

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**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Шоколова Александра Дмитриевича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы **Источник пучка ионов ксенона для диагностики высокотемпературной  
плазмы**

**«К защите допущен»**

Заведующий кафедрой

**Научный руководитель**

Иванов А.А.

Давыденко В.И.

Колмогоров А.В.

ученая степень, звание

ученая степень, звание

Доктор физико-математических наук

Доктор. физ.-мат. наук

Без степени

должность, место работы

должность, место работы

Зам. директора по научной работе, ИЯФ

Гл. н. с.

Научный сотрудник, ИЯФ

.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

.....  
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2018 г.

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

# Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Источник ионов .....	5
Глава 2. Моделирование формирования пучка в ячейке ионно-оптической системы.....	7
Глава 3. Экспериментальная установка .....	12
Глава 4. Экспериментальное изучение .....	16
Заключение .....	20
Литература .....	21

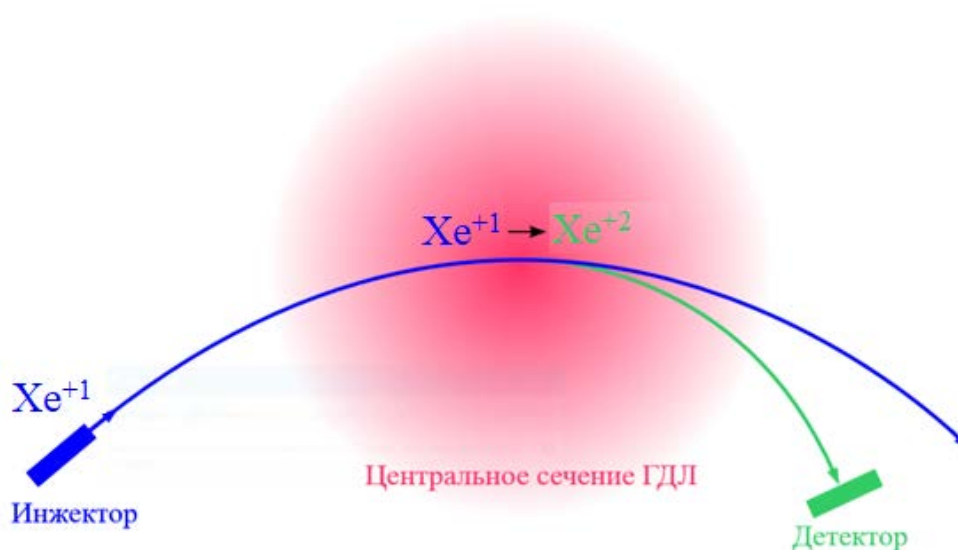
# Введение

В настоящее время всё чаще находят своё применение сложные научные технологии. Идет развитие множества направлений физики плазмы: от громадных проектов, которыми занимаются целые государства (проект ИТЕР), до различных имплантеров, используемых в самых разных областях: от производства до медицины. Ни одна из перечисленных областей не обходится без источников ионов. Использование ионов в данных установках является основным принципом их работы. Источники ионов играют важную роль и на установках, исследующих физику плазмы. В Институте ядерной физики одной из основных установок по изучению плазмы является Газодинамическая Ловушка (ГДЛ).

Измерение пространственного профиля потенциала плазмы представляет большой интерес на установке ГДЛ. Его точное определение позволяет предсказать поведение плазмы во времени, образование неустойчивостей и т.п.

На установке ГДЛ в настоящее время работают две диагностики профиля электрического поля – сборка Ленгмюровских зондов и энергетический анализатор ионов, покидающих область плазмы ГДЛ через пробки. Однако ни одна из них не способна с достаточной точностью (или совсем) определить потенциал плазмы в её центральной области [1,2].

Для определения потенциала центральной области была предложена следующая концепция: в плазму инжектируются ионы  $\text{Xe}^{+1}$ , которые, при прохождении центральной области, частично повышают степень ионизации до  $\text{Xe}^{+2}$ . Ионизация происходит с большой точностью в центральной части плазмы. По разнице энергий между  $\text{Xe}^{+1}$  и  $\text{Xe}^{+2}$  определяется потенциал плазмы. На Рисунке 1 схематично представлен принцип работы диагностики [3].



*Рисунок 1 - принцип работы измерителя потенциала плазмы на основе инжектора ионов ксенона.*

Цель данной работы – разработка источника, формирующего пучок ионов ксенона для диагностики центральной части плазмы ГДЛ, обладающий следующими параметрами:

- 1) Источник ионов должен образовывать ионы с энергией 45-75 кэВ и с высоким содержанием основной фракции ионов ксенона.
- 2) Источник ионов должен обеспечить ток требуемых ионов до 7 мА с малой угловой расходимостью.
- 3) Источник ионов с системой формирования должен обеспечить создание ленточного пучка с минимальным поперечным сечением.

Желательно сведение к минимуму расхода рабочего вещества. Это может быть важно по нескольким причинам. Для источника, использующего газ для получения ионов, повышение расхода газа ухудшает вакуум в установке, что может привести к увеличению вероятности электрических пробоев.

Следующим этапом работы было определение конфигурации источника и проведения моделирования вытягивания пучка ионов. Однако ксенон – газ дорогой, поэтому на этапе наладки и испытаний используется аргон, при этом понимая, что он в ~4 раза легче ксенона.

## Глава 1. Источник ионов

Ниже представлена схема источника ионов, разрабатываемого в данной работе.

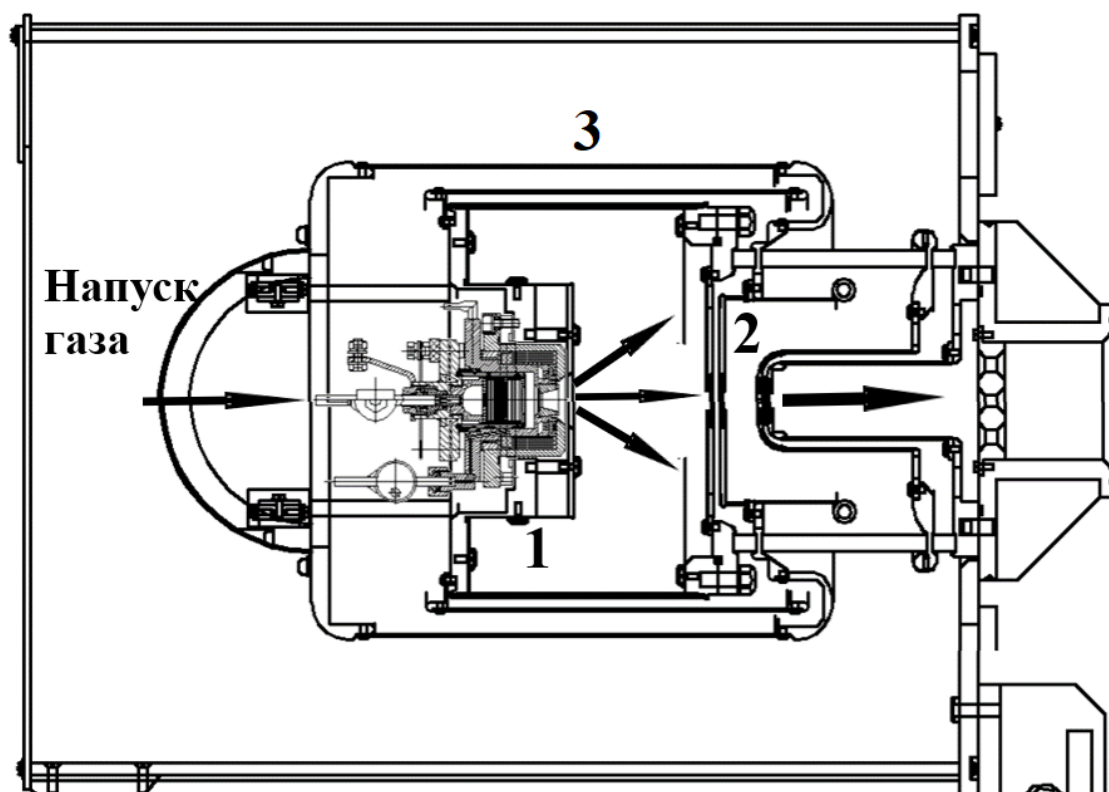


Рисунок 2 - схема источника ионов

Ксенон подается в источник с помощью импульсного газового клапана, расположенного в задней части дугового генератора (1). Ионы, получившиеся в результате обдирки электронов дуговым разрядом в генераторе, свободно разлетаются в расширительном объеме источника, и попадают в ИОС (2), где происходит формирование пучка. Поскольку к источнику приложено высокое напряжение, для уменьшения вероятности пробоя он помещен в электростатический экран (3). Ниже представлена схема работы дугового генератора (1).

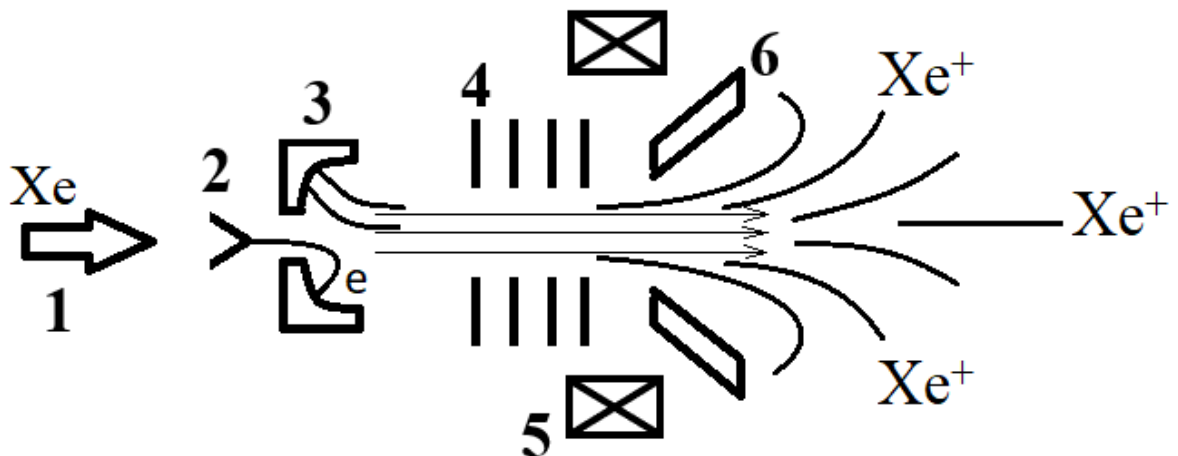


Рисунок 3 - дуговой генератор: 1 – импульсный клапан, 2 – игла, 3 – катод, 4 – дуговой канал, 5 – катушка магнитной изоляции, 6 – анод.

Напуск газа в источник происходит при помощи импульсного газового клапана (1), расположенного сразу за иглой (2). Между иглой и катодом (3), расположенным далее, импульсно прикладывается напряжение  $\sim 9$  кВ, благодаря чему образуется плазма в прикатодной области, что создаёт оптимальные условия для зажигания дуги между катодом и анодом (6). Создаваемое катушкой (5) поле намагничивает электроны, что увеличивает вероятность ионизации газа в прианодной области – намагниченные электроны, попадая на анод не сразу, а описывая спиральные траектории, что увеличивает вероятность ионизовать газ. Сборка из нескольких металлических колец (4) обеспечивает однородное азимутальное распределение электрического поля в разрядном промежутке.

После образования ионы газа попадают в ионно-оптическую систему, где происходит формирование пучка и его ускорение до необходимой энергии.

## Глава 2. Моделирование формирования пучка в ячейке ионно-оптической системы.

Во время формирования пучка на его расходимость влияют следующие факторы: форма силовых линий полей и влияние пространственного заряда. Для определения оптимальных величин напряжения на электродах и вычисления минимальной угловой расходимости проведено моделирование формирования пучка в программе PBGuns.

В двумерном приближении проведено моделирование одноапертурной четырехэлектродной ионно-оптической системы. В процессе моделирования были приняты следующие допущения: ионы аргона или ксенона с начальной поперечной температурой 0.2 эВ, влияние примесных газов не учитывалось; положение электродов симметрично относительно нижней плоскости (см. Рис. 4); не учитывалось влияние остаточного газа в области вытягивания: в этом случае в области вытягивания не может образоваться электронов, компенсирующих объёмный заряд ионов. После прохождения заземлённого электрода объёмный заряд пучка с 99% эффективностью нейтрализовался.

На рисунке 4 представлена одноапертурная четырехэлектродная ИОС. Красные линии – траектории частиц, зелёные – эквипотенциали поля.

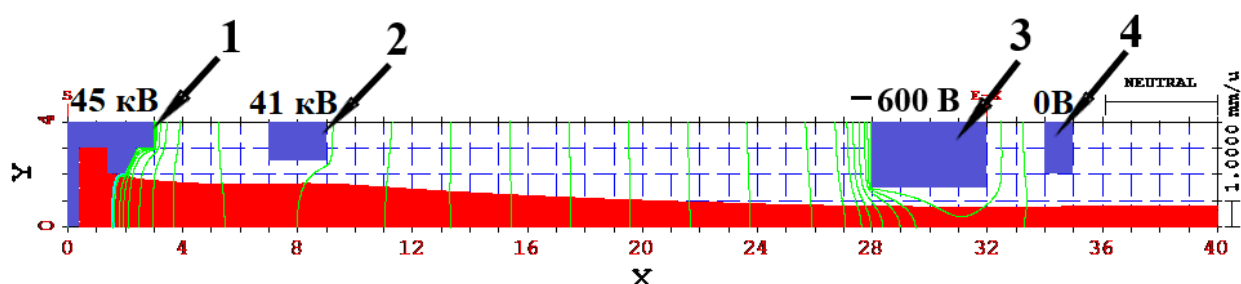


Рисунок 4 - моделирование формирования пучка в программе PBGuns. Красным показаны траектории частиц, зелёным – эквипотенциали.

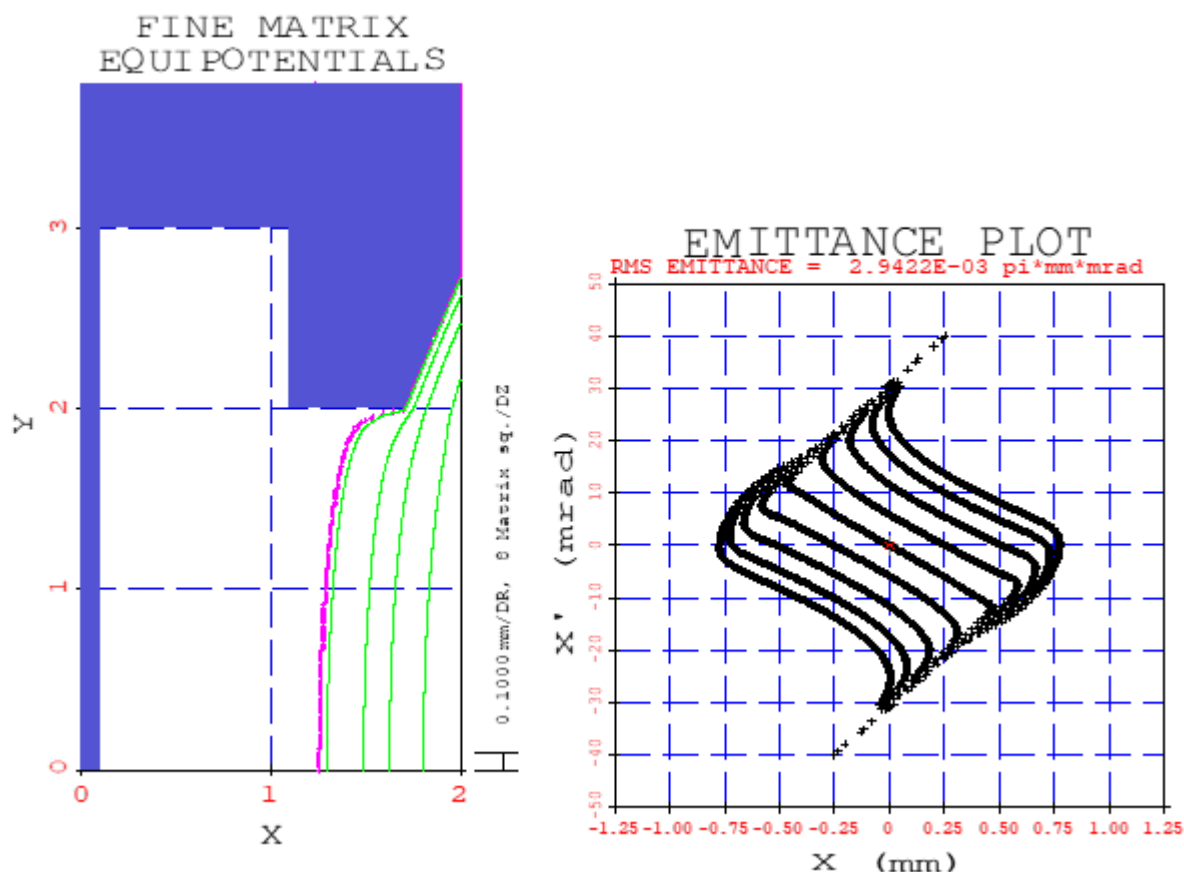


Рисунок 5 - форма плазменной границы (фиолетовая линия на картинке слева) и эмиттанс сформированного пучка

В модели с плазменного электрода (1) испускаются ионы необходимого газа с тепловой энергией и заданной плотностью тока. Далее ионы пролетают вытягивающий электрод (2), напряжение на котором подобрано таким образом, чтобы пучок достиг минимальной расходимости. Пролетая от плазменного до запирающего (3) электрода пучок ускоряется. После, сфокусированный и ускоренный пучок проходит через запирающий электрод, предназначенный для подавления потока электронов навстречу пучку ионов. Пролетая мимо последнего, заземлённого электрода (4), пучок попадает в тракт пучка, где происходит нейтрализация его объёмного заряда тепловыми электронами и дальнейшая транспортировка. На рисунке 5 представлены форма плазменной границы (слева) и эмиттанс пучка на выходе из ионно-оптической системы.



В результате моделирования получены зависимости угловой расходимости пучка от его плотности тока.

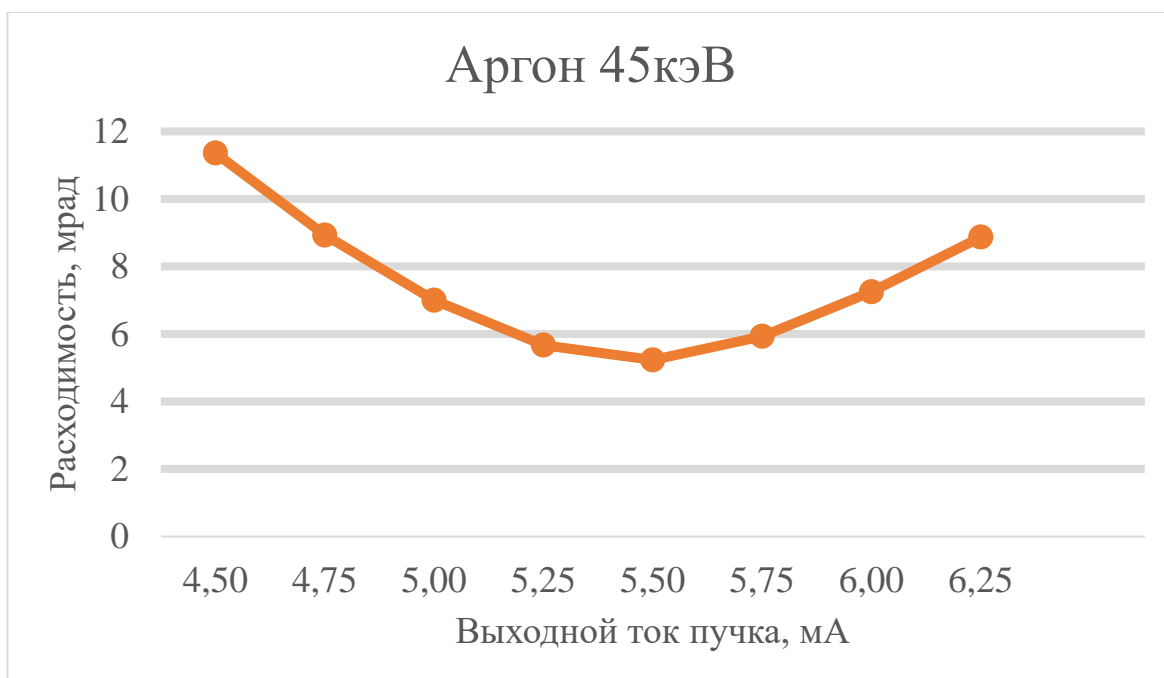


Рисунок 6 – расчётная угловая расходимость пучка ионов аргона при энергии ионов 45кэВ

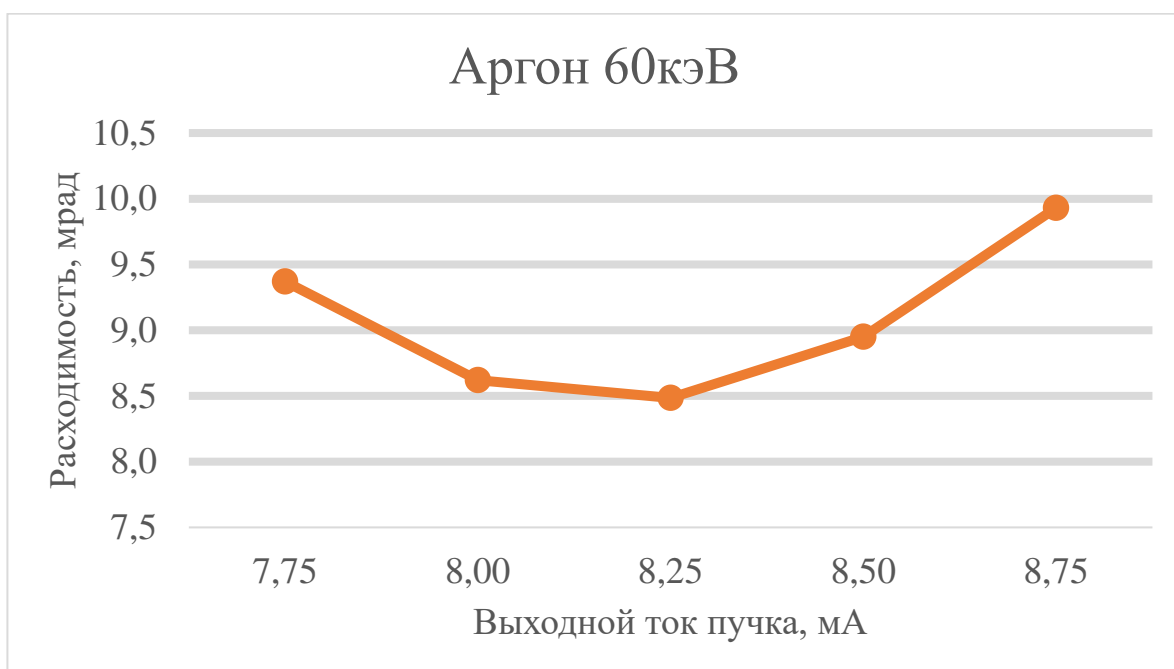


Рисунок 7 – расчётная угловая расходимость пучка ионов аргона при энергии ионов 60кэВ

Из приведённых зависимостей (Рис. 6 и 7) видно, что минимум расходимости достигается при токе пучка ~5.5 мА для энергии ионов 45 кэВ и ~8 мА для энергии 60 кэВ.

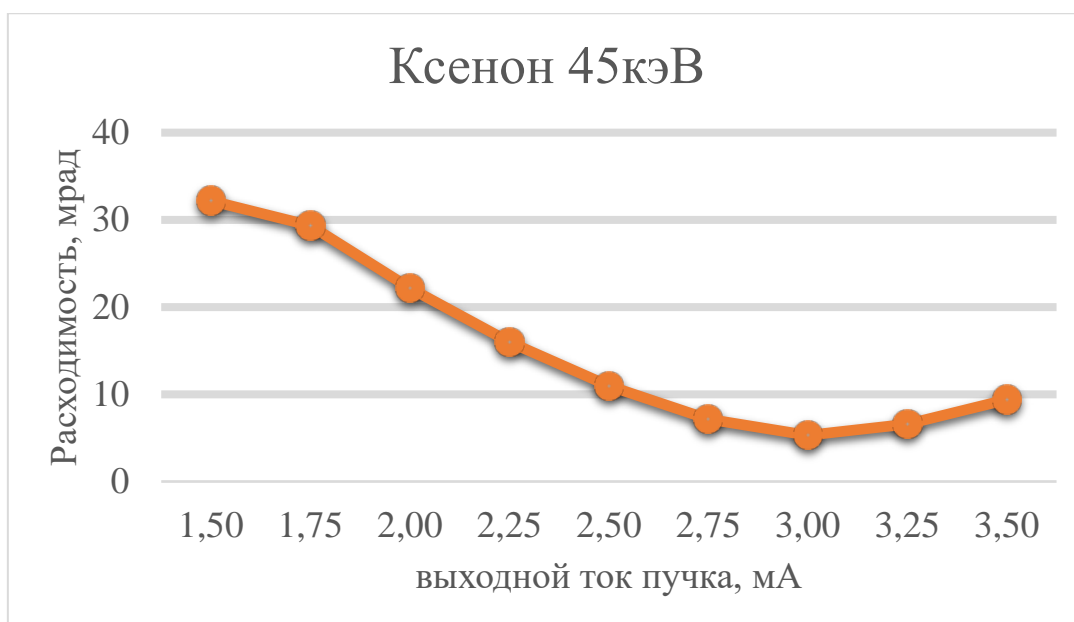


Рисунок 8 – расчётная угловая расходимость пучка ионов ксенона при энергии ионов 45кэВ

При моделировании формирования пучка ионов ксенона (Рис. 8) была получена минимальная угловая расходимость на уровне ~5 мрад при энергии 45 кэВ.

Угловая расходимость пучка ионов также зависит и от напряжения на вытягивающем электроде. Было проведено моделирование формирования пучка ионов ксенона и аргона, и получены зависимости расходимости пучка при различных напряжениях на вытягивающем электроде.

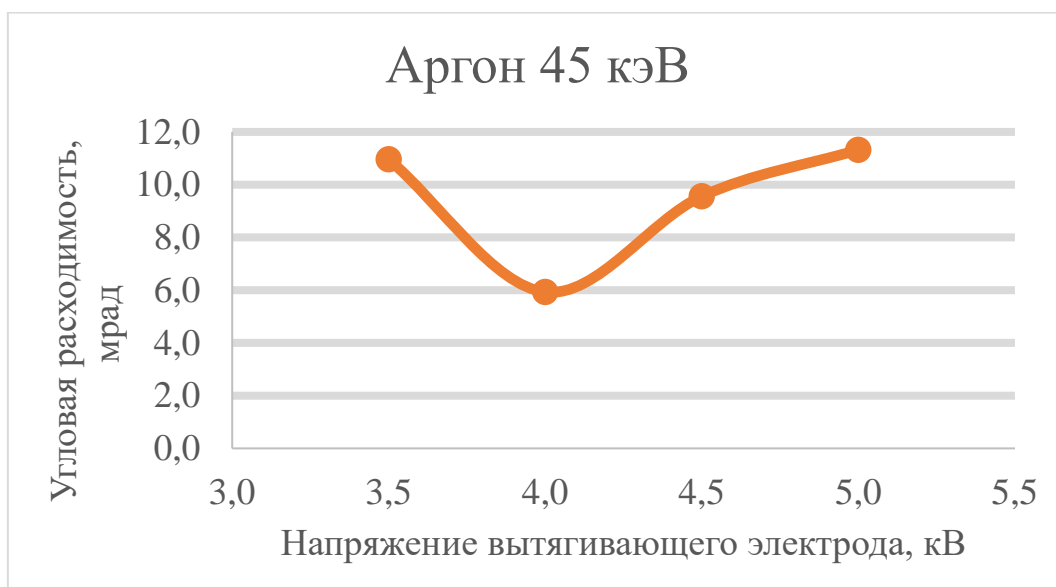
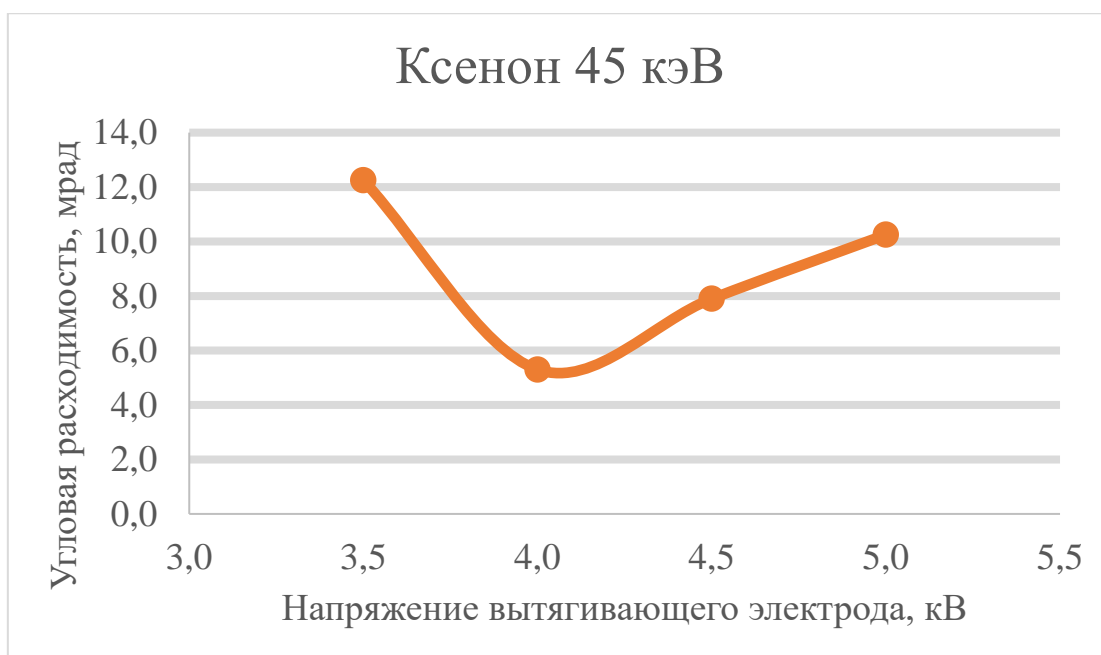


Рисунок 9 - зависимость угловой расходимости пучка аргона от величины напряжения на вытягивающем электроде



*Рисунок 10 - зависимость угловой расходимости пучка ксенона при различных напряжениях вытягивающего электрода*

Таким образом, оптимальная величина напряжения на вытягивающем электроде для аргона и ксенона составляет 4 кВ относительно напряжения на плазменном электроде (Рис. 9 и 10).

## Глава 3. Экспериментальная установка

Источник ионов изготовлен и собран, подготовлена система питания и управления. Проведено экспериментальное изучение работы – проверена работоспособность систем, произведён запуск и получена дуга.

Управление осуществляется при помощи компьютера, с установленной ЦАП/АЦП платой National Instruments (1) (Рис. 11). Сигнал установки параметров систем от платы NI попадает на плату (2). Она предназначена для перевода электрического сигнала в световой. Этот сигнал передаётся на ЦАП преобразуется обратно в электрический сигнал. Световой сигнал распространяется по системе световодов (пунктирные линии на рисунке). Декодированный сигнал приходит в управляемую систему (3), где происходит выставление нужного значения. Для контроля измерений, с системы снимается сигнал и подаётся на АЦП, преобразующий электрический сигнал в свет, аналогично плате (2). Получившийся сигнал по световодам приходит на плату (4), где преобразовывается обратно в электрический. Через АЦП сигнал выводится на экран компьютера. Такое преобразование сигнала из электрического в световой и обратно необходимо для гальванической развязки высоковольтной части и систем управления. По данной схеме происходит управление магнитной изоляцией и источника питания дугового генератора. Также плата (1) генерирует электрические сигналы: логические 0 и 1. Эти сигналы приходят на плату (5), где преобразуются в свет: 0 – светового сигнала нет, 1 – световой сигнал есть. Этот сигнал через световоды управляет запуском систем ИИ: 1 – происходит запуск и работа системы, 0 – выключение системы. Через USB по протоколу RS485 происходит управление высоковольтным блоком питания.

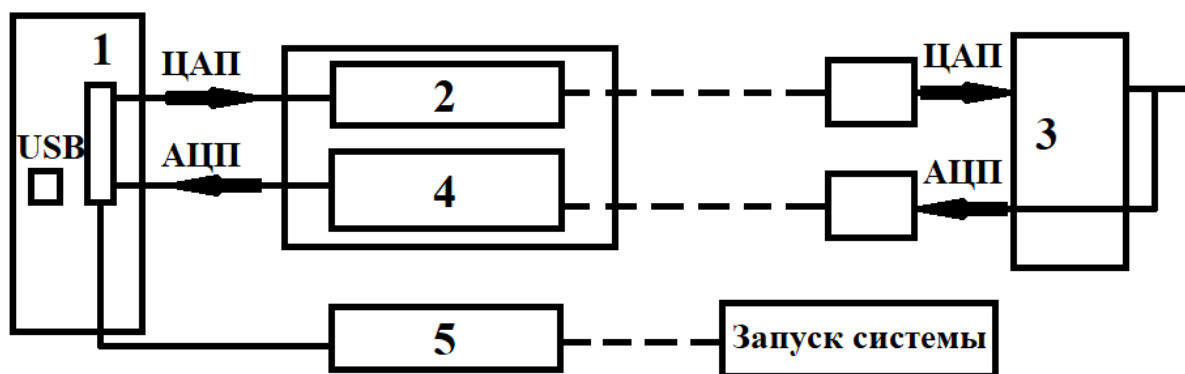


Рисунок 11 - схема управления системами III: 1 – плата NI; 2 – плата преобразования электрического сигнала в световой; 3 – управляемая система (магнитная изоляция или поджиг дуги); 4 – плата преобразования светового сигнала в электрический; 5 – плата преобразования электрического сигнала в логический световой (0/1)

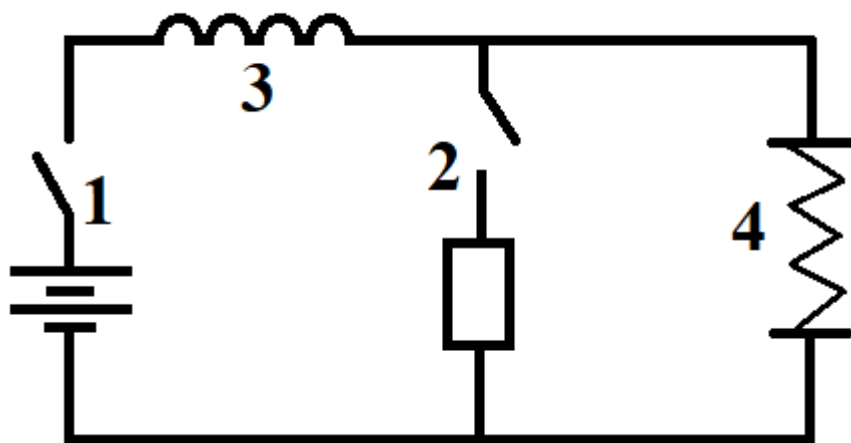


Рисунок 12 - система питания источника

На Рис. 12 представлен вид системы питания источника ионов. На блоке слева расположены высоковольтные источники питания. Выше расположен трансформатор, предназначенный для гальванической развязки между питанием плат и зарядкой батарей. Сразу над трансформатором расположена система батарей. На платах выше расположены развязки и блоки питания различных систем источника. На самой верхней плате провода соединяются с фидером и идут во вторую стойку (Рис. 12 справа).

В стойке, изображённой справа, находится делитель напряжения на вытягивающую сетку ионно-оптической системы. Делитель представляет собой две части – постоянную часть, и переменную. Изменением сопротивления переменной части можно добиться изменения потенциала сетки в пределах 5-15%. Также в блоке находятся делители, предназначенные для измерения диагностических сигналов диагностического комплекса. Для защиты ионно-оптической системы от рассеивания на ней высоких энергий в случае пробоя, внизу блока расположен дроссель, который рассеет на себе большую часть энергии.

На Рис. 13 схематично представлена цепь разгона и зажигания дуги на разрядном источнике. Вначале работы источника оба ключа 1 и 2 разомкнуты. Когда приходит сигнал начала разгона, оба ключа замыкаются и по цепи с сопротивлением начинает течь постоянный ток. Размыкание ключа 2 происходит в момент начала поджига дуги. При этом, запасённая в индуктивности 3 энергия приводит к импульсному увеличению разности потенциалов между катодом и анодом дугового генератора 4 на величину нескольких сотен вольт. Данный скачок разности потенциалов приводит к созданию постоянного тока электронов в дуговом канале генератора.



*Рисунок 13 - схема разгона и поджига дуги*

## Глава 4. Экспериментальное изучение

Для экспериментального изучения работы источника ионов необходимо измерять величину тока пучка во времени. Ток пучка определяется двумя способами: первый – снятие значения тока с блока питания высокого напряжения, и тока с коллектора, расположенного на выходе из ИОС. Второй – сбор пучка при помощи металлического коллектора, установленного на расстоянии  $\sim 0,5$  метра по пути движения пучка. Этот коллектор не является цилиндром Фарадея, в том смысле, что в нём не предусмотрено запирающее поле электронов вторичной эмиссии. Однако для определения характерной величины тока пучка и его изменения во времени этого способа достаточно.

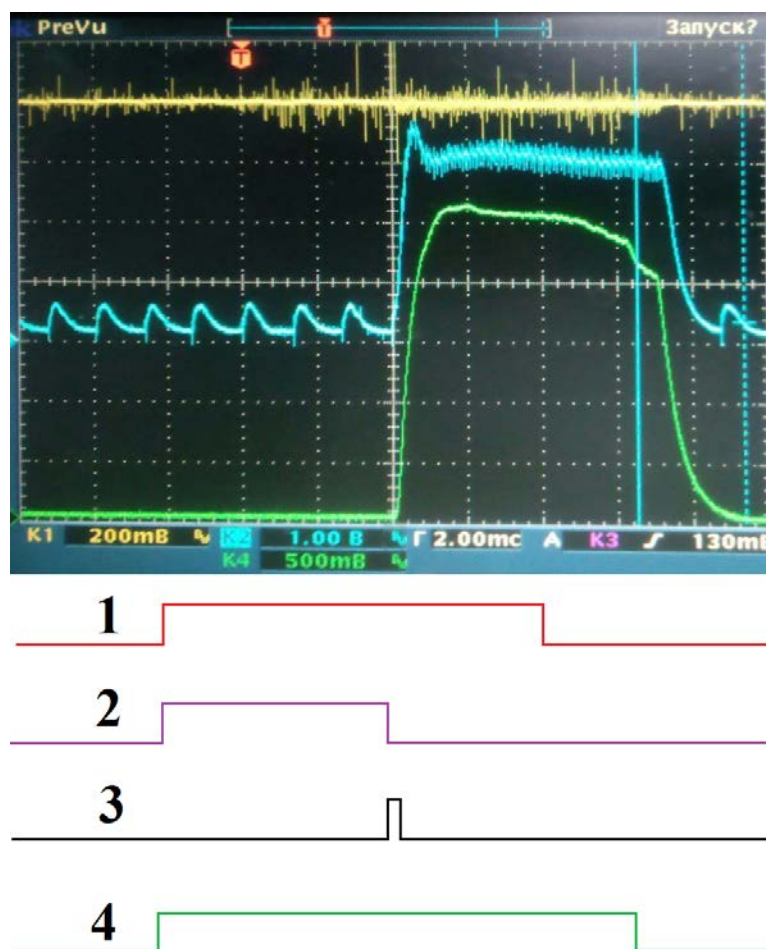


Рисунок 14 – осциллограммы токов с блока питания и коллектора; 1 – напуск газа в дуговой генератор, 2 – разгон генератора, 3 – поджиг, 4 – подача напряжения между катодом и анодом разрядного генератора.



На рисунке 14 представлены осциллограммы тока импульса пучка ионов. Ниже представлена хронология включения систем источника. В начале эксперимента открывается импульсный клапан (1), начинается разгон дуги (2) и подаётся напряжение между катодом и анодом дугового источника (4). Ток не наблюдается вплоть до запуска разряда между иглой и катодом (3), т.к. разряд создаёт плазму, электроны которой создают ток между катодом и анодом, а разгон дуги создаёт направленное движение электронов для упрощения пуска.

Верхняя осциллограмма (жёлтая линия) показывает величину высокого напряжения. Синяя осциллограмма показывает ток высоковольтного блока питания. Этот ток - максимально возможный ток пучка. При попытке получить ток пучка выше, энергии поля высокого напряжения не будет хватать для ускорения пучка ионов до необходимой энергии вследствие ограниченной мощности источника питания, и произойдёт падение напряжения.

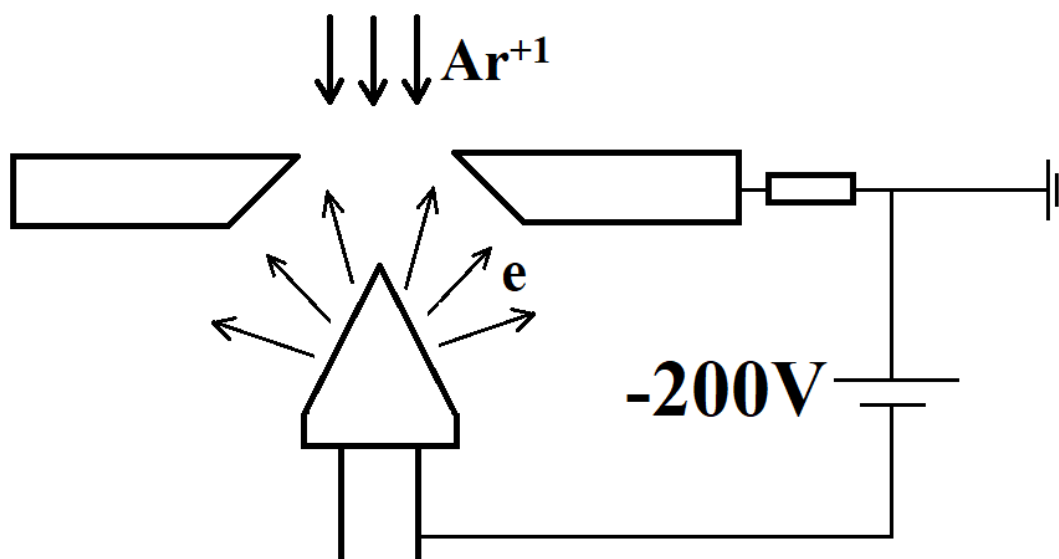
Зелёная линия – ток, снимаемый с коллектора. Форма импульса не является близкой к прямоугольной из-за ряда причин. Во-первых, так как электроны вторичной эмиссии ничем не удерживаются внутри коллектора, их вылет вносит вклад измерение тока пучка. Так же тренировка коллектора в процессе эксперимента может приводить к нестабильности снимаемого тока – вылетаемый с поверхности газ может попасть на соседнюю поверхность и образовать электроны эмиссии. При выключении дугового генератора на двух нижних осциллограммах наблюдается практически одновременное снижение уровня тока.

Для определения вклада встречного электронного тока в ионно-оптической системы в амплитуду тока блока питания, был проведён эксперимент, в ходе которого изучалось влияние изменения напряжения на запирающем электроде. При характерном токе источника питания в 160 ампер и ниже изменение запирающего напряжения не влияло заметно на величину

тока пучка. Однако при повышении тока источника начали наблюдаться пробои, которые пропадали при повышении запирающего напряжения.

Приведённые эксперименты позволили определить эффективность работы источника ионов – значение тока на выходе и стабильность работы системы, нахождение режимов работы без пробоев. Однако, для определения пространственного распределения пучка, использование цилиндра в качестве коллектора недостаточно.

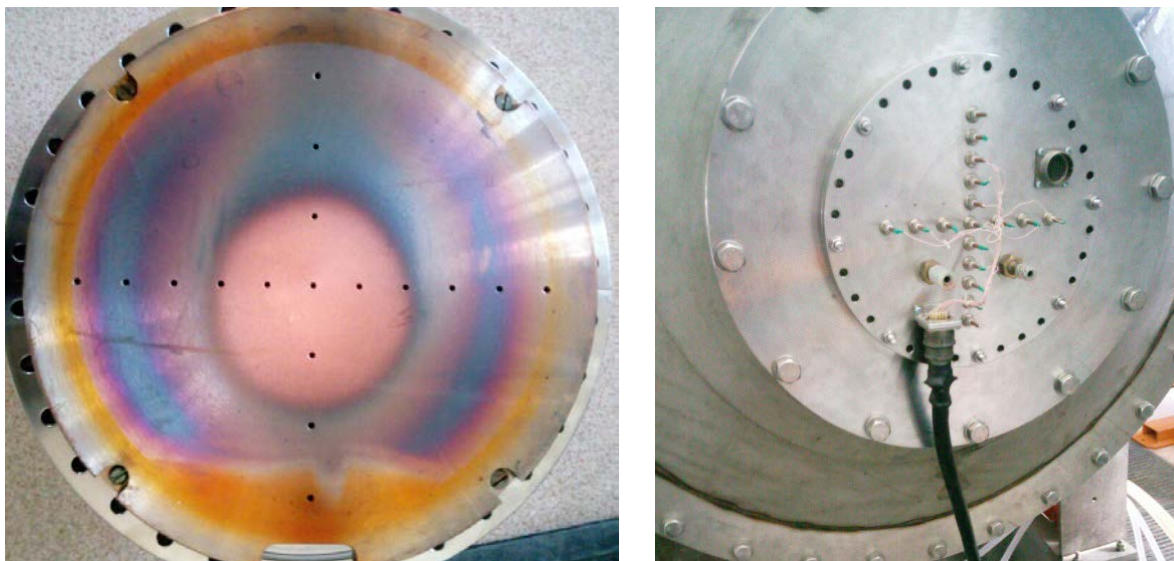
Для решения данной проблемы было предложено использовать набор вторично-эмиссионных датчиков, расположенных на большом расстоянии от выхода из системы.



*Рисунок 15 - схема работы датчика*

Схема работы датчика (Рис. 15): при попадании ионов на вторично-эмиссионный датчик, с последнего начинают эмитироваться электроны. Ток с датчика пропорционален току ионов, попадающих на него. Сам датчик находится под отрицательным напряжением  $-200\text{В}$  для того, чтобы эмитированные электроны не возвращались на датчик. Измеряемый датчиками ток даст картину пространственного распределения пучка ионов. Данный эксперимент, помимо определения профиля пучка, позволит понять, насколько точно расположены источник по отношению к мишени.

На рисунке 16 представлена фотография сборки датчиков, которая будет использоваться в эксперименте по определению поперечного профиля пучка.



*Рисунок 16 – сборка вторично-эмиссионных датчиков: общий вид, и установленная в рабочий объём*

Справа представлена сборка датчиков, подключенная к блоку измерений. Расположена система на расстоянии трёх метров от источника ионов. В настоящее время готовится эксперимент по измерению пространственных характеристик пучка с использованием данной сборки.

## Заключение

1) Разработан источник ионов, приведена его принципиальная схема и проведено численное моделирование процессов формирования пучка ионов. В результате моделирования определены оптимальные значения тока пучка для его наименьшей расходимости, а также значения напряжения на фокусирующем электроде.

2) Были проведены испытания и настройка источника питания и источника ионов, подобраны оптимальные параметры запуска и работы.

3) Проведены эксперименты по определению тока пучка. Измерены зависимости токов блока питания и коллектора, расположенного напротив ионно-оптической системы. Изучена работа системы питания при различных параметрах.

4) В настоящее время готовятся эксперименты по изучению пространственных характеристик пучка.

## Литература

- 1) P. A. Bagryansky, A. V. Anikeev, G. G. Denisov, E. D. Gospodchikov, A. A. Ivanov, A. A. Lizunov, Yu. V. Kovalenko, V. I. Malygin, V. V. Maximov, O. A. Korobeinikova, S. V. Murakhtin, E. I. Pinzhenin, V. V. Prikhodko, V. Yu. Savkin, A. G. Shalashov, O. B. Smolyakova, E. I. Soldatkina, A. L. Solomakhin, D. V. Yakovlev, and K. V. Zaytsev, *Nucl. Fusion* 55, p. 053009 (2015).
- 2) P. A. Bagryansky, A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov, A. A. Lizunov, V. V. Maximov, V. V. Prikhodko, E. I. Soldatkina, A. L. Solomakhin, and D. V. Yakovlev, *Phys. Rev. Lett.* 114, p. 205001 (2015).
- 3) V. V. Prikhodko, V. I. Davydenko, A. A. Ivanov and A. V. Kolmogorov, «Heavy Ion Beam Probe for Measurements of Plasma Potential Profile in GDT Device»
- 4) А.Т. Форрестер «Интенсивные ионные пучки» Москва 1992;
- 5) Я. Браун «Физика и технология источников ионов» Москва Мир 1998;