

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 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 **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Асмедьянов Никита Равильевич

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы **ИСТОЧНИК ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ БОЛЬШОГО ДАВЛЕНИЯ**

«К защите допущена»
Заведующий кафедрой
Беклемишев Алексей Дмитриевич
ученая степень, звание
к.ф.-м.н.
должность, место работы
Научный сотрудник ИЯФ СО РАН
...../
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

Научный руководитель
Багрянский Петр Андреевич
ученая степень, звание
д.ф.-м.н.
должность, место работы
Заведующий лабораторией 9-1 ИЯФ СО РАН
...../
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....» июня 2020г.

«.....» июня 2020г.

Дата защиты: «16» июня 2020г.

Новосибирск, 2020

Оглавление

1.	Введение	4
2.	Литературный обзор.....	11
3.	Математическая модель.....	13
3.1	Принцип действия плазменной пушки	13
3.2	Эволюция плазменной пушки.....	14
3.3	Численное моделирование цикла работы источника плазмы	16
3.4	Численное моделирование электрического поля источника.....	22
4.	Техническое описание установки	25
4.1	Система подачи газа.....	25
4.1.1	Требования к системе подачи газа	25
4.1.2	Принцип действия электромагнитного клапана.....	26
4.1.3	Разработка системы подачи газа	27
4.1.4	Измерение тока питания клапана поясом Роговского.	28
4.1.5	ПМИ: чертёж, принцип действия и схема подключения.....	29
4.2	Блок питания пушки	30
4.2.1	Общая схема	30
4.2.2	Вакуумный разрядник	31
4.3	Измерение тока на шине питания поясом Роговского	31
4.4	Система запусков	33
4.4.1	Генератор оптических импульсов.....	33
4.4.2	Генератор высоковольтных импульсов	33
4.4.3	Оптические развязки.....	34
5.	Диагностики	34
5.1	Зондовая диагностика	34
5.1.1	Схема питания зондов	35
5.1.2	Ток насыщения.....	35

5.1.3	Времяпролетная диагностика	36
5.1.4	Расположение зондов на установке	36
5.2	Оптические диагностики	37
5.2.1	Распространение электромагнитных волн через плазму	37
5.2.2	Схема интерферометра Майкельсона	38
5.3	Общая схема установки	39
6.	Результаты измерений.....	41
6.1	График тока питания пушки	41
6.2	График тока питания клапана	42
6.3	График давления нейтрального газа	43
6.4	Показания интерферометра.....	45
6.5	Времяпролетная диагностика по 3 точкам	46
6.6	Погрешности измерений	47
6.6.1	Погрешность измерительных приборов	47
6.6.2	Погрешность системы запуска	47
6.6.3	Погрешность диагностик	48
7.	Анализ полученных результатов.....	48
7.1	Анализ тока питания пушки.....	48
7.2	Анализ напуска газа	49
7.3	Анализ данных интерферометра	50
7.4	Давление и энергия струи.....	52
7.5	Анализ элементарного состава плазмы.....	53
8.	Заключение.....	56
9.	Библиографический список.....	57

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.

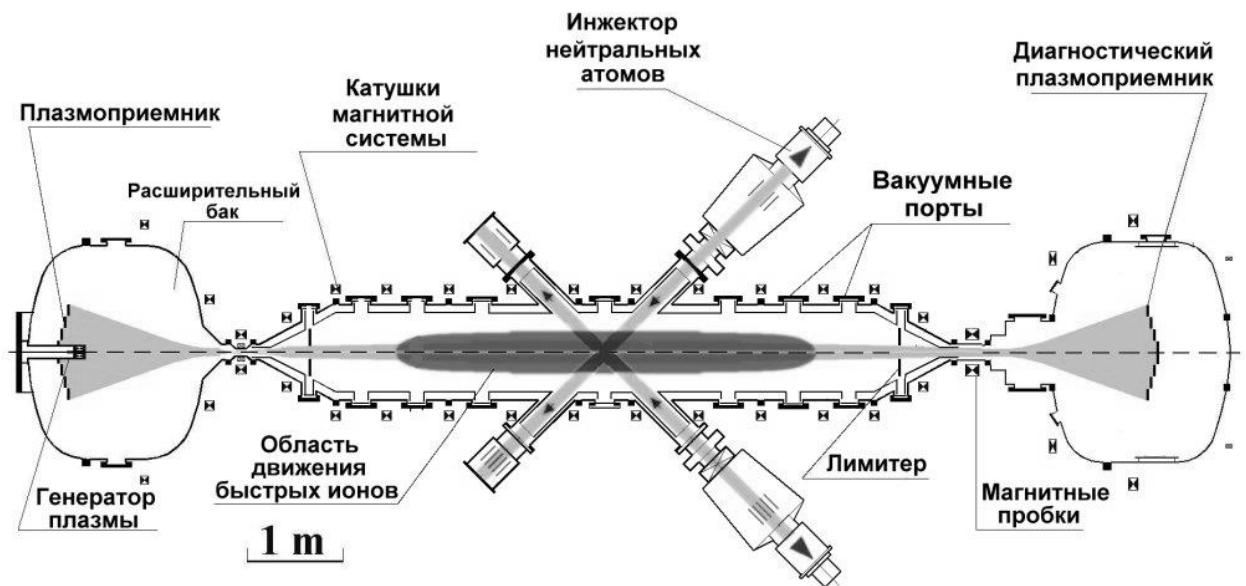


Рис. 1. Схема газодинамической ловушки (ГДЛ).

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. 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 материального 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 баланса 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 (пеллет).
- 3) *Инжекторы нейтральных атомов* (Рис. 1) — один из способов поддержания плотности частиц и нагрева плазмы, используемых на данный момент. Инжекторы являются весьма сложными в производстве и эксплуатации устройствами. К тому же атомарные инжекторы практически не в состоянии обеспечить поток нейтралов с эквивалентным током диапазона нескольких килоампер, что, согласно расчетам, требуется для обеспечения стационарных условий в системах реакторного класса на основе магнитных ловушек открытого типа.
- 4) *Плазменная пушка для пучков с небольшой кинетической энергией вдоль силовых линий магнитного поля* (генератор плазмы Рис. 1) позволяет ввести теплую газоразрядную 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 позволяют формировать плазменные струи с плотностью $\sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и скоростью $\sim 100 \text{ км/с}$. В дальнейшем будут рассматриваться именно они, так как лучше всего подходят для поперечной инъекции плазмы.

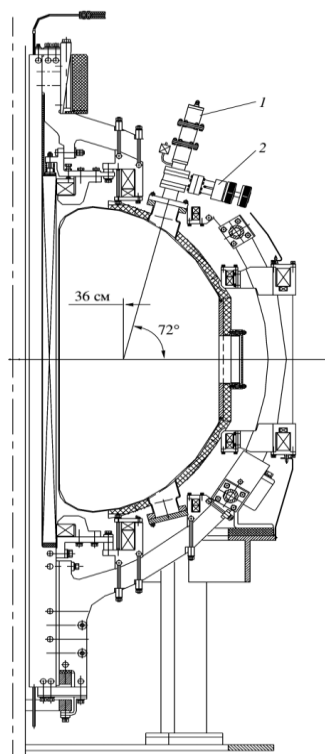


Рис. 2. Расположение источника плазмы (1) на установке Глобус-М.

В данной работе рассмотрен источник плазмы на основе импульсного ускорителя — пушки Маршалла. Этот источник планируется использоваться для поддержания материального баланса мишенной плазмы при больших временах удержания в ловушке путем инъекции плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Инъекция 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, С2-В [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 $\sim 30 \text{ км/с}$ и

одинаковой плотности водородной плазмы $\sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$ 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 давления струи плазмы ($P_{\text{стр}} = \rho v^2$) и эффективного давления магнитного поля ($P_{\text{маг}} = B^2/8\pi$) [6]. Зависимость механизмов взаимодействия плазмы с магнитным полем от этого критерия представлена в таблице 1.

Таблица 1. Механизмы взаимодействия струи плазмы с магнитным полем

Соотношение давлений	Механизм взаимодействия
$P_{\text{маг}} \ll P_{\text{стр}}$	Плазма продавливает магнитное поле продолжая движение поперек силовых линий
$P_{\text{маг}} \geq P_{\text{стр}}$	Заряды разных знаков в инжектируемой плазме расходятся под действием силы Лоренца в разные стороны. В струе возникает собственное электрическое поле \mathbf{E} , направленное перпендикулярно магнитному полю и вектору скорости струи. Под действием $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$ -дрейфа струя продолжает движение поперек силовых линий магнитного поля.
$P_{\text{маг}} \gg P_{\text{стр}}$	Энергии струи 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 давление струи плазмы должно превышать $B^2/8\pi$ в точке инжекции.

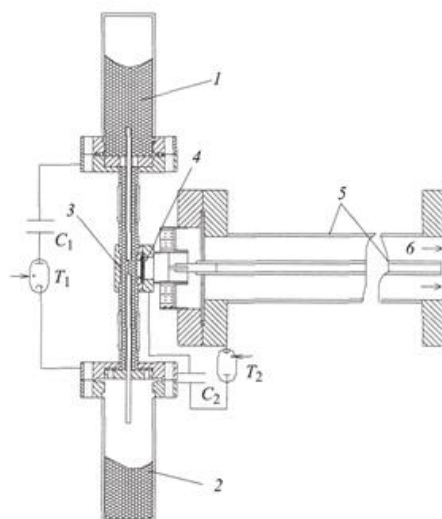


Рис. 3. Двухступенчатый источник плотной плазмы. 1, 2 — электроды первой ступени. 3 — зона разряда первой ступени, 4 — защитная сетка, 5, 6 — коаксиальные электроды второй ступени.

На момент начала данной работы в ИЯФ уже существовал прототип источника плазмы аналогичного описанному в [2]. В этом источнике (Рис. 3) водород, полученный путем электрического разряда в порошке TiH_2 , 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 инъекции, 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 и оптимизация плазменной пушки для инъекции плазмы поперёк магнитного поля газодинамической ловушки. Для этой цели также необходима разработка

системы диагностики параметров струи плазмы и системы питания плазменной пушки.

Требуемое давление плазменной струи оценивается из того условия, что оно должно превышать давление магнитного поля в ГДЛ в области, где величина индукции магнитного поля составляет ~ 1 Тл. Давление такого поля:

$$P_{\text{маг}} = \frac{B^2}{2\mu_0} \approx 3,8 \times 10^5 \text{ Па} = 3,8 \text{ бар} \quad (1)$$

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

Таблица 2. Параметры и диагностики

Параметр	Диагностика
Скорость	Времяпролетная диагностика: луч интерферометра и 4 двойных ленгмюровских зонда, расположенных на фиксированном расстоянии
Токи	Пояс Роговского
Напряжения	Делители напряжения
Плотность	Интерферометр Майкельсона
Химический состав	Сканирующий электронный микроскоп

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, генерировала плазму, загрязненную ионами титана, а также требовала постоянной разгерметизации камеры для перезарядки порошка TiH_2 . **Практической частью данной работы является модернизация предоставленной плазменной пушки, исправление имеющихся недостатков, отладка методов контроля и диагностики параметров пушки и плазменной струи.**

В ходе первых 3 лет работы были опробованы разные версии источников плазменной струи с похожим принципом действия. В источниках менялась геометрия подачи газа в разрядный промежуток, система питания и система управления. Особенностью предыдущих версий было наличие изолятора между электродами, открытого плазме. Вероятность пробоя и горения разряда на поверхности такого изолятора была очень велика. Пробой по поверхности изолятора был виден невооруженным глазом, как и напыление на изоляторе от него. Это могло влиять на механизм ускорения плазмы и давление плазменной струи, контролируемость разряда, чистоту плазмы и электрическую безопасность установки. В ходе последней разработки эти факторы были учтены. Также была создана более безопасная и простая система подачи газа на основе стандартных промышленных деталей.

2. 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 статьях [8] и [9] рассматриваются различные способы поддержания материального баланса для токамака Глобус-М, такие как: системы импульсной подачи рабочего газа в токамак, пневматические легко-газовые 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 и в данной работе (см. п. 3.1), и подача газа в разрядную область осуществляется электрическим разрядом в гидриде титана. Автор протестировал пушку с различными параметрами (длина ствола, 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 C2-W под действием поперечной инжекции плазмы.

В ИЯФ СОРАН также 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 также 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.

Большой опыт работы с источниками плазмы высокого давления имеют сотрудники ТРИНИТИ [10]. Их источники создают плазменную струю большой скорости (~ 300 км/с) и высокой концентрации ($\sim 10^{22}$ м⁻³). Однако эти источники избыточны по количеству инжестируемой плазмы, имеют большие размеры и стоимость изготовления.

Таким образом, можно сказать, что по теме создания источника плазменной струи большого давления было проведено большое количество исследовательских работ. При создании источника плазменной струи в данной работе был учтен существующий опыт в создании самих плазменных пушек и диагностик для них.

3. Математическая модель

3.1 Принцип действия плазменной пушки

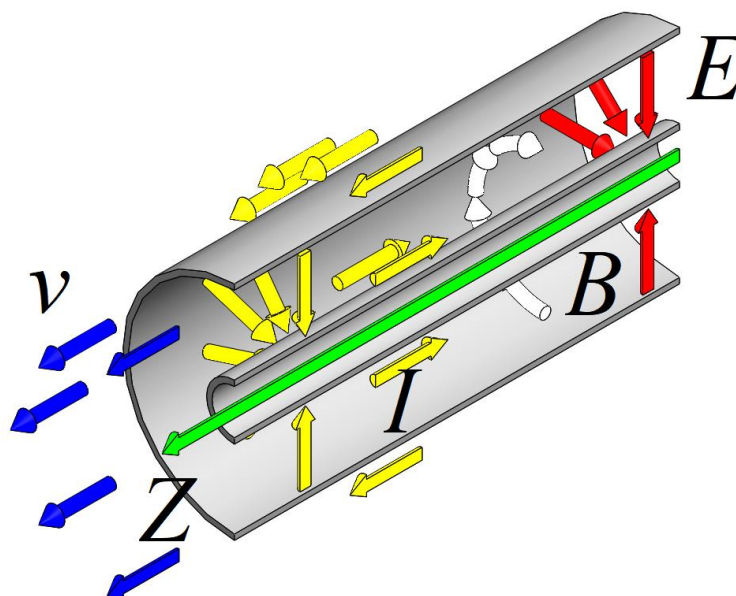


Рис. 4. Принцип действия пушки Маршалла. Цвета стрелок: желтый — ток (I), белый — магнитное поле (B), красный — электрическое поле (E), синий — скорость направленного движения плазмы (v), зеленый — направление оси пушки (Z).

В пространство между двумя коаксиальными (Рис. 4) электродами подается нейтральный газ (в используемом источнике это водород), затем к разрядному промежутку прикладывается разность потенциалов несколько киловольт, в газе начинается электрический разряд.

Напряжение на электродах заставляет частицы двигаться в направлении, соответствующем их заряду. Возникший радиальный 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. В простой модели описанной в [11] сила зависит от параметров системы следующим образом:

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

где I — ток разряда; L - индуктивность коаксиальных электродов. Сила действует вдоль оси Z в направлении градиента индуктивности пушки к

удаленному торцу коаксиальных электродов независимо от направления тока. Скорость плазменного пучка в таком ускорителе может быть определена из выражения [8]:

$$v = \sqrt[4]{\frac{4 L_z U_0^2 z^2}{3 \rho_0 S L_0^2}}, \quad (3)$$

где L_0 — индуктивность внешнего контура, L_z — удельная индуктивность коаксиальных электродов, U_0 — начальное напряжение на конденсаторах, S — площадь кольца между электродами, ρ_0 — плотность ускоряемого вещества.

3.2 Эволюция плазменной пушки

Начальная модель пушки Маршалла (Версия 0, Рис. 3) состояла из двух ступеней электродов: первая генерировала водород разрядом в гидриде титана, вторая ускоряла этот водород. Такая система не позволяла регулировать количество напускаемого газа. Полученная плазма была загрязнена ионами титана и было сложно работать с порошком гидрида титана

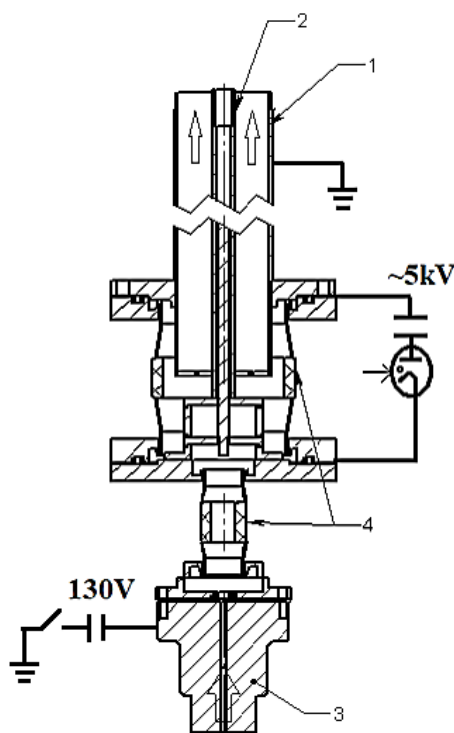


Рис. 5. Схема первой модификации пушки Маршалла (версия 1). 1 — внешний электрод (катод), 2 — внутренний электрод (анод), 3 — газовый клапан разработки ИЯФ СО РАН, 4 — керамические изоляторы.

В следующих версиях было решено отказаться от гидрида титана в пользу электромагнитного клапана. Пушка по-прежнему ускоряла плазму с малой эффективностью, также были замечены следы эрозии на изоляторе и прилегающих участках электродов. После обсуждения этого с коллегами из Тринити было решено, что малая эффективность вызвана горением разряда на поверхности изолятора (4 на Рис. 5).

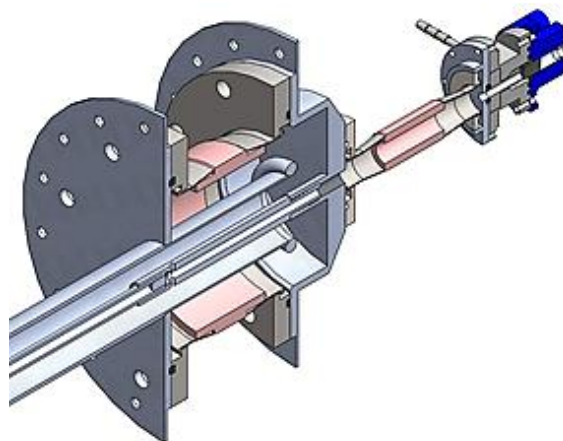


Рис. 6. Текущая модификация плазменной пушки (версия 2). Напуск газа через центральный электрод. Изолятор закрыт от разрядного промежутка. Клапан на основе форсунки GEMINI

В следующей модификации (Рис. 6) было решено закрыть изолятор от плотной плазмы в разрядном промежутке и инжектировать газ через центральный электрод непосредственно в разрядный промежуток. Однако сделать это можно только через длинный газовый канал, сильно замедляющий напуск газа. Для более эффективного горения разряда и ускорения плазмы требуется напускать газ как можно быстрее (см. п 7.1). В запланированной модели (Рис. 7) газ будет инжектироваться через внешний электрод по короткому каналу, что уменьшит количество деталей, размеры пушки и время напуска газа. Также это позволит сделать газовый клапан заземленным и электрически безопасным.

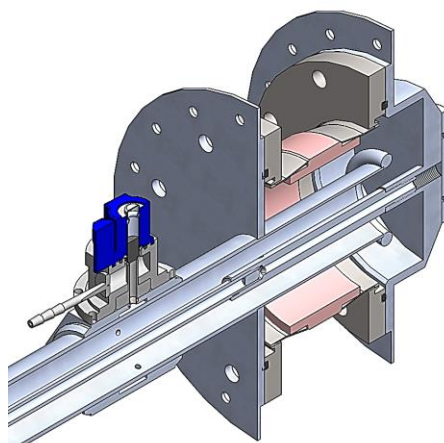


Рис. 7. Запланированная модификация плазменной пушки. Напуск газа через внешний электрод.

Каждая следующая модель отличалась параметрами плазмы. Сравнение моделей приведено в таблице 3

Таблица 3. Сравнение параметров разных моделей пушки

Модель	Ток, кА	Скорость, км/с	Плотность, 10^{15} см^{-3}	Давление, бар
Версия 1.0	60	150	3.0	1.08
Версия 1.1	80	120	1.0	0.23
Версия 2.0	100	200	2.6	1.6
ТАЕ	130	100	3.0	0.48

Также в Таблица 3 приведен пример аналогичной пушки из ТАЕ [12]. Видно, что текущая версия пушки дает большее давление при меньшем токе питания чем пушка ТАЕ.

3.3 Численное моделирование цикла работы источника плазмы

Рассмотрим тонкую не растекающуюся газовую перемычку в коаксиальной системе электродов [13]. К системе также подключен заряженный конденсатор. Конденсатор разряжается, ускоряя перемычку по принципу,

указанному в п. 3.1. В данной работе использованы следующие параметры (Таблица 4):

Таблица 4. Параметры моделирования пушки

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Количество ускоряемых частиц	N_0	10^{19}	частицы
Емкость конденсатора	C_0	150	мкФ
Начальное напряжение на конденсаторе	U_0	5	кВ
Индуктивность системы питания	L_0	270	нГн
Радиус внешнего электрода	R_{out}	2.1	см
Радиус внутреннего электрода	R_{in}	0.5	см
Масса ускоряемых частиц	m_p	1.67×10^{-27}	кг
Длина электродов	L	1	м

Так как в модели геометрия электродов не зависит от координаты вдоль оси симметрии Z (см. Рис. 4), а масса ускоряемого вещества не меняется, можно ввести следующие постоянные величины:

Таблица 5. Промежуточные параметры пушки

Величина	Формула	Значение	Размерность
Масса ускоряемого вещества	$m_0 = m_p N_0$	1.67×10^{-8}	кг
Погонная индуктивность электродов	$b = \mu_0 \ln(R_{out}/R_{in})/2\pi$	2.87×10^{-7}	Гн/м
Собственная частота контура	$\omega_0 = (L_0 C_0)^{-1/2}$	1.57×10^5	c^{-1}
Коэффициент Арцимовича [13]	$q = b^2 C_0^2 U_0^2 / (2m_0 L_0)$	5.04	-

Коэффициент Арцимовича показывает отношение сил магнитного давления к силам инерции ускоряемой перемычки.

В модели изучается эволюция следующих параметров источника плазмы (Таблица 6):

Таблица 6. Моделируемые параметры и размерности

Параметр	Обозначение	Размерность
Координата перемычки по оси симметрии электродов	z	м
Скорость перемычки по оси симметрии электродов	v	м/с
Ток по электродам	I	А
Напряжение на электродах	U	В

Для составления уравнений использовался II закон Ньютона, II закон Кирхгофа, закон Фарадея и определяющие равенства емкости и индуктивности. Вместе их называют уравнениями Арцимовича. С целью упрощения уравнений для численного моделирования величины были обезразмерены с использованием следующих нормировок (Таблица 7):

Таблица 7. Нормировки моделируемых параметров

Величина	Нормировка
Время	$\tau = t (L_0 C_0)^{-1/2}$
Координата	$y = b z / L_0$
Скорость	$y' = b (C_0 / L_0)^{1/2} v$
Напряжение	$\phi = U / U_0$
Ток	$\phi' = I / (C_0 U_0 \omega_0)$

Принято также, что движение начинается из начала координат, с нулевой скоростью и нулевым током. Таким образом, уравнения Арцимовича принимают следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy'}{d\tau} = q \phi'^2 \\ \frac{dy}{d\tau} = y' \\ \frac{d\phi}{d\tau} = -\phi' \\ \frac{d}{d\tau} [(1 + y)\phi'] - \phi = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Здесь указаны соответственно: уравнение движения, уравнение скорости уравнена тока, уравнение напряжения.

Для этих уравнений используются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ y'(0) = 0 \\ \phi'(0) = 0 \\ \phi(0) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения решались в программном пакете Wolfram Mathematica. В итоге моделирования были получены следующие результаты (смотри с Рис. 8 по Рис. 11):

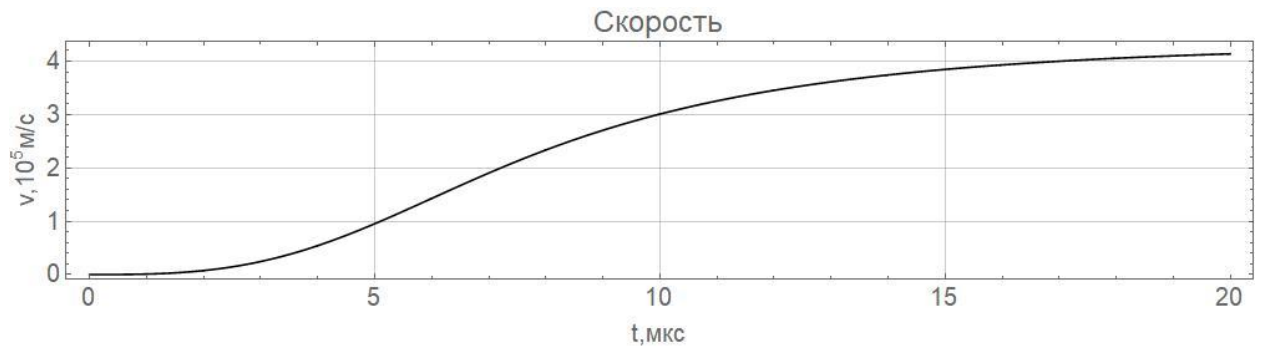


Рис. 8. Эволюция скорости перемычки v_z

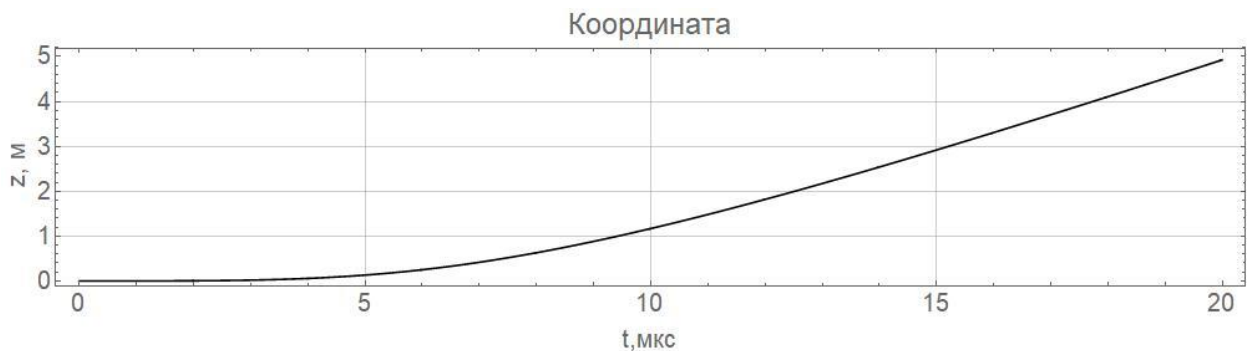


Рис. 9. Эволюция координаты перемычки Z

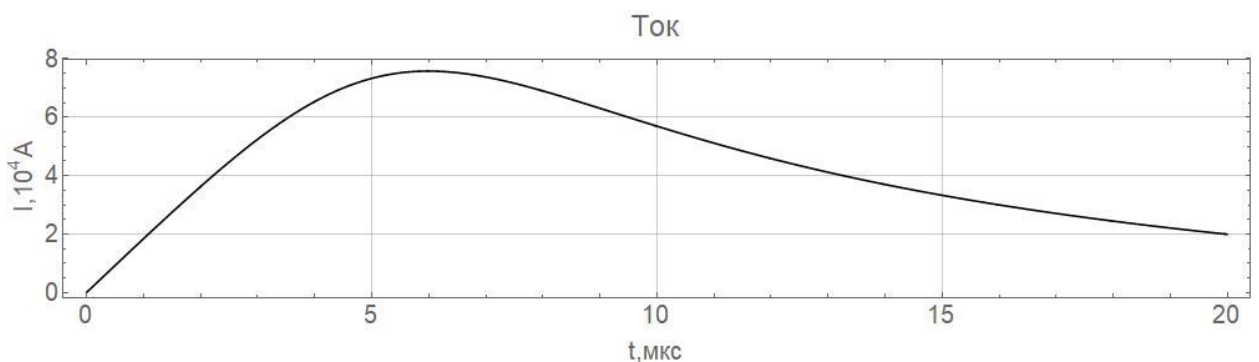


Рис. 10. Эволюция тока питания

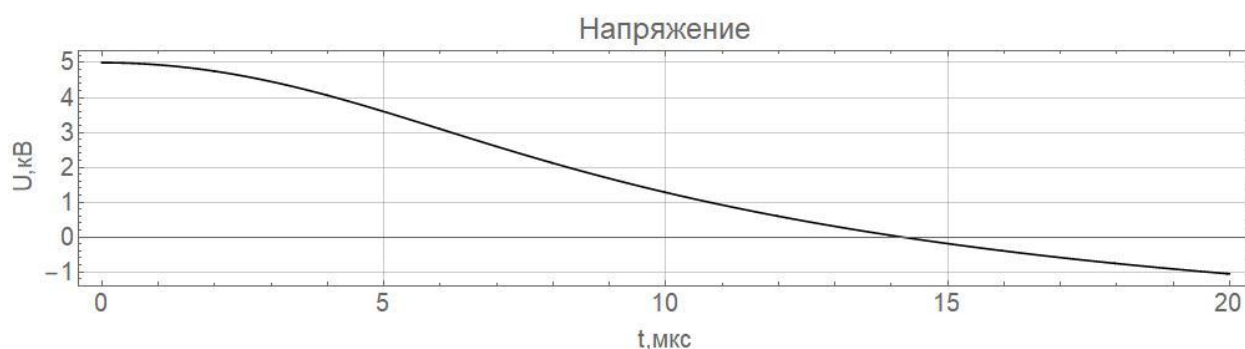


Рис. 11. Эволюция напряжения питания

Варьируя параметры модели, удалось подобрать оптимальную по КПД на выходе источника длину электродов и емкость конденсаторов. Также были оценены и другие параметры ускорителя:

Таблица 8. Параметры разряда при максимальном значении тока

Время максимума тока	6	мкс
Скорость на максимуме тока	143	км/с
Координата на максимуме тока	25	см
Напряжение на максимуме тока	3	кВ
Ток на максимуме тока	76	кА
КПД на максимуме тока	9	%

Таблица 9. Параметры разряда на выходе из пушки

Время вылета из пушки	8.3	мкс
Скорость на конце пушки	245	км/с
Координата на конце пушки	70	см
Напряжение на конце пушки	2	кВ
Ток на конце пушки	67	кА
КПД на конце пушки	27	%

Таблица 10. Энергетические параметры разряда

Полная энергия системы	1875	Дж
Остаточная энергия системы в момент максимума тока	721	Дж
Полная индуктивность системы в максимуме тока	3.41×10^7	Гн
Полная энергия магнитного поля в момент максимума тока	981	Дж
Энергия в магнитном поле пушки в момент максимума тока	205	Дж
Энергия в магнитном поле системы питания в момент максимума тока	775	Дж
Доля энергии магнитного поля в момент максимума тока	85	%
Доля кинетической энергии в конце пушки	32	%

По данным численного моделирования сделаны выводы о модернизации параметров источника плазмы и его системы питания. При сохраненной погонной индуктивности были изменены следующие параметры установки (Таблица 11):

Таблица 11. Изменения внесенные входе моделирования

Параметр	Было	Стало	Выполненные работы	Результаты
Емкость системы питания	300 мкФ	150 мкФ	Уменьшение количества конденсаторов	Увеличение КПД
Индуктивность системы питания	270 нГн	173 нГн	Переход на многожильную систему шин	Увеличение КПД
Длина пушки	30 см	100 см	Изготовление новых электродов	Увеличение выходной скорости плазмы

3.4 Численное моделирование электрического поля источника

Для контроля режима работы источника необходимо знать в каких местах вероятнее всего будет начинаться и протекать пробой рабочего газа. В соответствии с законом Пашена вероятность пробоя определяется давлением газа, геометрией системы и модулем напряженности электрического поля.

В случае некорректной работы источника пробой может протекать на поверхности изолятора между электродами. При этом плазма не ускоряется. Вероятность пробоя по поверхности диэлектрика определяется касательной к его поверхности компонентой электрического поля (тангенциальная составляющая).

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. 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.

Источник необходимо сконструировать так, чтобы вероятность пробоя по поверхности изолятора [14] была много меньше вероятности пробоя в газе. Для этого в программе SolidWorks были построены модели распределения модуля электрического поля и его тангенциальной составляющей. Модели представлены с Рис. 12 по Рис. 15.

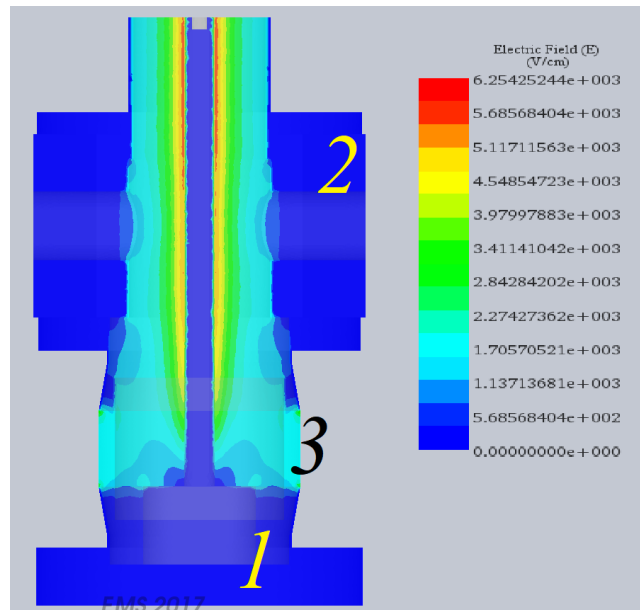


Рис. 12. Распределение модуля электрического поля в первоначальной конструкции источника. 1 — внутренний электрод, 2 — внешний электрод, 3 — керамический изолятор

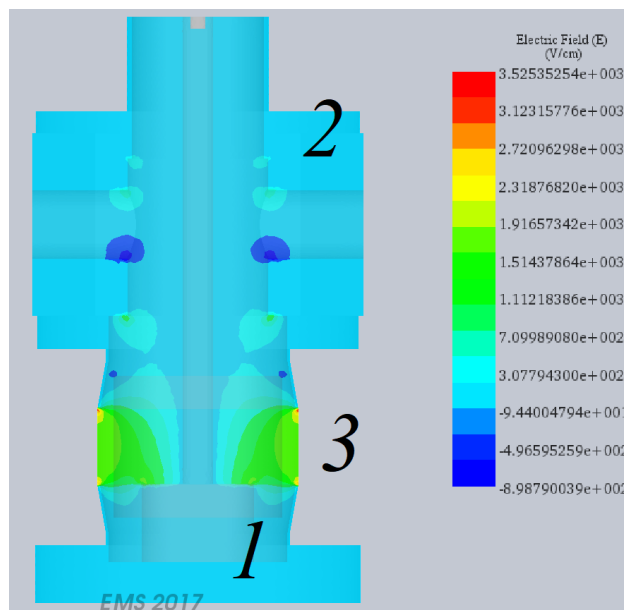


Рис. 13. Распределение тангенциальной компоненты электрического поля в первоначальной конструкции источника. 1 — внутренний электрод, 2 — внешний электрод, 3 — керамический изолятор

На Рис. 12 видно, что в версии пушки, изображенной на Рис. 5, модуль напряжённости электрического поля E сосредоточен в разрядном промежутке у центрального электрода. Однако из Рис. 13 видно, что у поверхности керамического изолятора и внутри него большое увеличение тангенциальной составляющей поля (Рис. 13), таким образом, отношение модуля поля в разрядном промежутке к полю на поверхности изолятора при напряжении на

электродах 5 кВ можно оценить так: $E_{\text{промеж}} / E_{\text{изол}} = 6,3 \text{ [кВ/см]} / 1,9 \text{ [кВ/см]} = 3,3$

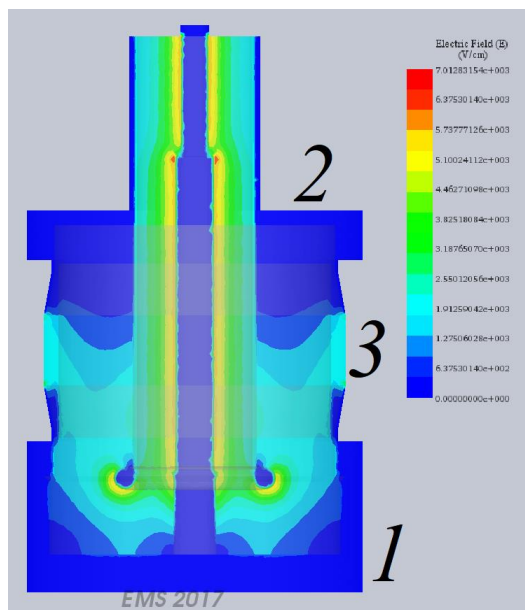


Рис. 14. Распределение модуля электрического поля в модернизированной конструкции источника. 1 — внутренний электрод, 2 — внешний электрод, 3 — керамический изолятор.

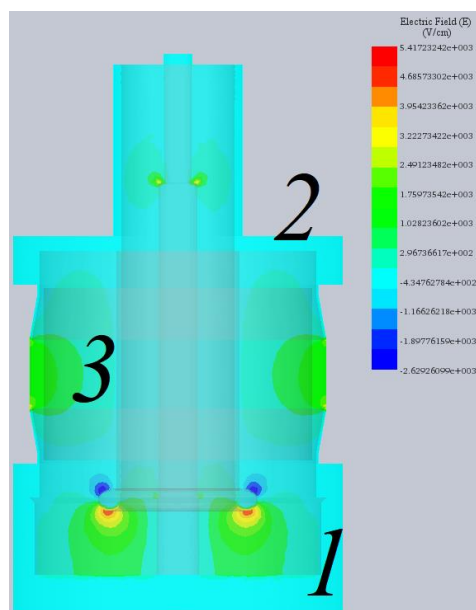


Рис. 15. Распределение тангенциальной компоненты электрического поля в модернизированной конструкции источника. 1 — внутренний электрод, 2 — внешний электрод, 3 — керамический изолятор

Рис. 14 показывает, что в модернизированной версии (Рис. 6) пушки поле сосредоточено также в разрядном промежутке, но здесь меньше размеры области у поверхности изолятора, где величина тангенциальной составляющей значительна (Рис. 15). Этого удалось достичь увеличением

размеров изолятора и изменением формы внешнего электрода. Для такой конфигурации определяющее отношение оценивается как $E_{\text{промеж}} / E_{\text{изол}} = 7$ [кВ/см] / 1,9 [кВ/см] = 3,68.

Сравнение указанных моделей позволяет предполагать, что в модернизированной конфигурации электродов пробой, вероятнее всего, идет в разрядном промежутке, а не на поверхности изолятора. В новой версии изолятор дополнительно защищен от плотной плазмы разрядного промежутка стенками внешнего электрода. В прежних же моделях пушки разряд шёл по поверхности изолятора, что ухудшало эффективность ускорения. К тому же изолятор покрывался слоем электропроводного вещества, что могло приводить к пробоям при напряжении ниже условий Пашена.

4. Техническое описание установки

4.1 Система подачи газа

4.1.1 Требования к системе подачи газа

Для системы подачи газа важно определить количество напускаемого газа и скорость напуска

В ходе работы из установки ГДЛ через пробки происходит потеря частиц плазмы эквивалентная току в $I \sim 1$ кА. Чтобы скомпенсировать эти потери требуется чтобы пушка инжестировала за время работы ГДЛ ($\tau \sim 1$ мс) количество частиц $N = \frac{I\tau}{e} \sim 10^{19}$.

Чем раньше начнет ускоряться газ, тем больший ускорительный отрезок он пройдет, что способствует повышению КПД пушки (см. п. 3.3). Газ должен инжестироваться как можно более плотным облаком, чтобы все частицы проходили одинаковый ускоряющий отрезок. Таким образом, нужно при разработке газовой системы стремиться к тому, чтобы все 10^{19} были инжестированы в разрядный промежуток до того, как первые частицы, попавшие в него, преодолеют половину ускоряющего отрезка. В случае последней модификации пушки это 0,5 метра. Тепловая скорость молекул

водорода при комнатной температуре 2000 м/с. Следовательно, система клапана должна инжектировать частицы за 250 мкс. Промышленные газовые клапаны не способны напускать газ за такое время. Требуется модифицировать систему напуска газа с целью добиться минимального времени напуска необходимого количества газа в разрядный промежуток. По соотношению параметров цена / доступность / скорость напуска /удобство в эксплуатации лучше всего для этой цели подходят электромагнитные клапаны.

4.1.2 Принцип действия электромагнитного клапана

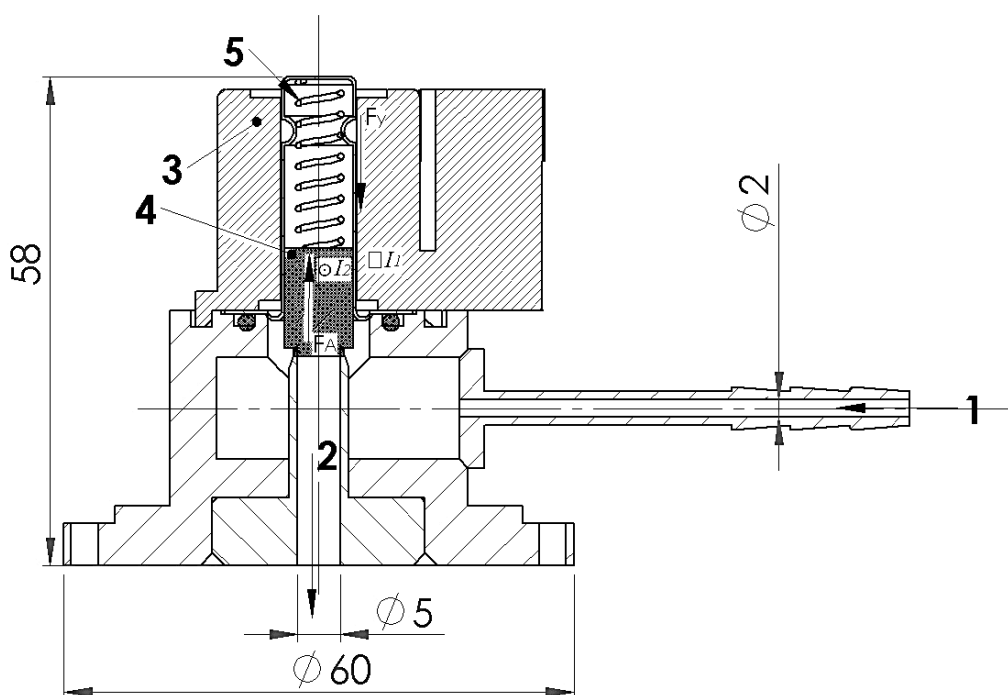


Рис. 16. Принцип действия электромагнитного клапана. 1 — входящий поток газа, 2 — выходящий поток газа, 3 — соленоид, 4 — проводящая пластина, 5 — пружина.

В закрытом состоянии (Рис. 16) проводящий поршень (4) прижатый пружиной (5) перекрывает поток газа. Когда в соленоиде (3) течет ток I_1 , в поршне возникают токи I_2 Фуко, препятствующие изменению потока магнитного поля через поршень. Когда возникшая сила Ампера между токами I_1 и I_2 превышает силу упругости пружины (5), поршень (4) поднимается и выпускает газ в рабочую область.

4.1.3 Разработка системы подачи газа

За основу системы подачи газа была взята форсунка GEMINI. Такие форсунки применяются для автомобильных двигателей внутреннего сгорания работающих на газе. Минимальный период срабатывания форсунки 1 мс. Рабочее напряжение катушки ~ 15 В позволяет регулировать скорость и амплитуду открытия клапана. Форсунка состоит из поршня, катушки, вакуумного уплотнения и ответной детали с газовым резервуаром. Объем газового резервуара позволяет контролировать количество напускаемых молекул водорода в зависимости от давления.

Для напуска 10^{19} частиц при давлении ~ 1 атмосферы требовалось создать ответную часть с газовым резервуаром объемом ~ 1 см³ (число Лошмидта 2.7×10^{19}). При этом газовые каналы должны позволять производить напуск за минимальное время, которое определяется шириной и длиной канала. Ширина канала определена поршнем форсунки GEMINI (4 на Рис. 16). Таким образом необходимо сделать напуск через предельно короткие каналы.

В описываемой модели пушки клапан крепится через изолятор к центральному электроду. Газ подается в разрядный промежуток через центральный электрод по отверстиям, так чтобы напуск происходил осесимметрично. Осевая симметрия напуска позволяет избежать дополнительных неустойчивостей в начале развития разряда.

В следующей модификации пушки клапан будет приварен к заземленному внешнему электроду. При этом осевая симметрия напуска будет сохранена. Подача газа через внешний электрод имеет ряд преимуществ (Таблица 12):

Таблица 12. Преимущества подачи газа через внешний электрод

Преимущество	Причина
Электрическая и пожарная безопасность водородного клапана	Заземление клапана через внешний электрод
Повышенная скорость напуска газа в разрядный промежуток	Более короткие каналы напуска газа
Уменьшение размеров пушки, ее массы и количества деталей	Избавление от изолятора и его крепления

Питание на клапан подается через транзисторный ключ. Для калибровки системы питания клапана использовался пояс Роговского. Для наблюдения за газовым фронтом использовался преобразователь манометрический ионизационный (ПМИ-27).

4.1.4 Измерение тока питания клапана поясом Роговского.

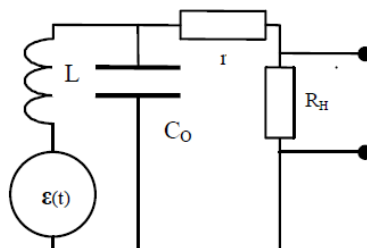


Рис. 17. Эквивалентная схема пояса Роговского в режиме трансформатора тока [15].

Давление газа, вышедшего в рабочую область, напрямую зависит от высоты, на которую поднимется пластина (4 на Рис. 16). 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 (Рис. 17)

$$U_{вых}(t) = R_н I_{вх}(t) / N \quad (6)$$

Для данной цели был собран трансформатор тока с сопротивлением нагрузки $R_н = 1$ Ом и количеством витков $N = 100$.

4.1.5 ПМИ: чертёж, принцип действия и схема подключения

Для измерения зависимости давления газа на выходе пушки использовался манометрический ионизационный преобразователь ПМИ-27 (Рис. 18). [16]

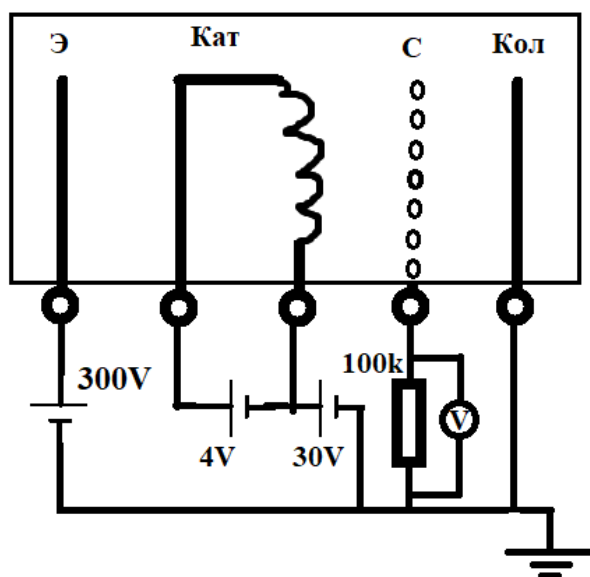


Рис. 18. Схема подключения ПМИ-27. Э – экран, Кат – катод, С – сетка, Кол – коллектор.

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.) 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 исключают 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.

Значение давления на ПМИ-27 можно определить из тока на измерительном сопротивлении как:

$$P_{\text{ПМИ}27} [\text{Па}] = 1.1 \times 10^3 \times I [\text{А}] \quad (7)$$

4.2 Блок питания пушки

4.2.1 Общая схема

Начальную схему блока питания пушки можно найти в работе [7]. В текущем варианте внесены следующие изменения:

Таблица 13. Изменения в блоке питания пушки

Изменение	Причина
Отказ от участка ответственного за разряд в TiH_2	Отказ от напуска газа через разряд в TiH_2
Уменьшение емкости батареи конденсаторов в участке, ответственном за разряд	Требуется сконцентрировать энергию тока в меньшем времени для более эффективного ускорения
Замена двух плоских шин питания на 8 коаксиальных кабелей	Уменьшение индуктивности системы питания, сопротивления тоководов и подавление искр
Замена игнитрона на вакуумный разрядник РВУ-27 (http://www.vei-avis.ru/index.php/tablica)	Уменьшение индуктивности системы питания. Улучшение стабильности коммутации

4.2.2 Вакуумный разрядник

Коммутирование системы питания с плазменной пушкой осуществлялось вакуумным разрядником. Этот прибор действует следующим образом:

1. На управляющие электроды кратковременно подается импульс высокого напряжения
2. Создаются условия для пробоя между основными электродами
3. По образовавшемуся разряду бежит основной ток
4. Как только основной ток падает ниже критического разряд заканчивается и цепь размыкается

В данной работе используется вакуумный разрядник РВУ-27 (<http://www.vei-avis.ru/index.php/tablica>).

Из модели п. 3.3 видно, что индуктивность источника снижает эффективность ускорения плазмы. Коммутатор подключен так, чтобы внесенные им поправки в индуктивность и емкость системы питания были минимальны.

4.3 Измерение тока на шине питания поясом Роговского

Из модели п. 3.3 видно, что ток разряда очень большой ~ 100 кА. Импульсный ток такой величины удобно измерять поясом Роговского. Схема, изображенная на Рис. 17, нуждается в дополнениях из-за очень большой амплитуды тока и возникающих из-за нее наводок [17].

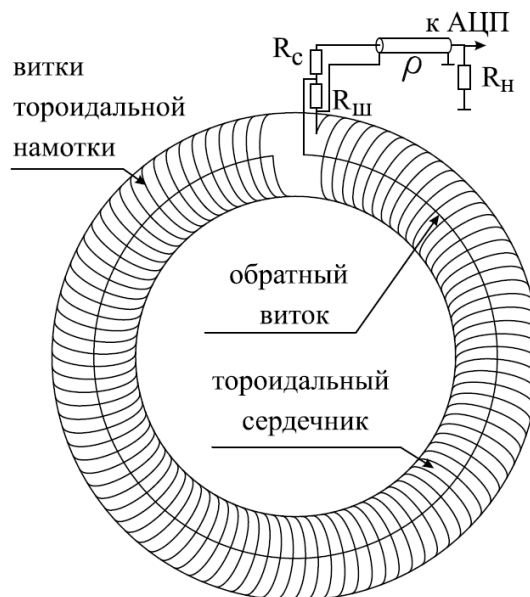


Рис. 19. Дополненная схема трансформатора тока

Пояс Роговского представляет собой тороидальный соленоид, намотанный на замкнутый аксиально-симметричный сердечник, внутри которого по середине сечения сердечника уложен обратный виток. Оба конца соленоида соединены с выводами малоиндуктивного резистора $R_{ш}$ так, что первый соединен напрямую, а второй через обратный виток. Подобное соединение обеспечивает подачу на резистор $R_{ш}$ ЭДС индукции только азимутальной составляющей магнитного поля, но не его аксиальной компоненты.

Чтобы в данной схеме на сопротивлении нагрузки R_n получить сигнал, пропорциональный току I_0 , необходимо проинтегрировать напряжение на шунте с помощью LR-цепочки, образованной индуктивностью соленоида и сопротивлением шунта. Очевидно, что такая схема интегрирования будет обеспечивать точную регистрацию импульсов тока только в случае, когда длительность импульса заметно меньше характерного времени интегрирования цепи $\tau = L/R_{ш}$. При выполнении этого условия, а также в случае согласования обоих концов измерительного кабеля ($R_c + R_{ш} = \rho$ и $R_n = \rho$) получим:

$$I_0 = \frac{\rho + R_{ш}}{\rho} \frac{U_{изм} N}{R_{ш}} \quad (8)$$

Пояс Роговского ставится на одну из 8-ми жил питания, таким образом, для получения полного тока эту формулу нужно ещё умножить на 8. Для

измерительного провода с волновым сопротивлением $\rho = 50 \text{ Ом}$ и количеством витков на поясе $N=100$ рабочая формула получилась:

$$I_0 [\text{кА}] = 44.2 \times U_{\text{изм}} [\text{В}] \quad (9)$$

Компенсация волнового сопротивления кабеля является очень важным действием. Наводки на некомпенсированном кабеле могут быть порядка самого полезного сигнала. В таком случае сложно различить полезный сигнал и многократно отраженную волну в кабеле. Также наводки может вызвать расположение измеряемой жилы не по центру пояса Роговского, это исправляется с помощью непроводящего эксцентрика.

4.4 Система запусков

Из модели п. 3.3 видно, что все процессы протекают за десятки микросекунд. Чтобы их контролировать, нужны специальные генераторы импульсов. Обычно генераторы подключают с помощью коаксиальных электрических кабелей, но из-за большой амплитуды и высокой частоты тока, по кабелям на генераторы приходят разрушительные наводки. Чтобы наводок по кабелям не было, все управление происходит через оптические каналы.

4.4.1 Генератор оптических импульсов

Для генерации оптических запусковых импульсов использовался цифровой прибор, позволяющий настроить запуски с шагом от 10 мкс. Фронт оптического импульса этого прибора $<10 \text{ нс}$. Прибор разработан в ИЯФ СО РАН.

4.4.2 Генератор высоковольтных импульсов

Для контролирования вакуумного разрядника (п. 4.2.2) используется аналоговый прибор, разработанный в ИЯФ СО РАН, который выдает запусковой электрический импульс амплитудой $\sim 100 \text{ В}$ и шириной фронта $\sim 1 \text{ мкс}$. Прибор запускается от генератора оптических импульсов, что позволяет ему управлять силовой электроникой и быть не чувствительным к наводкам от плазмы.

4.4.3 Оптические развязки

В данной работе требовался прибор для передачи запускового сигнала от генератора оптических импульсов на приборы контроля эксперимента (газовый разрядник, газовый клапан, осциллографы, АЦП). Роль таких приборов выполняли аналоговые оптические развязки на основе источника и приемника света. Оптические развязки позволяют гарантировать срабатывание приборов независимо от взаимных наводок. Фронт срабатывания таких приборов ~ 10 нс.

5. Диагностики

Чтобы использовать источник плазмы в целях поддержания материального баланса на ГДЛ требуется измерить и оптимизировать его параметры. Наиболее важным критерием применимости источника является давление плазменной струи. Его можно оценить, зная плотность плазмы и направленную скорость. Для оценок создавались различные диагностики в порядке их сложности и популярности.

5.1 Зондовая диагностика

Самый развитый и простой на текущий момент способ диагностировать параметры плазмы — это исследовать её Ленгмюровскими зондами. С помощью этого метода оценивают плотность, скорость, температуру плазмы, степень её ионизации и многое другое. Далее представлены попытки диагностировать плазму, полученную из источника, с помощью двойных Ленгмюровских зондов [18].

5.1.1 Схема питания зондов

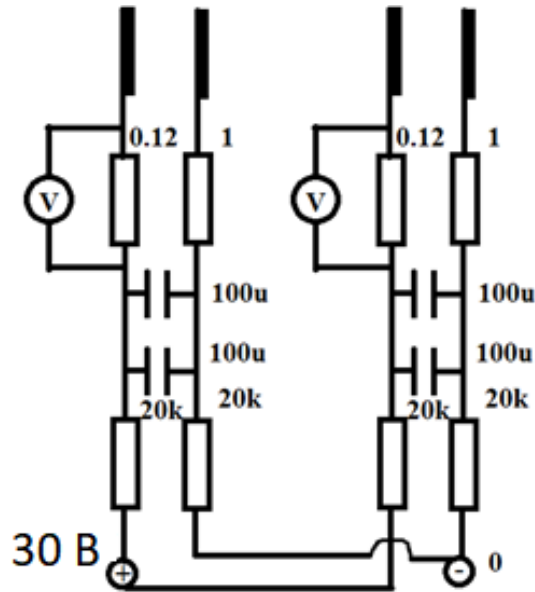


Рис. 20. Схема питания зондов. Величины верхних сопротивлений проходили дополнительную отладку и сейчас составляют 10 – 50 Ом.

Конденсаторы схемы (Рис. 20) заряжаются от источника постоянного напряжения до напряжения ~ 10 В через зарядные сопротивления. Все элементы схемы, кроме самих зондов находятся вне вакуумной камеры.

5.1.2 Ток насыщения



Рис. 21. ВАХ зонда Ленгмюра [18]

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 вольтамперной характеристике такой системы (Рис. 21) 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.

5.1.3 Времяпролетная диагностика

По ВАХ (Рис. 21) видно, что ток через измерительное сопротивление (Рис. 20) будет идти в любом случае кроме плавающего потенциала. Таким образом, зонды можно использовать в качестве времяпролетной диагностики.

$$v_i = \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1}, \quad (10)$$

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

5.1.4 Расположение зондов на установке

Электроды зондов были сделаны из молибденовой проволоки. их характеристики указаны в таблице 14. Они закреплены на штативе на расстояниях, указанных на Рис. 22.

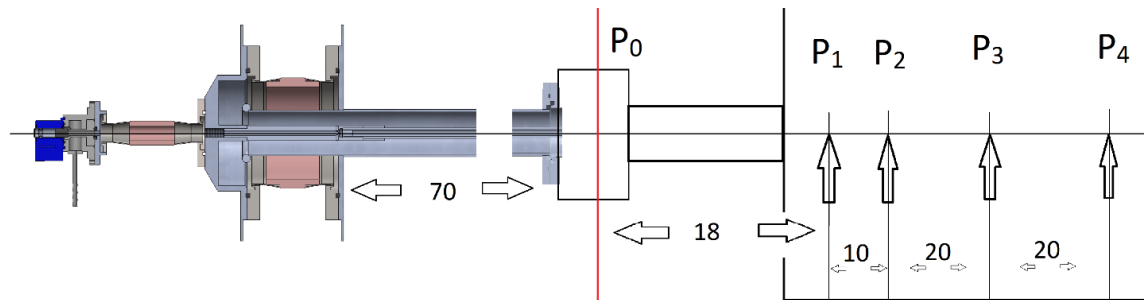


Рис. 22. Расположение зондов на установке. Расстояния указаны в сантиметрах. 0 – Интерферометр (см. п. 5.2.2). 1 – 5 – Двойные зонды под напряжением ~ 10 В. Расстояния указаны в сантиметрах.

Используя все 5 точек времяпролетной диагностики можно анализировать эволюцию скорости пучка с движением по оси.

Таблица 14. Параметры зондов Ленгмюра

№	Координата от газонапуска z, см	Материал	Толщина d, мм	Длина h, мм	Расстояние между электродами l, мм	Измерительное сопротивление R ₁ , Ом
1	88	Мо	1	1	1	10
2	98	Мо	0.2	1	1	15
3	118	Мо	1	1	1	30
4	138	Мо	0.2	1	1	50

5.2 Оптические диагностики

Из п. 5.1.2 видно, что плотность плазмы из данного источника не удается оценить зондовым методом. Другой распространенный метод изучения плазмы — это оптические диагностики, изучающие взаимодействие плазмы с электромагнитными волнами.

5.2.1 Распространение электромагнитных волн через плазму

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

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \sqrt{1 - \frac{n(z)}{n_c}} dz \quad (11)$$

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

$$n_c = \frac{\pi m_e c^2}{\lambda^2 e^2} \quad (12)$$

Где m — масса частиц, составляющих плазму, e — заряд электрона. Все величины в СГС.

В данной работе используется излучение гелий-неонового лазера $\lambda=630$ нм. Для электронной плазмы в данном случае критическая концентрация составляет 2.8×10^{27} м⁻³. Ожидаемая фактическая локальная концентрация плазмы будет на несколько порядков меньше критической ($n \ll n_c$).

Предполагая, что она примерно однородна можно, преобразовать формулу (11) в следующий вид:

$$\Delta\phi \approx \frac{\pi l n}{\lambda n_c} \quad (13)$$

Где n уже является усредненной по l фактической плотностью.

5.2.2 Схема интерферометра Майкельсона

Из предыдущего пункта видно, что при прохождении через плазму фаза света будет меняться в зависимости от плотности плазмы. Сдвиг фазы проще всего измерить интерферометром. В качестве рабочей схемы был взят интерферометр Майкельсона.

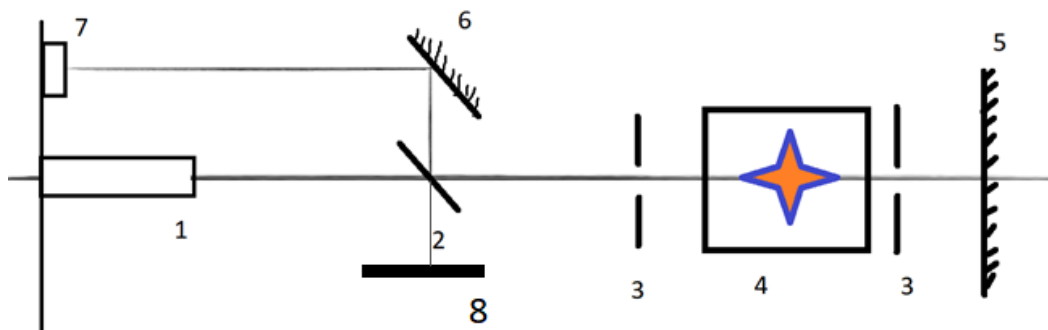


Рис. 23. Интерферометр Майкельсона. 1 — гелий-неоновый лазер. 2 — стеклянная плоскопараллельная пластина (отводит ~10% излучения). 3 — коллиматор. 4 — плазма. 5 — вертикальное зеркало с пьезокорректором. 6 — наклонное зеркало. 7 — фотоприёмный модуль. 8 — горизонтальное зеркало

На схеме, изображенной на Рис. 23, луч гелий-неонового лазера 1 расщепляется на плоскопараллельной пластине 2 на 2 луча один из них проходит через плазму 4, отражается от зеркала 5 и дважды получает дополнительный набег фазы в плазме. Второй же луч отражается от зеркала 8 и попадает на зеркало 6 без набег фазы. В то же время на зеркало 6 приходит первый луч, отразившись от пластины 2, на зеркале 6 происходит интерференция двух лучей и отражение на фотоприемник 7. В результате, интенсивность излучения на фотоприемнике оказывается модулированной изменением длины оптического пути второго луча следующим образом:

$$I_7 = I_5 + I_8 + 2\sqrt{I_5 I_8}, \quad (14)$$

Где I_7 — интенсивность на фотоприемнике, I_5 — интенсивность отраженного от зеркала 5 и прошедшего через плазму дважды, I_8 — интенсивность неискаженного плазмой излучения отраженного от зеркала 8, $\Delta\phi$ — разность фаз между искаженным излучением и собственным излучением лазера, определяемая длиной оптического пути через плазму.

В нашем эксперименте луч проходит через плазму дважды, что удваивает полный сдвиг фазы. Таким образом, при $l=4$ см, рабочая формула имеет вид:

$$n_e [\text{см}^{-3}] = 7.05 \times 10^{15} \Delta\phi \quad (15)$$

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.

Очень важным фактором является предохранение фотоприемника от излучения самой плазмы, которое может превышать полезный сигнал интерферометра. Для этого используются плотные непрозрачные коллиматоры.

5.3 Общая схема установки

Отладка источника плазмы происходит на стенде с вакуумной камерой. Камера имеет форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами 100x50x50 см. На камере расположено 4 смотровых окна. Стенд с камерой заземлен.

Откачка ведется двумя насосами:

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

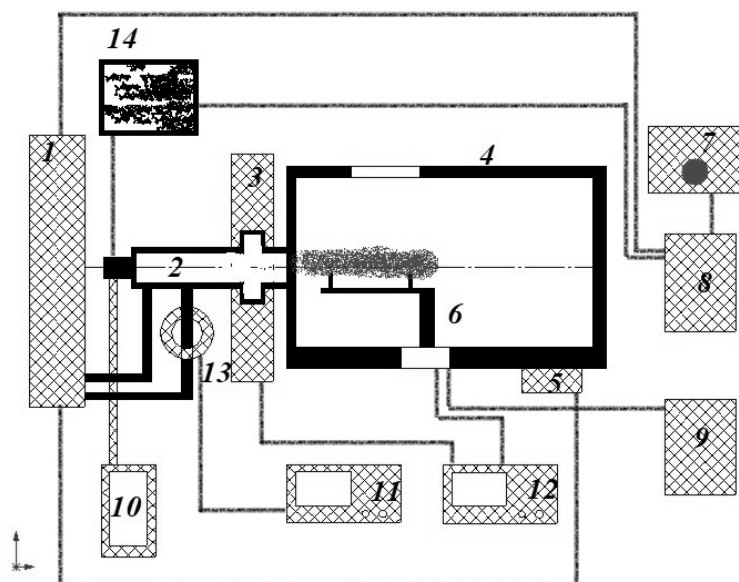


Рис. 24. Общая схема установки.

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

6. Результаты измерений

6.1 График тока питания пушки

Для управления режимами разряда необходимо знать форму его тока. Она измерялась поясом Роговского. На форму тока влияет время между подачей газа и началом разряда, а также начальное напряжение на электродах.

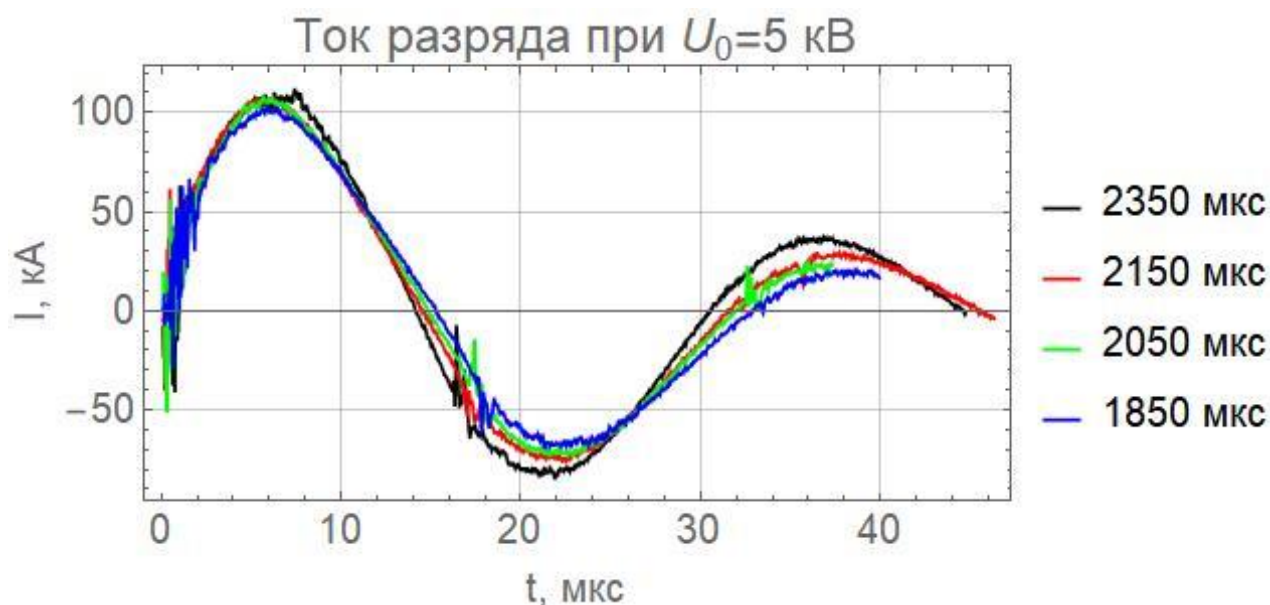


Рис. 25. Изменение формы тока разряда в зависимости от задержки между началом подачи газа и подачей напряжения на электроды при напряжении 5 кВ

Из Рис. 25 видно, что с понижением задержки между подачей газа и началом разряда при одинаковом напряжении сохраняется амплитуда первого полупериода колебаний и уменьшаются амплитуды остальных полупериодов. К тому же, увеличивается длительность первого периода.

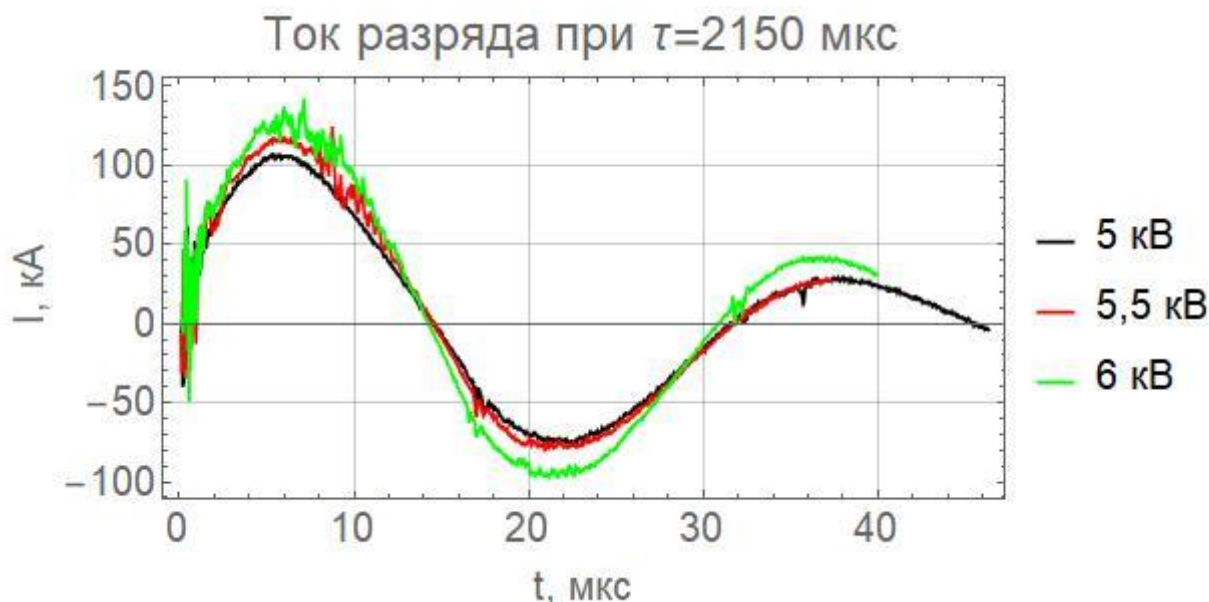


Рис. 26. Изменение формы тока разряда в зависимости от начального напряжения на электродах при задержке 2150 мкс

Рис. 26 показывает, что с повышением напряжения при одинаковой задержке на главном такте усиливаются шумы, что говорит об изменении режима разряда.

6.2 График тока питания клапана

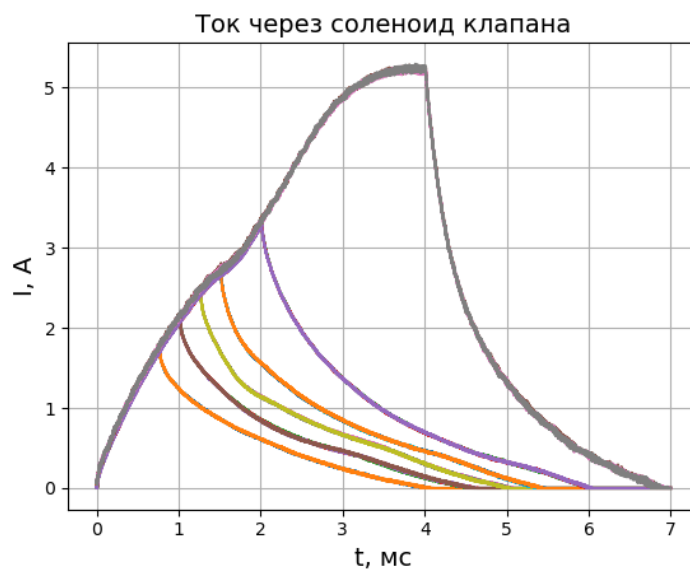


Рис. 27. Ток через катушку газового клапана в зависимости от длительности открытия ключа

По пику тока на соленоиде клапана и длине газового тракта системы клапана (~ 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. 27 видно, что для частиц, летящих со скоростью 2 км/с (водород при комнатной температуре) это время составляет не менее 800 мкс.

6.3 График давления нейтрального газа

С помощью манометра ПМИ-27 (п. 4.1.5) было измерено давление нейтрального газа, напускаемого системой клапана, состоящей из форсунки и газового тракта (см. Рис. 28).

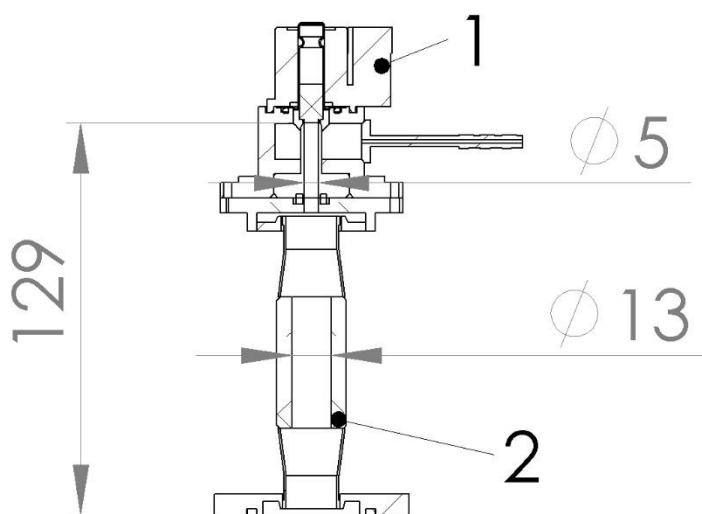


Рис. 28. Система газового клапана. 1 — форсунка, 2 — газовый тракт длиной 129 мм.

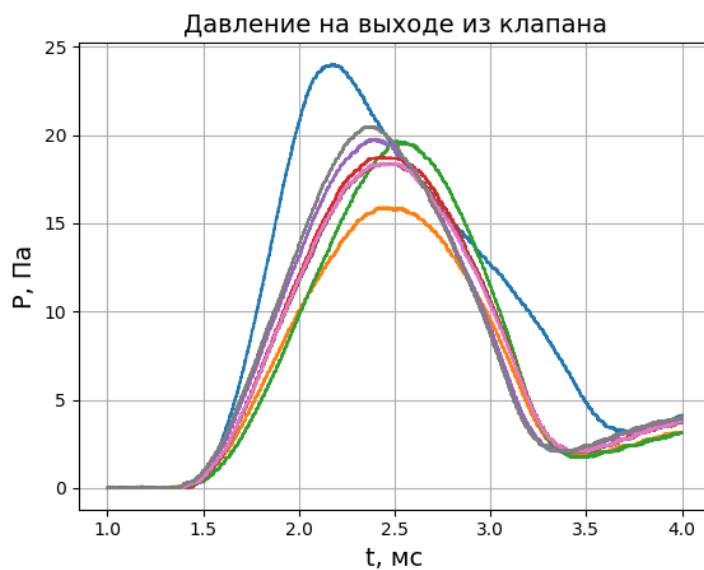


Рис. 29. Давление газа из форсунки GEMINI при разном токе клапана. Измерено ПМИ-27 на выходе из системы клапана

Из Рис. 29 видно, что газ начинает выходить из системы клапана не раньше 1,5 мс и достигает своего пика в не раньше, чем в 2,2 мс. По этому времени можно оценить минимальную задержку между подачей тока открытия клапана и началом разрядного тока в пушке.

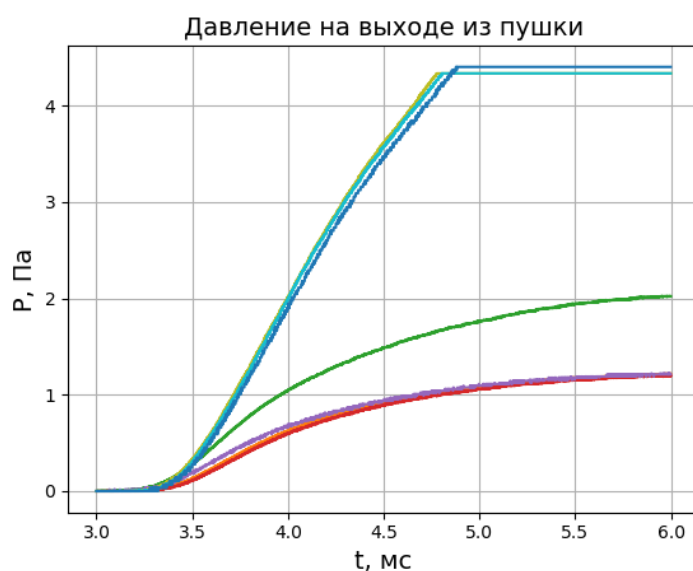


Рис. 30. Давление газа из форсунки GEMINI при разном токе клапана. Измерено ПМИ-27 на выходе из пушки

Рис. 30 показывает, что из пушки газ начинает выходить в 3,2 мс при любом режиме работы клапана. По этому времени можно оценить максимальную

величину задержки между подачей тока открытия клапана и началом разрядного тока в пушке.

6.4 Показания интерферометра

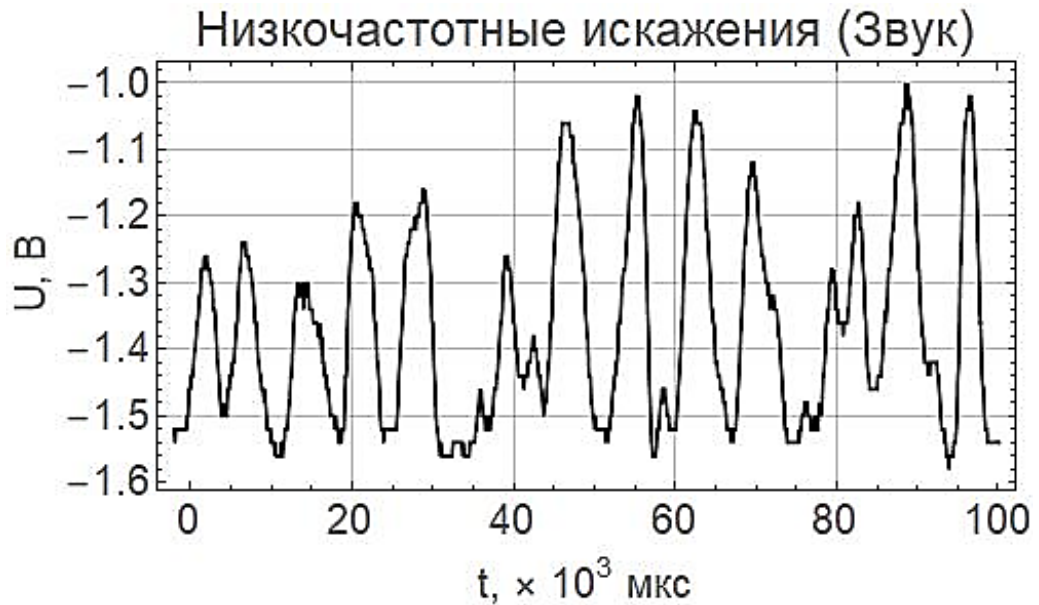


Рис. 31. Искажения сигнала на фотоприемнике, вызванные звуковыми колебаниями интерферометра. Соответствуют максимальной амплитуде интерференции

Из Рис. 31 видно, что амплитуда интерференции вызванной звуковыми колебаниями $\sim 0,5 \text{ В}$. Предположительно это соответствует максимальному размаху интерференции. Иногда этот график обновлялся между проведением экспериментов с выстрелами из пушки.



Рис. 32. Искажения, вызванные прохождением плазмы

Выстрелы для измерения плотности интерферометром не всегда попадали на линейный участок низкочастотных колебаний. Поэтому для оценки плотности использовали только наиболее подходящие случаи. По Рис. 32 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).

6.5 Времяпролетная диагностика по 3 точкам

Для времяпролетной диагностики использовались датчики, расположение которых указано на Рис. 22 Для каждого датчика требуется отдельный развязанный АЦП.. На неразвязанных АЦП наводки превышают сигнал в разы. В последних экспериментах в качестве АЦП использовались 3 осциллографа. Для определения времен пролета плазмы через датчики снятые осциллограммы были преобразованы так, как указано в таблице 15.

Таблица 15. Последовательность преобразований осциллограмм

№	Преобразование
1	Скользящее среднее с шириной окна 1 мкс. Время сдвинуто с учетом сглаживания на половину окна
2	Из осциллограммы интерферометра вычтено линейное приближение низкочастотных колебаний
3	Осциллограмма интерферометра взята по модулю
4	В осциллограммах зондов обрезаны отрицательные части
5	Все осциллограммы выражены в процентах от своих максимумов

Преобразованные таким образом сигналы позволяют измерить время между соответствующими друг другу точками на сигналах с каждого датчика и оценить направленную скорость. Пример осциллограммы преобразованной таким образом представлен на Рис. 33.

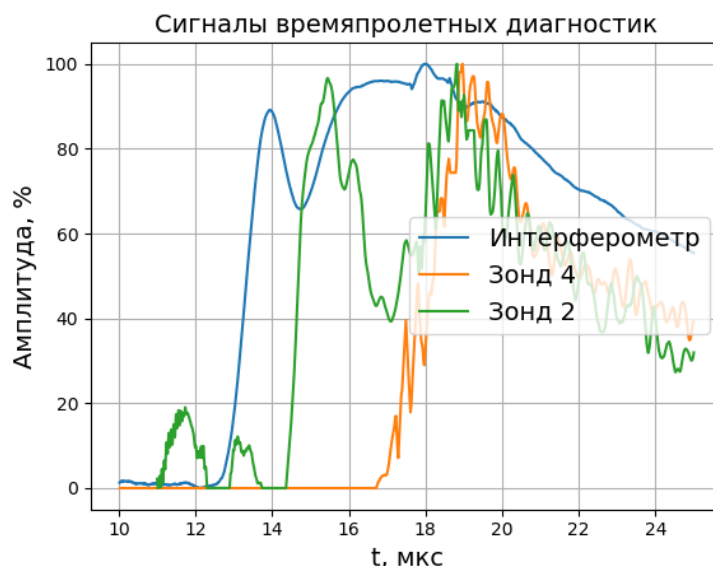


Рис. 33. Пример сигналов времяпролетных диагностик

На Рис. 33 видно, что в данном выстреле направленная скорость, взятая по уровню 40% составила примерно 160 км/с с учетом данных из таблицы 14. Показания эти отличаются от выстрела к выстрелу, в среднем скорость составляет 200 ± 25 км/с. Аналогично нестабильные от выстрела к выстрелу показания скорости были и на установках ТРИНИТИ [9].

6.6 Погрешности измерений

6.6.1 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.

6.6.2 Погрешность системы запуска

Генераторы импульсов подают запусковые сигналы с точностью ~ 0.1 мкс.

6.6.3 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).

7. Анализы полученных результатов

7.1 Анализ тока питания пушки

Из Рис. 25 видно, что ток имеет форму затухающих колебаний. Его форма не соответствует модели п. 3.3, так как модель эта была составлена для тонкой перемишки и весь разряд ускорялся в максимуме тока. Таким образом вся энергия переходила в тепловую и направленную кинетическую. На побочные такты колебаний энергии в конденсаторах не оставалось (Рис. 10).

В реальности же газ имеет форму вытянутого облака. Размер и масса ускоряемой его части определяется задержкой между началом подачи газа и началом пробоя. Таким образом, уменьшая эту задержку, можно приблизить размеры газового облака к размерам основного разряда и передать ему больше энергии. Соответственно, в конденсаторах останется меньше энергии на последующие такты колебаний. Это иллюстрируется на Рис. 25.

Рис. 26 Показывает, что с повышением напряжения повышается амплитуда тока. Также хорошо видно возникновение шумов, когда ток превышает некоторое критическое значение. Эти шумы говорят о возникновении другого, отличного от модели п. 3.3, режима тока. Этот режим описан в [11] начиная со стр. 182.

При разрядах с небольшим током ($\frac{B^2}{8\pi} \leq nk(T_i + T_e)$) линии тока практически радиальные и соответствуют одножидкостной МГД.

Если при постоянном напуске газа начать увеличивать ток, то при некотором J^* в пушке раскачиваются колебания большой амплитуды и существенная часть разрядного тока выносится на торец пушки. Это вызвано тем, что в системе с большим магнитным полем наряду с «омической» компонентой тока, идущей радиально, по электрическому полю появляется «холловская» идущая вдоль оси пушки. «Холловская» компонента отжимает плазму от анода. Появление «холловской» компоненты приводит к увеличению произведения $\omega_e \tau_e$, что еще больше усиливает ток вдоль оси.

Эксперименты на установках, где наблюдался похожий эффект показали определяется эмпирическим соотношением:

$$J_{\text{крит}} \approx K(\Gamma) \sqrt{\frac{e\dot{m}}{M}}, \quad (16)$$

Где $K(\Gamma)$ — функция от геометрии системы, M — масса иона, \dot{m} — расход газа (масса газа, напускаемая в единицу времени).

Таким образом, для повышения критического тока, а значит и предельных скоростей пушки, нужно повышать скорость напуска газа.

7.2 Анализ напуска газа

Ток через соленоид клапана (Рис. 16) имеет треугольную форму (Рис. 27). Его амплитуда не велика, что позволяет использовать для питания клапана любой источник напряжения с подключением через конденсатор. На графике также видно, что длительность открытия транзисторного ключа в системе клапана напрямую влияет на амплитуду тока соленоида и на величину открытия клапана соответственно.

На Рис. 30 видно, что в зависимости от тока клапана он может выдавать разное давление вплоть до зашкала ПМИ-27. Также при, сравнении Рис. 29 и Рис. 30 видно, что длинный газовый тракт пушки сильно растягивает газовое облако. Также его растягивает газовый тракт системы клапана.

По всем вышеуказанным графикам можно сказать, что задержку между подачей газа и началом разряда можно варьировать от 1,8 до 3,2 мс. С помощью этой задержки можно контролировать режимы работы пушки, концентрацию газа в пушке, его массу и прочие параметры, не меняя начального напряжения на конденсаторах.

Таким образом, для ускорения напуска газа, что требуется п. 7.1 нужно сокращать газовый тракт клапана.

7.3 Анализ данных интерферометра

Из-за недостатка независимых АЦП не имелось возможности одновременно выводить высокочастотный и низкочастотный сигнал для каждого выстрела, поэтому для учета низкочастотной составляющей сигнала и положения сигнала с плазмой относительно границ низкочастотной был разработан алгоритм, указанный в таблице 16.

Таблица 16. Алгоритм анализа данных интерферометра

№	Действие
1	Загрузка опорной осциллограммы низкочастотного сигнала (Data0), принять его амплитуду за предельный размах интерферометра(A0)
2	Загрузка сигнала плазмы с низкочастотной составляющей (Data1 \approx DataP + Line0)
3	Линейное приближение низкочастотного сигнала в районе сигнала плазмы (Line1)
4	Определение положения сигнала Line1 относительно границ сигнала Data0 Если Line1 в районе середины, пропустить следующее действие
5	Если Line1 близко к границе Data0 и DataP направлен к этой границе, то максимальный размах принять за $A0=2 a1-a0 $, где a1 — сигнал Line1 в районе начала плазмы, a0 — ближайшая к пику DataP граница
6	Пересчитать DataP в плотность плазмы по формуле $n=7.05e15 \times \text{DataP} [\text{см}^{-3}]$

В ходе анализа выстрелов было выяснено, что плотность заметно меняет свою амплитуду от выстрела к выстрелу при одинаковых параметрах эксперимента, но форма её сохраняется. Это иллюстрируется на Рис. 34

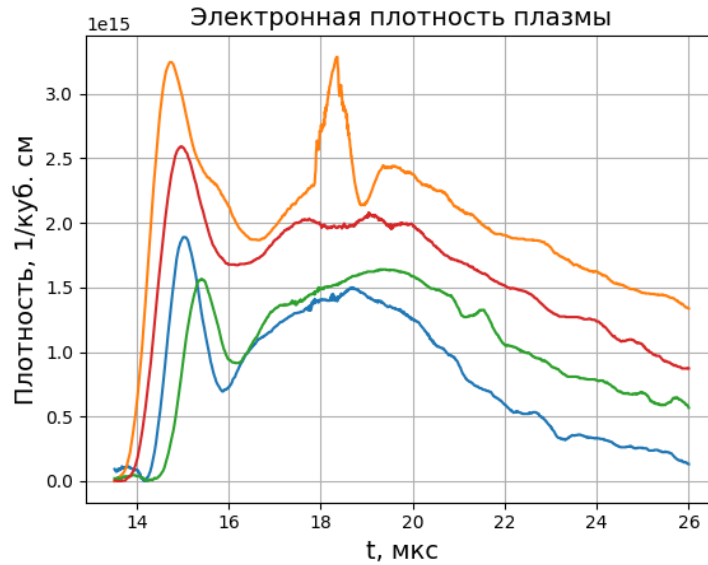


Рис. 34. Электронная плотность плазмы при выстрелах с начальным напряжением 5 кВ и задержкой 2250 мкс.

На Рис. 34 видно, что в данных выстрелах плотность плазмы варьируется между 1.5×10^{15} и $3.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

7.4 Давление и энергия струи

Из имеющихся данных пунктов 6.5 и 7.3 можно оценить среднее давление плазменной струи при выстрелах:

$$p = \rho v_{\parallel}^2 \approx m_p n_e v_{\parallel}^2 = 1,6 \times 10^{-27} \times 2,6 \times 10^{21} \times (2 \times 10^5)^2 = 1,4 \times 10^5 \text{ Па} = 1,6 \text{ бар} \quad (17)$$

При этом, для инъекции в поле 1 Т нужно давление 3,8 бар.

Энергия отдельной частицы в струе оценивается так:

$$E_p = m_p v_{\parallel}^2 / 2 = 3.3 \times 10^{-17} \text{ Дж} = 200 \text{ эВ} \quad (18)$$

Всего в струе частиц:

$$N = vS \int_{t_i}^{t_f} n(t) dt = 6.7 \times 10^{18} \quad (19)$$

Их суммарная энергия $E_{\text{сум}} = NE_p = 197 \text{ Дж}$

По этим данным можно оценить КПД плазменной пушки:

$$\text{КПД пушки} = \frac{E_{\text{сум}}}{E_{\text{коденс}}} = \frac{2 E_{\text{сум}}}{c U_0^2} \approx 10\% \quad (20)$$

Таблица 17. Средние параметры плазменной струи

Параметр	Значение
Плотность	$2,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Направленная скорость	200 км/с
Давление струи	1,6 бар
Энергия частицы	200 эВ
Количество частиц	6.7×10^{18}
Энергия струи	197 Дж
КПД _{пушки}	10 %

7.5 Анализ элементарного состава плазмы

Для инъекции в ГДЛ важны сведения о составе плазмы. Для анализа состава было решено использовать напыление плазмы на поверхности. Под плазменную струю сразу за зондами было подставлено прозрачное стекло, зажатое фиксатором из вакуумной резины (Витон). После ~100 выстрелов пушки на стекле был виден осадок. Также была видна «тень» от зонда и от фиксирующего зажима (Рис. 35)



Рис. 35. Фотография стекла после ~100 выстрелов в него из плазменной пушки. Контрастность усилена программным образом.

Стекло было отправлено на сканирующий электронный микроскоп. На микроскопе был проведен элементарный анализ чистых и напыленных участков стекла.

Таблица 18. Элементарный состав поверхности чистого участка.

Элемент	№	Доля [%]
Кислород	8	43.35
Кремний	14	31.58
Углерод	6	8.85
Натрий	11	8.05
Кальций	20	5.89
Магний	12	1.72
Алюминий	13	0.56

Таблица 18 содержит только элементы, составляющие стекло. Чистые участки во время выстрелов не контактировали с плазмой и находились при комнатной температуре. Здесь обнаружено всего 7 элементов.

Таблица 19. Элементарный состав участка с крупными частицами

Элемент	№	Доля [%]	Предполагаемый источник
Углерод	6	51.46	Масло насоса
Кислород	8	27.66	Стекло
Кремний	14	10.69	Стекло
Натрий	11	3.98	Стекло
Хлор	17	2.23	Резина фиксатора
Кальций	20	2.20	Стекло
Молибден	42	0.76	Зонды
Магний	12	0.51	Стекло
Калий	19	0.34	Резина фиксатора
Алюминий	13	0.17	Стекло

Таблица 19 содержит элементы, содержащиеся в вакуумной камере, помимо элементов, составляющих стекло. Здесь наблюдается 10 элементов.

Таблица 20. Элементарный состав участка с мелкими частицами

Элемент	№	Доля [%]	Предполагаемый источник
Кислород	8	42.08	Стекло
Кремний	14	30.56	Стекло
Углерод	6	9.28	Масло насоса
Натрий	11	8.80	Стекло
Кальций	20	5.78	Стекло
Магний	12	1.76	Стекло
Хлор	17	0.73	Резина фиксатора
Алюминий	13	0.59	Стекло
Калий	19	0.34	Резина фиксатора
Молибден	42	0.09	Зонды

Таблица 20 практически не отличается от предыдущей. Здесь обнаружены 10 элементов.

Таким образом, в осадке обнаружены элементы, наличие которых определяется чистотой вакуума и наличием побочных элементов (зондов) в струе. При этом не наблюдается увеличения концентрации железа, алюминия и кислорода элементов составляющих саму пушку. По этому анализу можно предположить, что наличие загрязнений в плазме определяется только чистотой вакуума.

8. Заключение

В итоге расчётной части работы была построена математическая модель источника плазмы большого давления на основе уравнений Арцимовича. С помощью этой модели была оценена оптимальная длина электродов источника для задач данной работы. В ходе численного моделирования электрического поля было подтверждено, что текущая форма электродов удовлетворяет требованиям данной работы лучше, чем в предыдущих моделях.

В итоге экспериментальной работы на данный момент создана система диагностик для оценки параметров источника плазмы (ток, напряжение питания, параметры напуска газа), самой плазмы (скорость, плотность, давление, энергия) и алгоритмы обработки данных с этих диагностик. С помощью этой системы разработаны, отлажены и проверены на применимость несколько модификаций источника плазменной струи большого давления на основе пушки Маршалла. Для текущей модели удалось добиться давления плазменной струи (1,6 бар) соизмеримого с требуемым (3,8 бар). Также с помощью сканирования осадка на сканирующем электронном микроскопе оценена химическая чистота плазмы. Выяснено, что она определяется только чистотой вакуума.

Также из проделанной работы видно, что требуется продолжать повышать давление плазменной струи. В текущей модели путем повышения тока источника питания этого сделать нельзя из-за возникающих неустойчивостей. Для повышения давления в следующих модификациях планируется увеличивать темп напуска газа в разрядный промежуток (повышение КПД) и начальное напряжение на электродах (повышение энергосодержания). Для измерения же полученного давления потребуется дополнительная диагностика, измеряющая давление струи непосредственно, в качестве такой диагностики будет использован пьезодатчик.

В дальнейшем планируется провести эксперименты с инъекцией плазменной струи, полученной из источника плазменной струи в поле постоянных магнитов. Конечным итогом работы будет инъекция плазменной струи в поле ГДЛ и использование её для поддержания материального баланса мишенной плазмы.

9. 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] А. В. Воронин, «Разработка источника для подачи топлива в центральную зону термоядерного реактора,» *Журнал технической физики*, т. 88, № 5, pp. 692-695, 2018.
- [10] Н. Климов, «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ПЛАЗМЫ И РАЗРЯДА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С СОБСТВЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ,» 2019.

- [11] А.И.Морозов, Введение в плазмодинамику, ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [12] T. M. I. Allfrey, Studies on Plasmoid Merging using Compact Toroid Injectors.
- [13] П. Колесников, Электродинамическое ускорение плазмы.
- [14] НИУМЭИ, «Пробой твердых диэлектриков,» [В Интернете]. Available: <http://ctl.mpei.ru/DocHandler.aspx?p=pubs/phd/3.3.htm>.
- [15] Л. Н. Вячеславов, «Лабораторный практикум. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.,» в *Электрические цепи*, Новосибирск, 2008, pp. 73-85.
- [16] *ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ* *МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ*
ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПМИ-27. Техническое описание и инструкция по эксплуатации..
- [17] С. Л. Сеницкий, Мощные импульсные пучки, Новосибирск, 2012.
- [18] А. Судников, Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1, 2017.