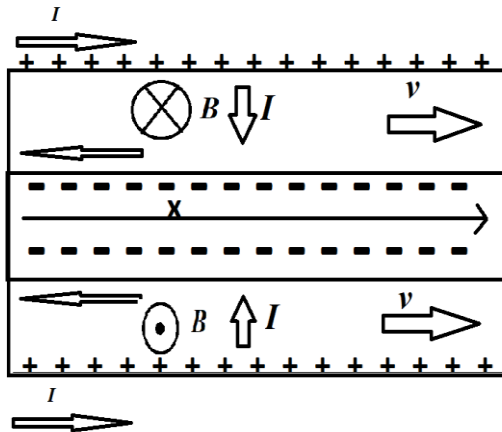


Рис. 4. Принцип действия плазменной пушки.

Напряжение на электродах заставляет частицы двигаться в направлении, соответствующем их заряду. Возникший электрический ток замыкается через центральный электрод и создаёт азимутальное магнитное поле внутри ускорителя. В результате взаимодействия

этого магнитного поля с радиальным током разряда возникает ускоряющая сила, действующая на плазму. От параметров данной системы она зависит следующим образом [2]:

$$F = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dx}, \quad (1)$$

где I — ток разряда; L - индуктивность коаксиальных электродов. Сила действует вдоль оси X в направлении от места подключения токоподводов к удаленному торцу коаксиальных электродов независимо от направления тока. Скорость плазменного пучка в ускорителе может быть определена из выражения [8]:

$$v = \sqrt[4]{\frac{4L_x U_0^2 x^2}{3s\rho_0 L_0^2}}, \quad (2)$$

где L_0 — индуктивность внешнего контура, L_x — удельная индуктивность коаксиальных электродов, U_0 — начальное напряжение на конденсаторах (~5

кВ, Рис. 24), S — площадь кольца между электродами, ρ_0 — плотность ускоряемого вещества.

Система подачи газа

Для подачи газа было решено использовать быстродействующий электродинамический газовый клапан.

- *Принцип действия электродинамического клапана*

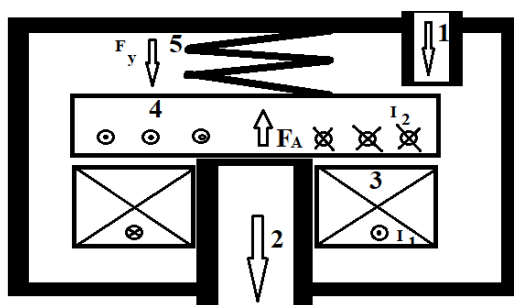


Рис. 5. Принцип действия электромагнитного клапана. 1 — входящий поток газа, 2 выходящий поток газа, 3 — соленоид, 4 — проводящая пластина, 5 — пружина.

В закрытом состоянии (Рис. 5) проводящая пластина (4) прижата пружиной (5) перекрывает поток газа. Когда в соленоиде (3) течет ток I_1 , в пластине возникают токи I_2 Фуко, препятствующие изменению потока магнитного

поля через пластину. Когда возникшая сила Ампера между токами I_1 и I_2 превышает силу упругости пружины (5), пластина (4) поднимается и выпускает газ в рабочую область.

- *Расположение клапана*

Клапан отделен от пушки керамическим изолятором и расположен таким образом, чтобы газ инжектировался в разрядный промежуток в радиальном относительно пушки направлении (Рис. 25).

- *Измерение тока питания клапана поясом Роговского [9].*

Давление газа, вышедшего в рабочую область, напрямую зависит от высоты, на которую поднимется пластина (4 на Рис. 5). Высота в свою очередь пропорциональна квадрату тока I_1 , что делает необходимым его измерение для анализа поведения клапана. Ток измерен поясом Роговского, подключенным в режиме трансформатора тока (формула (3), Рис. 10).

- *ПМИ: чертёж, принцип действия и схема подключения*

Для измерения зависимости давления газа на выходе пушки использовался манометрический ионизационный преобразователь ПМИ-27 (Рис. 6). [10]

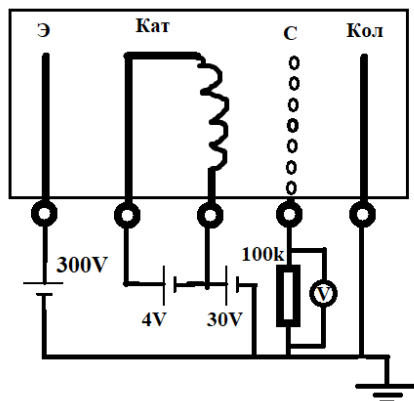


Рис. 6. Схема подключения ПМИ-27. Э – экран, Кат – катод, С – сетка, Кол – коллектор.

Катоды изготовлены из иридиевой проволоки диаметром 0.1 мм, длиной 45 мм и закреплены с внешней стороны сетки.

Сетка — спираль, диаметром 20 мм из молибденовой проволоки диаметром 0.1 мм, навита на четыре траверсы. Торцы сетки закрыты плоскими никелевыми сетками.

Коллектор — прямой вольфрамовый стержень со средним диаметром 0.1 мм. Коллектор консольно приварен к центральному выводу цоколя и расположен по оси сетки.

Экран — перфорированный цилиндр из молибденового листа толщиной 0.1 мм. Сплошная часть экрана располагается напротив низковакуумного катода.

При измерении давлений в диапазоне от 10 до 3×10^{-3} Па (10^{-1} до 2.5×10^{-5} мм рт. ст.) воздухостойкий катод (иридиевая проволока, покрытая окисью иттрия) эмитирует электроны, которые ускоряются полем положительного заряженного экрана и ионизируют газ в преобразователе. Образующиеся положительные ионы уходят на отрицательно заряженную сетку. При постоянном токе эмиссии электронов и постоянном ускоряющем электроны напряжении на экране, число ускоряющихся ионов пропорционально

молекулярной концентрации газа в межэлектродном пространстве преобразователя.

Ионный ток сетки преобразователя подается на вход усилителя и служит мерой давления. Короткие траектории электронов от катода к экрану подключают паразитные вторичные процессы при измерении больших давлений, а значительно большая площадь ионного коллектора (сетка), по сравнению с нитью катода, обеспечивает эффективность сбора положительных ионов, независимую от давления газа.

Блок питания пушки

Схему блока питания можно найти в работе М. Г. Атлуханова [7]. Она представляет собой разрядный контур на основе 4 конденсаторов ИК-6-150 суммарной емкостью 150 мкФ с системами зарядки и управления.

- *Подготовка игнитрона*

Важным элементом блока питания пушки является игнитрон — одноанодный ионный прибор, имеющий ртутный катод и управляемый дуговой разряд (Рис. 7). Испускание электронов, которое вызывает главный дуговой разряд между катодом и анодом игнитрона, возникает при положительном напряжении на аноде с одного либо нескольких ярко светящихся участков катода, другими словами, катодных пятен. Они возникают с помощью вспомогательной дуги, которая периодически

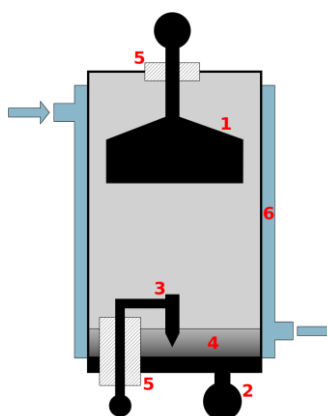


Рис. 7. Схема игнитрона. 1 – Анод, 2 – Катод, 3 – Поджигающий электрод, 4 – Ртуть, 5 – Изоляторы, 6 – Охлаждающая жидкость

появляется перед зажиганием основной дуги с помощью пропускания импульсов тока, амплитуда которых достигает нескольких десятков ампер и длительностью несколько метров в секунду сквозь поджигающий электрод, он частично опущен в жидкую ртуть катода. При изменении момента зажигания вспомогательной дуги, допускается управлять началом зажигания основной дуги, чем регулировать среднюю силу выпрямленного анодного тока от максимума до нуля. Игнитроны

производятся, как правило, в металлическом корпусе и изготавливаются на среднюю величину силы тока от 20 А до 100 кА при амплитудах напряжения на аноде, достигающих 10 кВ, и на коммутируемые мощности от 100 до 3600 кВт.

Игнитроны, имеющиеся в ИЯФ, долгое время хранились в нерабочем положении. Для приведения прибора в рабочее состояние его необходимо прогреть в течение двух часов следующим образом: погрузить колбу со ртутью (4) в охлаждающую жидкость (вода комнатной температуры), направить на анод (1) поток воздуха температурой 150-200 °С (строительный фен). Это приведет к вытеканию ртути из микротрещин вблизи анода. Вся жидкая ртуть соберётся внизу колбы.

Из-за сложностей подготовки и нестабильной работы в экспериментах с пушкой Рис. 25 было решено отказаться от игнитрона в блоке питания, так как его функции полноценно заменяет система поджига.

Система поджига

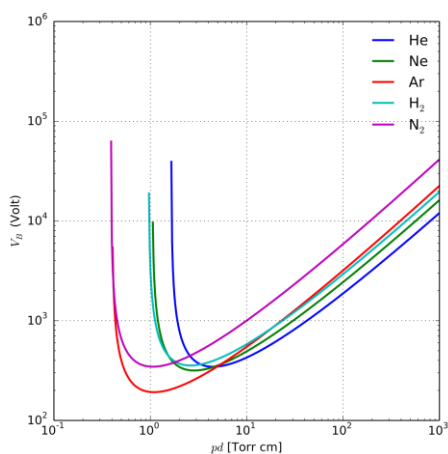


Рис. 8. Кривая Пашена.

Изначально пушка работала в режиме самостоятельного пробоя. Он описывается кривой Пашена (Рис. 8). Для фиксированного расстояния между электродами пробой достигается только при определенном сочетании давления (плотности) нейтрального газа и напряжения на электродах.

Плотность газа не должна быть слишком большой. Случайно образовавшимся свободным электронам между столкновениями с молекулами газа нужно успеть набрать кинетическую энергию за счет электрического поля между электродами. Энергия должна быть достаточно большой для ионизации атомов с которыми они сталкиваются и выбивания новых свободных электронов.

Плотность газа не должна быть слишком маленькой. Свободные электроны должны сталкиваться с атомами часто и образовывать новые заряды в большом количестве.

При работе пушки без ионитрона (при постоянном напряжении на электродах в режиме ожидания) разряд происходит самостоятельно через время ~ 800 мкс после открытия клапана, так как выполняются условия Пашена. При этом мы не можем одновременно контролировать скорость и плотность вылетающей струи. Если создать большое количество свободных электронов в нейтральном газе можно спровоцировать несамостоятельный пробой, способный происходить при более широком спектре давлений и напряжений. Для этого в плазменных установках создают систему поджига.

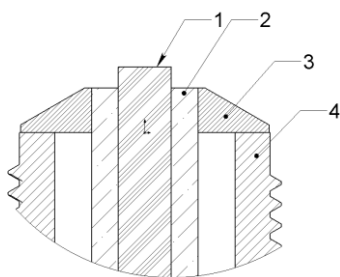


Рис. 9. Модифицированная головка свечи зажигания. 1 – центральный электрод, 2 – керамика, 3 – шайба, 4 – корпус.

В данной работе в качестве системы поджига использовалась модифицированная автомобильная свеча зажигания (Рис. 25). К корпусу свечи была приварена стальная шайба таким образом, чтобы на керамической поверхности между кромкой шайбы и центральным электродом происходил поверхностный пробой (Рис. 9) [11].

При эксплуатации твердых диэлектриков (в данном случае Al_2O_3) с высокой электрической прочностью может наблюдаться явление поверхностного пробоя, под которым понимают пробой газа вблизи поверхности твердого диэлектрика. В случае поверхностного пробоя электрическая прочность твердого диэлектрика не нарушается.

Значение поверхностного пробивного напряжения во многом определяется конфигурацией электродов, габаритными размерами и формой твердого диэлектрика. Если изолятор эксплуатируется на воздухе, то напряжение поверхностного пробоя зависит от давления, температуры, относительной влажности воздуха, частоты электрического поля. В некоторых конструкциях

напряжение поверхностного пробоя может быть даже ниже напряжения пробоя газа в тех же условиях (в нашем случае пробой происходит на промежутке ≈ 1 мм при напряжении 7 кВ даже без подачи газа). Одной из причин подобного эффекта является искажение однородности электрического поля, вызываемое перераспределением зарядов у поверхности. В результате смещения ионов по поверхности твердого диэлектрика сильно возрастает напряженность поля электродов.

Ионы и электроны, образовавшиеся в ходе поверхностного пробоя, стимулируют начало развития газового пробоя в пространстве между коаксиальными электродами, что приводит к образованию плазменной струи и её ускорению (Рис. 4).

Измерение тока на шине питания поясом Роговского

$$U_{\text{вых}}(t) = R_H I_{\text{ex}}(t) / N \quad (3)$$

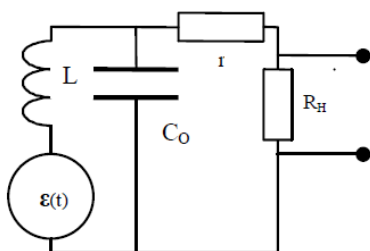


Рис. 10. Эквивалентная схема пояса Роговского в режиме трансформатора тока.

Как видно из формулы (1) ускоряющая плазму сила пропорциональна квадрату тока в контуре питания пушки, значит важно знать его зависимость от времени. Для этого на одну из шин питания был надет пояс Роговского в режиме интегрирования на собственной индуктивности (формула (3), Рис. 10, трансформатор тока).

Система запусков

- Генератор низковольтных импульсов

Цифровой прибор, позволяющий настроить запуски с точностью до 10 мкс. Имеет электрические и оптические выходы. Чувствителен к сильным наводкам от плазмы. Подключен к генератору высоковольтных импульсов через гальванические развязки.

- Генератор высоковольтных импульсов

Аналоговый прибор, запускается от генератора низковольтных импульсов, позволяет управлять силовой электроникой, не чувствителен к наводкам от плазмы.

- *Гальванические развязки*

Автотрансформаторы, блокирующие движение наводок в сторону генератора импульсов. Использовались для предохранения генератора низковольтных импульсов от электромагнитных наводок.

Зондовая диагностика



Рис. 11. ВАХ зонда Ленгмюра.

- *Ток насыщения*

Двойной ленгмюровский зонд представляет собой два электрода погруженных в плазму с фиксированной разницей потенциалов между ними. Ионы плазмы ускоряются в сторону отрицательного электрода, электроны — в сторону положительного. На вольт-амперной характеристике такой системы (Рис. 11) есть предел, начиная с которого столкновения ионов с электронами не позволяют току ионов возрастать. Этот предел называется током ионного насыщения. В наших экспериментах, в связи с большой плотностью плазмы, попытка поднять напряжение на зондах свыше 30 В приводила к возникновению дугового разряда между зондами. Поэтому работа в режиме тока ионного насыщения была невозможна.

- *Времяпролетная диагностика*

Однако по ВАХ (Рис. 11) видно, что ток через измерительное сопротивление (Рис. 13, $R=0.12 \text{ Ом}$) будет идти в любом случае кроме плавающего потенциала. Таким образом, зонды можно использовать в качестве времяпролетной диагностики.

$$v_i = \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

Где z_1, z_2 — координаты зондов, t_1, t_2 — времена появления сигнала с зондов на осциллографе.

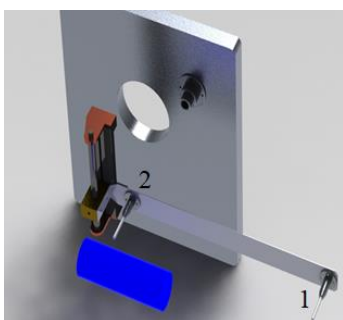


Рис. 12. Расположение зондов.

- *Расположение зондов на установке*

Электроды зондов были сделаны из танталовой проволоки толщиной 1 мм и помещены в керамическую изоляцию, из которой выступают на 1 мм. Зонды меньшей массы сгорают при дуговом разряде в плотной плазме. Они закреплены на штативе на расстоянии 34.7 см друг от друга (Рис. 12).

- *Схема питания зондов*

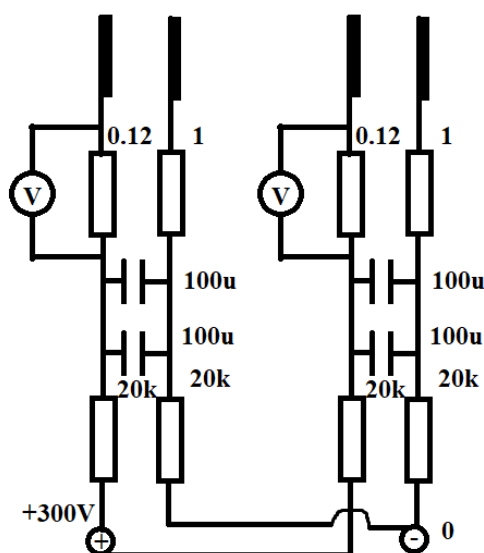


Рис. 13. Схема питания зондов.

Конденсаторы схемы (Рис. 13) заряжаются от источника постоянного напряжения до напряжения ~ 10 В через зарядные сопротивления. Все элементы схемы, кроме самих зондов находятся вне вакуумной камеры.

Трёхзеркальный интерферометр

Для оценки плотности плазмы в струе используется трёхзеркальный интерферометр (Рис. 14).

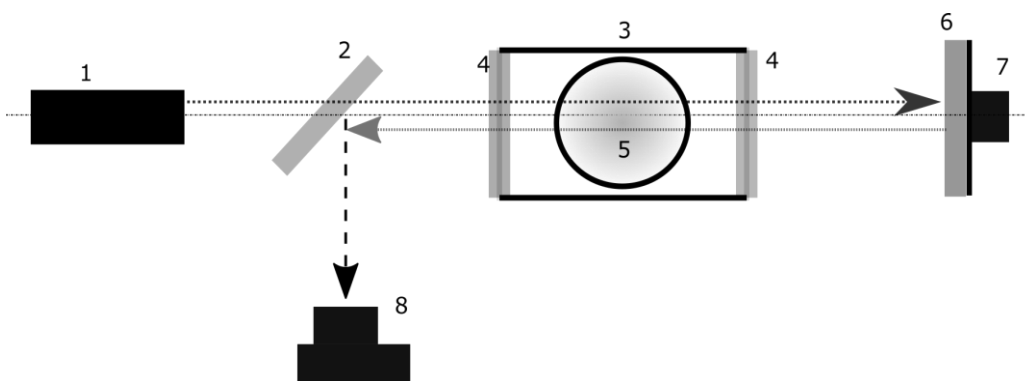


Рис. 14. Трёхзеркальный интерферометр. 1 — гелий-неоновый лазер. 2 — стеклянная плоскопараллельная пластина (отводит $\sim 10\%$ излучения). 3 — плазменная пушка. 4 — стёкла иллюминаторов. 5 — область прохождения плазмы. 6 — зеркало с пьезокорректором (7). 8 — фотоприёмный модуль. Жирными точками — свет напрямую от лазера. Сплошной серой линией — свет, прошедший через плазму. Пунктиром — свет, отраженный от плоскопараллельной пластины. Мелкими точками — оптическая ось.

Интенсивность излучения лазера определяется добротностью его резонатора, которая в свою очередь зависит от коэффициентов отражения его зеркал. В случае трёхзеркального интерферометра к лазерному резонатору добавляется дополнительный резонатор. Оптическая длина такого резонатора определяет эффективный коэффициент отражения выходного зеркала лазера за счет интерференции исходящего и возвращающегося лучей на поверхности выходного зеркала лазера. В результате, интенсивность излучения лазера оказывается модулированной изменением оптической длины дополнительно резонатора следующим образом:

$$I_{\phi} = I_l + I_3 + 2\sqrt{I_l I_3} \cos(\Delta\phi), \quad (5)$$

Где I_{ϕ} — интенсивность на фотоприемнике, I_l — интенсивность исходящего излучения лазера, I_3 — интенсивность отражённого излучения, $\Delta\phi$ — разность фаз между отраженным излучением и собственным излучением лазера, определяемая оптической длиной резонатора.

- *Распространение электромагнитных волн через плазму*

В общем случае, когда электромагнитная волна проходит через плазму, её фаза сдвигается на [5]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \left(\sqrt{1 - \frac{n(z)}{n_c}} - 1 \right) dz, \quad (6)$$

Где λ — длина волны, l — длина пути через плазму, n — фактическая локальная концентрация плазмы, n_c — критическая концентрация плазмы, при которой частота поля равна плазменной частоте:

$$n_c = \frac{\pi m c^2}{\lambda^2 e^2} \quad (7)$$

Где m — масса частиц, составляющих плазму, e — заряд электрона.

В данной работе используется излучение гелий-неонового лазера $\lambda = 630$ нм. Для электронной плазмы в данном случае критическая концентрация составляет $2.8 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Ожидаемая фактическая локальная концентрация плазмы будет на несколько порядков меньше критической ($n \ll n_c$). Предполагая, что она примерно однородна можно, преобразовать формулу (8) в следующий вид:

$$\Delta\phi \approx \frac{\pi \cdot l \cdot n}{\lambda n_c} \quad (8)$$

Где n уже является усредненной по l фактической плотностью.

В нашем эксперименте луч проходит через плазму дважды, что удваивает полный сдвиг фазы. Таким образом, при $l=5 \text{ см}$, рабочая формула имеет вид:

$$n = 5.6 \times 10^{15} \Delta\phi [\text{см}^{-3}, \text{рад}] \quad (9)$$

Разность фаз измеряется с помощью быстрого осциллографа через фильтр высоких частот. При набеге фазы меньше π сдвиг фазы можно оценить по отношению амплитуды высокочастотных колебаний интенсивности (определяется плотностью плазмы) к амплитуде низкочастотных колебаний (определяются акустическими вибрациями интерферометра). При этом во избежание насыщения интерференции важно использовать только те данные, которые сняты на линейном участке низкочастотных колебаний.

Общая схема установки

- **Вакуумная камера**

Отладка источника плазмы происходит на стенде с вакуумной камерой. Камера имеет форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами 100х50х50 см. На камере расположено 4 смотровых окна. Стенд с камерой заземлен.

Откачка ведется двумя насосами:

1. Масляный форвакуумный откачивает до давления ~ 0.1 Па
2. Турбомолекулярный откачивает до давления $\sim 10^{-4}$ Па.

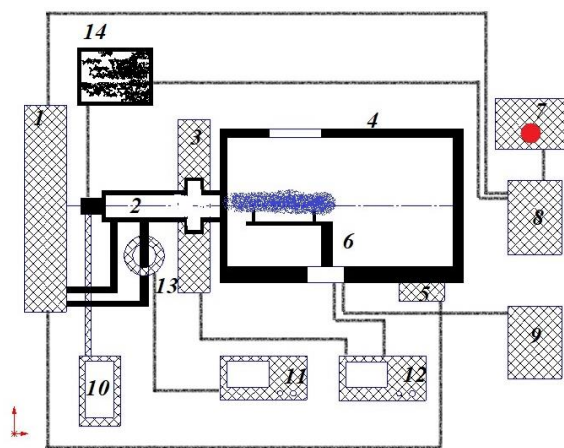


Рис. 15. Общая схема установки.

1 – блок питания пушки, 2 – плазменная пушка, 3 – интерферометр, 4 – вакуумная камера, 5 – пульт блока питания пушки, 6 – штатив с зондами, 7 – низковольтный генератор импульсов, 8 – высоковольтный генератор импульсов, 9 – бок питания зондов, 10 – бак с водородом и клапаном, 11 – осциллограф для измерения тока шины, 12 – осциллограф для измерения параметров плазмы, 13 – пояс Роговского, 14 – блок питания клапана

Последовательность запусков

Таблица 1. Последовательность запусков.

Прибор	Время запуска, мкс
Клапан водорода	50
Осциллограф 1	50
Осциллограф 2	50
Поджиг	200

Запуски клапана и осциллографов выстраивались с учетом возможностей генератора запусковых импульсов. Запуск поджига варьируется от 200 до 900 мкс в целях оптимизации параметров струи, таких как плотность и количество ускоряемых частиц.

3. Результаты измерений

График тока питания пушки

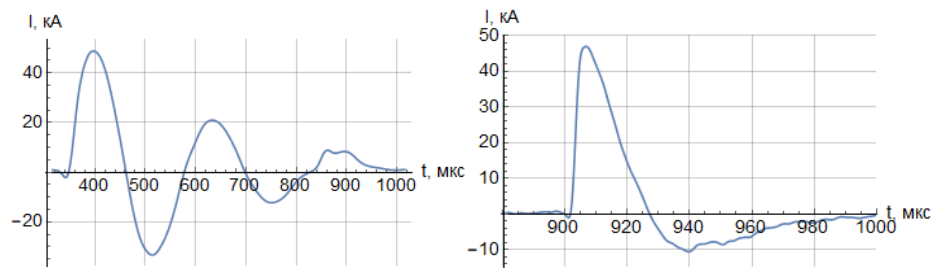


Рис. 16. Зависимость тока питания пушки от времени. Слева — с большой добротностью контура, справа — с малой.

Изначально контур питания пушки обладал большой добротностью. Из-за этого энергия конденсатора распределялась на 3 пучка плазмы (Рис. 16 справа). Когда в контур добавили шину из нержавеющей стали с сопротивлением примерно равным волновому, добротность контура сильно уменьшилась, и энергия конденсатора сосредоточилась в одной струе плазмы.

График тока питания клапана

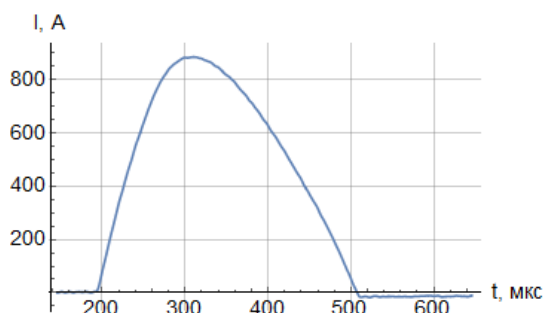


Рис. 17. Зависимость тока, бежущего через соленоид в клапане, от времени.

По пику тока на соленоиде клапана и длине газового тракта (~20 см) можно оценить минимальное время между началом работы клапана и попаданием газа в пространство между коаксиальными электродами. Это важно для определения минимального момента времени для запуска системы поджига. Из Рис. 17 видно, что для частиц летящих со скоростью 2 км/с это время составляет не менее 200 мкс.

График давления нейтрального газа на выходе из пушки

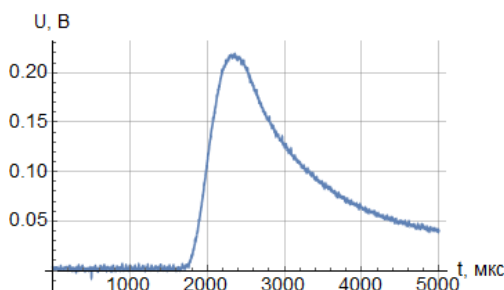


Рис. 18. Зависимость напряжения на измерительном сопротивлении ПМИ-27 от времени на выходе пушки.

На Рис. 18 представлен график выходного напряжения манометра ПМИ-27 как функция времени. Манометр был установлен на выходе пушки. Измерения производились без подачи ускоряющего напряжения и поджига разряда.

Время открытия клапана составляет ~100 мкс

Время начала выхода нейтрального газа из пушки ~1800 мкс. Оно определяется тепловой скоростью движения молекул газа и размерами пушки.

Рабочий интервал для поджига разряда в пушке составляет от 300 до 900 мкс. Нижняя граница определяется временем, за которое газ проходит расстояние от клапана до системы поджига (Рис. 25). Верхняя граница определяется временем достижения газом условий самостоятельного пробоя (Рис. 8).

Высокочастотные и низкочастотные колебания интенсивности на выходе интерферометра

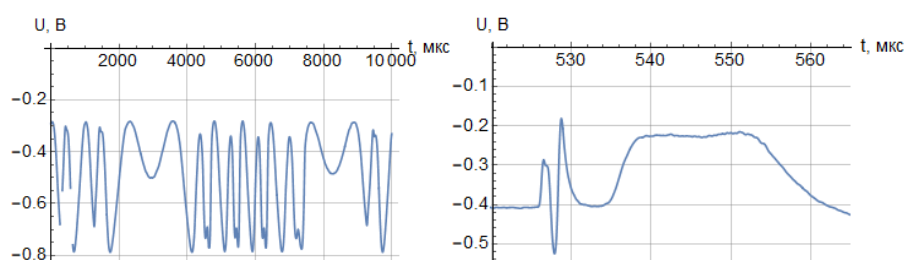


Рис. 19. Слева – колебания интенсивности лазера, вызванные механическими вибрациями амплитудой ≈ 600 мВ. Справа – колебания интенсивности лазера, вызванные прохождением света через плазму амплитудой ≈ 200 мВ.

Выстрелы для измерения плотности интерферометром не всегда попадали на линейный участок низкочастотных колебаний. Поэтому для оценки плотности использовали только наиболее подходящие случаи. По Рис. 19 видно что интерферометрия помимо амплитуды плотности позволила оценить длительность струи (~ 20 мкс). Как видно из следующих графиков, за это время плазма успевает пролететь расстояние больше размеров вакуумной камеры (~ 100 см).

Напряжение на измерительном сопротивлении схемы зондов.

Из-за большой плотности плазмы дуговой разряд между электродами начинался на ВАХ при меньшем напряжении, чем необходимо для достижения тока ионного насыщения, поэтому можно говорить только о времяпролетной диагностике скорости пучка.

На Рис. 20 изображен для наглядности именно график напряжения на измерительных сопротивлениях ($R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 1.5 \text{ Ом}$), так как ток на зонде 1 (расположен дальше от пушки) в разы меньше тока на зонде 2. По времени между максимумами на осциллограммах ($\approx 2 \text{ мкс}$) можно оценить скорость плазменной струи $v \approx 140 \text{ км/с}$.

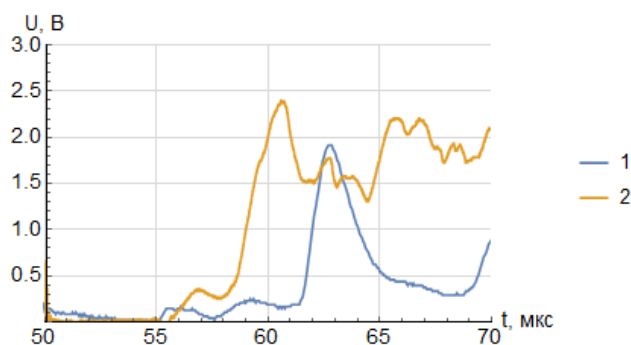


Рис. 20. Зависимость тока насыщения на зондах от времени при обычном электростатическом ускорении плазмы.

Времяпролетная диагностика по 3 точкам

Зонд 1 (Рис. 12) в ходе эксплуатации стал выдавать данные, которые мы пока не смогли интерпретировать и применить для времяпролетной диагностики. Таким образом, точки времяпролетной диагностики были выбраны по фронтам нарастания сигналов (40% от максимума) от следующих приборов:

1. Пояс Роговского на шине питания
2. Световод с диафрагмой и коллиматором, собирающий излучение плазмы через оптическое окно, находящееся в 17 см от окончания центрального электрода пушки. Излучение, собранное световодом, проходило через фотоприемник и усилительную схему интерферометра
3. Зонд 2 (Рис. 12), находящийся на расстоянии 61 см от оптического окна.

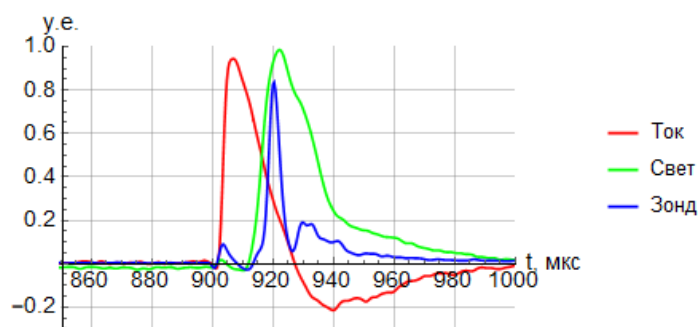


Рис. 21. Пример сигнала с времяпролетной диагностики по 3 точкам. Графики нормированы на максимум нефильтрованного сигнала.

Погрешности измерений

- *Погрешность измерительных приборов*

Основными измерительными приборами в работе являются цифровые осциллографы. Они имеют регулируемую точность измерений по напряжению и по времени.

Для измерений напряжения на сопротивлениях поясов Роговского использовался осциллограф с точностью по времени 0.4 мкс и по напряжению 0.2 В на выбранном масштабе измерений. Для остальных измерений использовались осциллографы с точностью по времени не менее 0.1 мкс.

- *Погрешность системы запуска*

Генераторы импульсов подают запусковые сигналы с точностью ~0.1 мкс.

- *Погрешность диагностик*

Точность измерений поясом Роговского ограничивается электромагнитными наводками, погрешностью изготовления измерительно сопротивления (5%) и точностью измерения сигнала осциллографом.

В схеме интерферометра 3 основных причины погрешностей: попадание сигнала на экстремум низкочастотных колебаний (такие выстрелы отбрасываются), наложение наводки от выстрела на сигнал, определяемый плотностью плазмы (такие выстрелы отбрасываются только в случае ярко выраженного наложения); систематический сдвиг измерительной схемы по времени (составляет ~100 нс) обусловленный временем срабатывания схемы детектирования и усиления сигнала излучения (фотодиод и схема усиления).

4. Анализ полученных результатов

Напуск газа

Из Рис. 18 видно, что время срабатывания клапана ~ 100 мкс. Говорить о плотности напускаемого газа сложно, так как измерения были выполнены на пределе рабочего диапазона ПМИ-27, а сам преобразователь располагался на небольшом (~ 3 см) расстоянии от выхода пушки и давление газа, приходящего на него, было ниже, чем давления газа в пушке из-за рассеяния.

Контур питания пушки

Опираясь на графики Рис. 16 и на качественный анализ выстрелов, можно сказать, что понижение добротности контура за счет введения дополнительного активного сопротивления привело к увеличению кинетической энергии струи.

Почему были отвергнуты предыдущие версии пушки?

Модель пушки [7] была отвергнута из-за совершенно неконтролируемого напуска газа и титановой пыли, а так же из-за необходимости часто разбирать пушку и досыпать титановый порошок. Сама плазма, вылетающая из этой пушки, так же была загрязнена ионами титана. Мы заменили подачу газа в ней на быстродействующий электродинамический клапан.

Модель пушки с управлением разряда через игнитрон (Рис. 24) была заменена на управляемую системой поджига на основе поверхностного пробоя на свече зажигания (Рис. 25). Причина заключалась в нестабильной работе игнитрона. Кроме того, это позволило сократить общую длину шин питания, что понизило общую индуктивность системы питания.

Плавающий потенциал

Плавающий потенциал — это точка на ВАХ (Рис. 11) зонда Ленгмюра, при которой ток ионов ($|j_i| = env_i$) на зонд равен току электронов ($|j_e| = env_e e^{-U/T_e}$) [12]. В предположении квазинейтральности

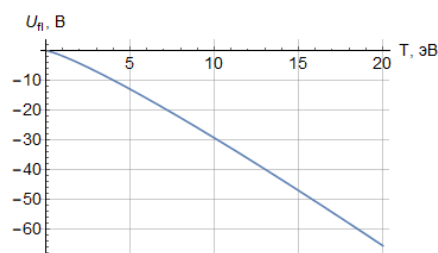


Рис. 22. Зависимость плавающего потенциала от температуры электронов

плазмы и того, что движение электронов преимущественно тепловое, а скорость ионов преимущественно поступательная и по оценкам экспериментов составляет $v_i \sim 100$ км/с, можно построить зависимость плавающего потенциала зондов от температуры электронов

$$U_{fl}(T_e) = T_e \ln \frac{v_i}{\sqrt{2eT_e/m_e}}.$$

Таким образом, зная, что ток ионного насыщения не достигался при напряжении 30 В, по Рис. 22, можно сказать, что в нашей струе температура электронов составляет не менее 10 эВ.

Анализ результатов времяпролетной диагностики по 3 точкам

По данным времяпролетной диагностики по 3 точкам была оценена скорость струи и время ускорения плазмы (Таблица 2).

Таблица 2. Результаты обработки измерений времяпролетной диагностики по 3 точкам

№	1	4	7	8	9	11	13	14
U, кВ	3	4	5	5	6	6	7	7
I, кА	47	57	69	68	68	79	87	88
T _{ускор} , мкс	12	9.9	8.3	8.7	8.3	3.9	3.9	3
v, км/с	250	375	375	375	375	100	100	94

Постоянная скорость была найдена из отношения расстояния между 3 и 2 времяпролетными датчиками к времени между фронтами сигнала на них.

Время ускорения T_{ускор} было найдено вычитанием отношения расстояния между концом центрального электрода и световодом к постоянной скорости из времени между 2 и 1 точкой времяпролетной диагностики.

По Таблица 2 видно, что при повышении тока до 70 кА скорость струи нарастает, а время ускорения медленно падает, но при токе более 79 кА, скорость резко падает.

Точная причина падения скорости при больших токах неясна. Предположительная причина уменьшения скорости при больших токах в том, что из электродов начинает выбиваться большое количество ионов металла (Рис. 23). Это увеличивает общую массу ускоряемого вещества и уменьшает скорость струи. Аналогичное загрязнение плазмы наблюдалось в работе [13].

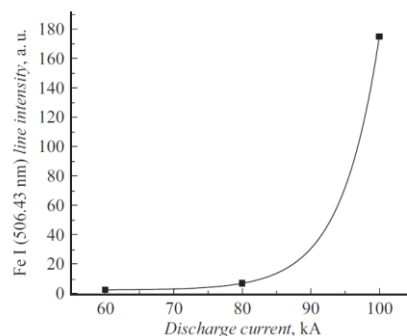


Рис. 23. Зависимость интенсивности спектральных линий железа в плазме от тока разряда. Взято из [13].

Оптимизация длительности разряда

По таблице 2 так же видно, что время ускорения основной части струи составляет ~10 мкс. Из этого следует, что время разряда конденсатора в контуре питания пушки необходимо свести к 10 мкс для повышения энергетической эффективности выстрелов. Если длительность разряда превышает время ускорения, энергия, запасенная в конденсаторе, расходуется на ускорение всё новых порций газа, приходящих из клапана.

Энергия струи

Опираясь на данные из таблицы 2, можно сказать, что при разрядном токе в пушке 60 – 70 кА скорость фронта струи составляет 375 ± 25 км/с. Это соответствует энергии отдельно взятого иона водорода ≈ 750 эВ. Согласно формуле (9) и данным Рис. 19 плотность струи плазмы $(3 \pm 1.5) \times 10^{15}$ см⁻³. Давление струи с такими параметрами соответствует давлению магнитного поля с индукцией $B \approx 1.3$ Тл.

3. Заключение

Описание результатов проделанной работы

В результате работы модернизирован и подготовлен к работе источник плазмы с большой кинетической энергией на основе пушки Маршала. Подготовлен ряд диагностик для оценки параметров источника. Согласно результатам измерений, плазма из источника обладает направленной скоростью до 375 км/с и с плотностью $\sim 3 \times 10^{15}$ см⁻³. Такой плотности кинетической энергией достаточной для поперечной инжекции плазмы в ГДЛ в область, где индукция магнитного поля ~ 1 Тл.

Новизна

Впервые создан работающий прототип инжектора плазменной струи с высокой кинетической энергией для проведения экспериментов на установке ГДЛ. Найдены оптимальные значения основных параметров разряда: длительности и силы тока.

Научные выводы

В ходе работы было выяснено, что источник плазменной струи с большой кинетической энергией на основе пушки Маршала может быть использован для инжекции плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией более 1.3 Тл. Что говорит о возможности использования его для управления плотностью плазмы на установке ГДЛ.

4. Библиографический список

- [1] Иванов А.А., Приходько В.В., «Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы,» *Успехи физических наук*, pp. 547-574, 2017.
- [2] A. V. Voronin, K. G. Hellblom², «Generation of dense plasma clusters with high velocity,» *IOPscience*, 2001.
- [3] T. Matsumoto, «Development of a magnetized coaxial plasma gun for compact toroid injection into the C-2 field-reversed configuration device.,» *Rev Sci Instrum*, № May, 2016.
- [4] T. M. T. Asai, «Compact toroid injection fueling in a large field-reversed configuration,» *IOP*, № May, 2017.
- [5] А.В. Воронин, В.К. Гусев, Я.А. Герасименко, Ю.В. Судьенков, «Измерение параметров плазменной струи в процессе облучения,» *Журнал технической физики*, pp. 36-42, 2013.
- [6] F. J. Wessel, «Propagation of neutralized plasma beams,» *Physics of Fluids*, № 25, 1990.
- [7] Атлуханов М.Г., «Плазменная пушка,» Новосибирск, 2010.
- [8] К. Б. Абрамова. А. В. Воронин, «ИНЖЕКЦИЯ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ В СФЕРИЧЕСКИЙ ТОКАМАК ГЛОБУС-М,» *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2005.
- [9] Л. Н. Вячеславов, «Лабораторный практикум. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.,» в *Электрические цепи*, Новосибирск, 2008, pp. 73-85.
- [10] *ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПМИ-27. Техническое описание и инструкция по эксплуатации..*

- [11] НИУМЭИ, «Пробой твердых диэлектриков» [В Интернете].
Available: <http://ctl.mpei.ru/DocHandler.aspx?p=pubs/phd/3.3.htm>.
- [12] А. Судников, Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1, 2017.
- [13] А. В. Воронин, «Разработка источника для подачи топлива в центральную зону термоядерного реактора,» *Журнал технической физики*, т. 88, № 5, pp. 692-695, 2018.

5. Приложения

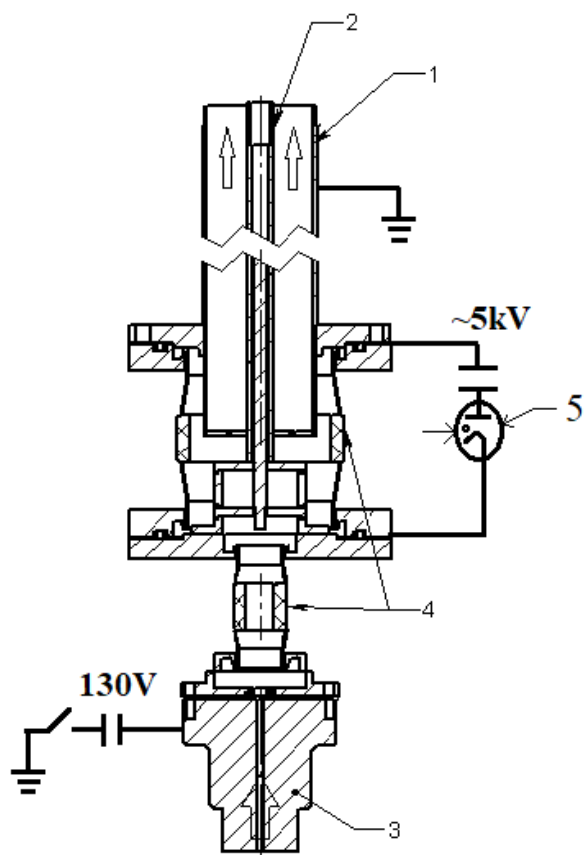


Рис. 24. Чертеж плазменной пушки 2017 года. 1 – внешний электрод (дуло), 2 – внутренний электрод, 3 – электромагнитный клапан, 4 – керамические изоляторы, 5 – игнитрон.

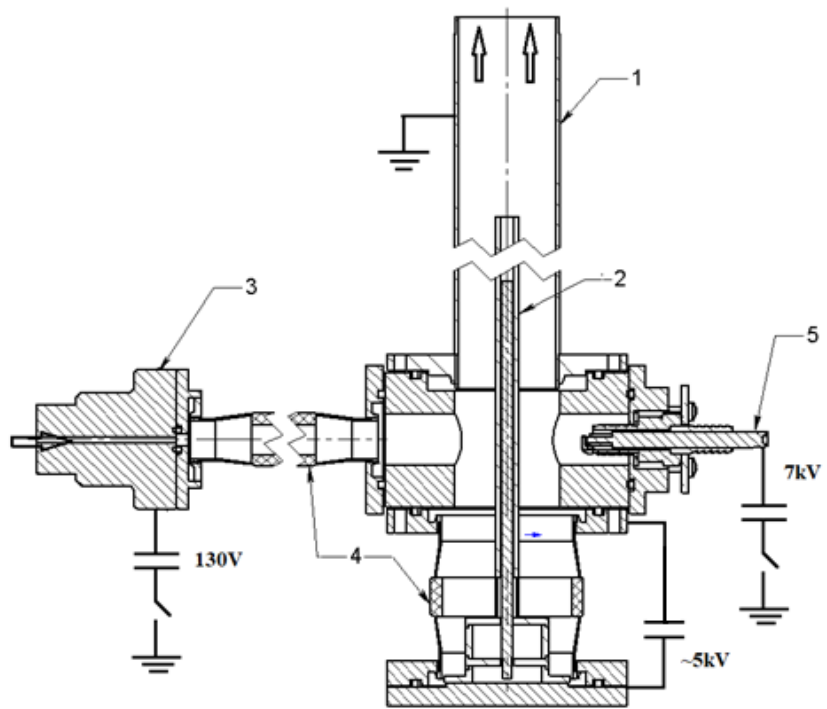


Рис. 25. Чертеж плазменной пушки апрель 2018 года. 1 – внешний электрод (дуло), 2 – внутренний электрод, 3 – электромагнитный клапан, 4 – керамические изоляторы, 5 – система поджига.