

**Министерство образования
Российской Федерации
Новосибирский государственный университет
Физический факультет
Кафедра физики плазмы**

Квалификационная работа на соискание степени магистра

Мощный атомарный инжектор с фокусировкой пучка

Сорокин Алексей Валерьевич

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с. Дейчули П.П.

Новосибирск – 2003

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ	5
1.1 Источники плазмы. Дуговой генератор плазмы	5
1.2 Формирование однородного плазменного эмиттера протонов.....	8
1.3 Особенности отбора ионов с поверхности плазмы	10
1.4 Ионно-оптические системы формирования ионных пучков с малой расходимостью.....	11
2 НАГРЕВНОЙ ИНЖЕКТОР СТАРТ – 4	18
2.1 Цели создания нового инжектора	18
3.2 Конструкция основных узлов инжектора.	22
3.3 Ионно-оптическая система	23
3.4 Система питания для стендовых испытаний инжектора.....	26
3 СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НАГРЕВНОГО ИНЖЕКТОРА	27
4.1 Измерение электрических параметров инжектора.....	29
4.2 измерение параметров пучка.....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
ЛИТЕРАТУРА	36

Введение.

В настоящее время в исследованиях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу широко применяются интенсивные пучки высокоэнергетических ионов и атомов. Сильноточные пучки ионов и атомов водорода (дейтерия) служат для создания и нагрева плазмы до термоядерных температур в установках с магнитным удержанием плазмы. Инжекторы быстрых частиц для термоядерных установок стали развиваться с началом строительства магнитных ловушек. В 70-е годы необходимость создания средств безындукционного нагрева плазмы в токамаках послужила стимулом для большого прогресса в развитии инжекторов. Мощность систем инжекции в первых токамаках составляла десятки киловатт, в современных системах она достигает десятки мегаватт. В проектах демонстрационных термоядерных реакторов рассматриваются мощности систем инжекции до 100 МВт. Диапазон энергий атомов – от десятков до сотен кэВ, эквивалентные токи пучков – от долей ампера до ста ампер.

Инжекторы в термоядерных установках могут выполнять несколько задач:

1. Нагрев плазмы до термоядерных температур в замкнутых магнитных системах (токамаках и стеллараторах); создание высокотемпературной плазмы в открытых ловушках).
2. Ввод «топлива» в термоядерную установку.
3. Управление интенсивностью протекания термоядерной реакции.

Параметры инжекционных систем и предъявляемые к ним требования зависят от назначения установки: мощность инжекции определяется задачами эксперимента; энергия инжектируемых частиц E_0 определяется главным образом размерами установки, требуемой глубиной проникновения частиц; длительность импульса инжекции $t_{\text{и}}$ колеблется от миллисекунд до десятков секунд. Кроме указанных параметров важную роль играют энергетический спектр пучка частиц, вводимых в установку, а также потоки примесей тяжелых частиц и сопутствующего газа.

Важным параметром является разброс энергий инжектируемых частиц и содержание молекулярных фракций – соотношение $^1\text{H}^+$, $^2\text{H}^+$, $^3\text{H}^+$. Наличие примеси тяжелых элементов в инжектируемом пучке может влиять на $Z_{\text{эф}}$ плазмы.

Поток сопутствующего газа из инжектора в магнитную ловушку весьма критичен для открытых ловушек (менее 10^{-3} потока быстрых частиц) и менее критичен для токамаков (до 10%). Это накладывает определенные требования на геометрию инжекционного тракта и средства вакуумной откачки.

Инжекционная система термоядерной установки состоит из определенного числа одновременно работающих автономных инжекторов, обеспечивающих необходимую мощность P_0 . В каждом инжекторе располагается модульный ионный источник со своей системой электрического питания.

Применяются две различные принципиальные схемы инжекторов: получение атомов путем перезарядки положительных ионов и получение атомов путем преобразования отрицательных ионов. Первый метод эффективен для получения пучков нейтральных частиц в области до 200 кэВ, второй – 200 кэВ и выше. Зависимость перезарядки на равновесной мишени от энергии частиц приведена на рисунке 1.

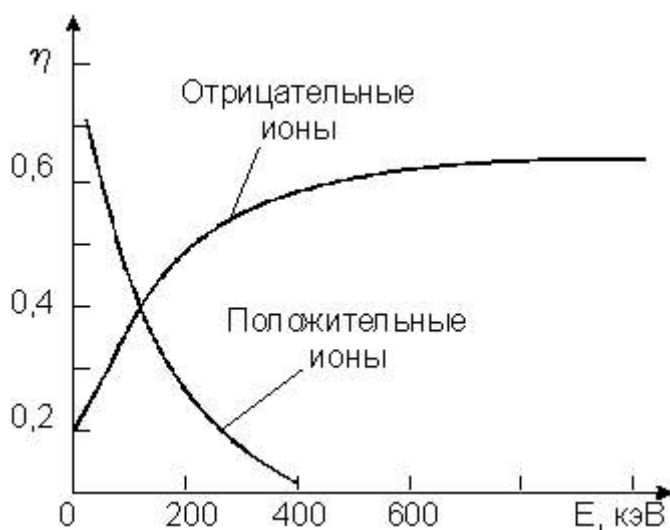


Рисунок 1. Коэффициент перезарядки на равновесной мишени для ионов водорода.

В инжекторе на основе положительных ионов первичный ионный поток с номинальной энергией E_0 перезарядается, проходя через нейтрализатор (перезарядную мишень). Образовавшийся поток быстрых атомов направляется в термоядерную установку, а оставшиеся ионы отклоняются с помощью магнитного поля.

В инжекторе на основе отрицательных ионов источник создает и формирует поток отрицательных ионов низкой энергии E_1 . В системе доускорения отрицательные ионы приобретают номинальную энергию E_0 . Затем на специальной мишени (газовой, парометаллической, плазменной или лазерной) происходит “обдирка” отрицательных ионов (отрыв электрона), и образовавшийся поток атомов вводится в термоядерную установку. Оставшаяся небольшая часть ионов отклоняется магнитным полем.

В целом источники положительных ионов относительно просты и для них развита технология, однако их эффективность сильно падает по мере увеличения энергии частиц. Поэтому при высокой энергии (свыше 200 кэВ) энергетически выгодными становятся более сложные инжекторы на основе отрицательных ионов.

К настоящему времени сложилась унифицированная структура инжектора. Элементы ионно-атомного тракта размещаются в крупногабаритной вакуумной камере прямоугольной или цилиндрической формы. На торце камеры устанавливается один или несколько ионных источников. Камера нейтрализатора непосредственно примыкает к ионному источнику. Равновесная перезарядная мишень образуется на газе, вытекающем из ионного источника, либо формируется дополнительным импульсным клапаном.

Ионный источник состоит из двух функциональных узлов: источника плазмы (газоразрядной камеры), в которой создается плазменный эмиттер ионов, и электростатической ионно-оптической системы (ИОС), в которой происходит извлечение ионов из плазмы, их ускорение и формирование направленного пучка.

В Институте Ядерной физики проводятся интенсивные работы по созданию инжекторов для термоядерных установках института: ГДЛ и АМБАЛ. Были созданы целые серии как нагревных, так и диагностических инжекторов и накоплен большой опыт в их разработке и изготовлении. В данной дипломной работе описан разработанный в ИЯФ образец нового нагревного инжектора, серия которых в будущем будет использоваться для нагрева плазмы на установке ГДЛ.

1. Ионные источники.

1.1 Источники плазмы. Дуговой генератор плазмы.

Распространенная схема источников водородных ионов с токами в десятки ампер и более – использование несамостоятельного разряда с системой термоэмиссионных катодов в которых плазменный эмиттер формируется газовым разрядом, горящим в водороде при давлении ~ 1 Па и локализованным в объеме, непосредственно примыкающем к ионно-оптической системе (ИОС). Их недостатком является невысокая надежность прямонакаливаемых термокатодов и сравнительно высокая плотность газа в области ИОС $\sim 3 \cdot 10^{14}$ мол/см³. Относительно высокое давление газа в разрядной камере приводит к сравнительно большому (в десятки процентов) содержанию в первичном ионном пучке нежелательных примесей молекулярных ионов.

В используемых в ИЯФ генераторах плазмы с дуговым разрядом и холодным катодом [1÷5], создается плазменная струя с эквивалентным потоком плазмы в сотни ампер и с длительностью до десятых долей секунды. Благодаря высокой плотности плазмы ($n_e \approx 10^{14} \div 10^{15}$ см⁻³) содержание молекулярных ионов водорода в таких источниках мало (< 5 %) и практически отсутствуют элементы материалов электродов,

распыляемых разрядом. Схематический рисунок дугового генератора плазмы изображен на рисунке 3.

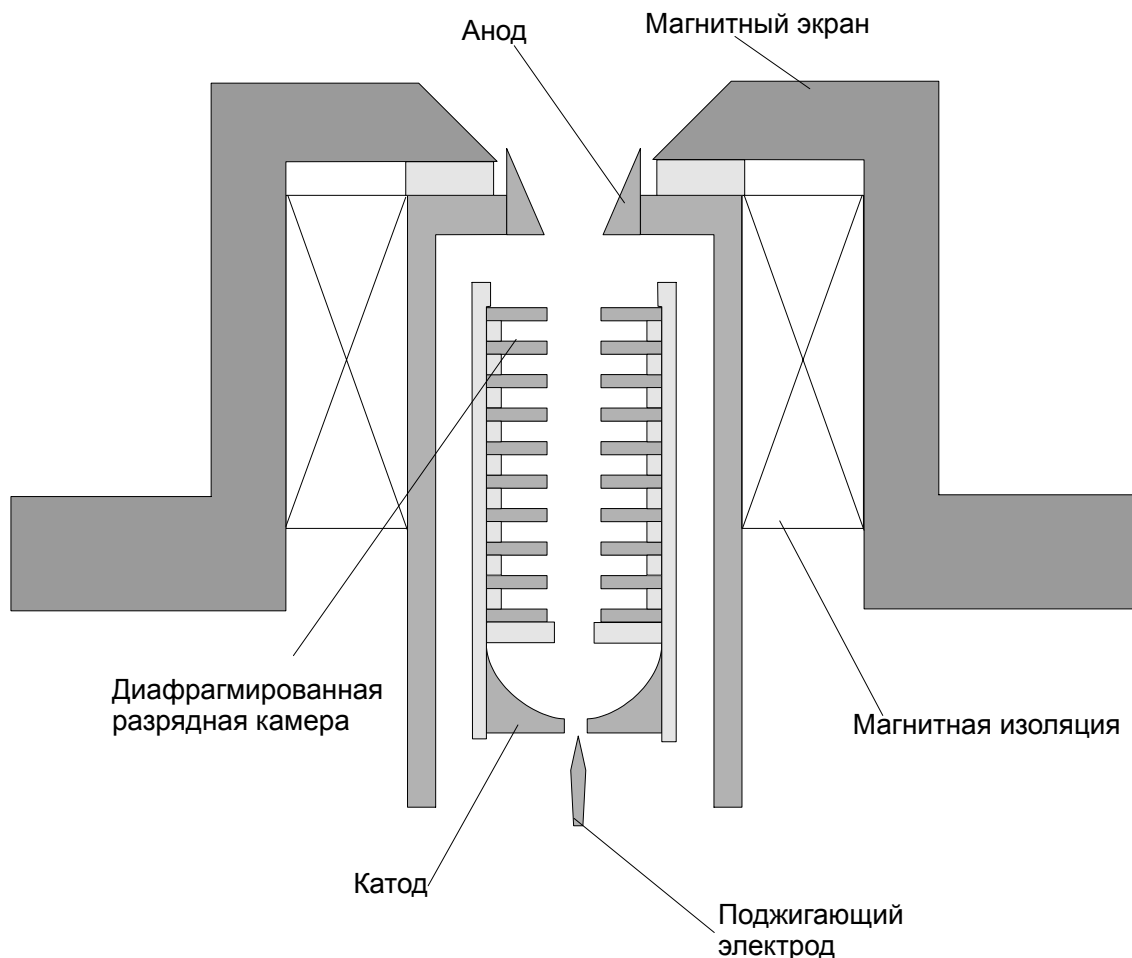


Рисунок 2. Схематический чертёж дугового генератора плазмы.

Цилиндрический дуговой канал (длиной ~ 3 см) на большей части своей длины диафрагмирована металлическими изолированными шайбами, со своим диаметром отверстий для каждого типа генератора плазмы. Отверстие в аноде конической формы. С противоположной по отношению к аноду стороны катода расположена вспомогательная разрядная (искровая) камера, которая служит для поджига разряда в основной газоразрядной (дуговой) камере. После импульсного (длительностью $\sim 0,5$ мс) напуска порции водорода в газоразрядную камеру через искровую камеру в последней производится электрический пробой газа подачей короткого (~ 5 мкс) высоковольтного (~ 5 кВ) импульса напряжения между поджигающим электродом и катодом. Искра инициирует дуговой разряд в газоразрядной камере, который поддерживается генератором тока разряда в несколько сотен ампер. Образовавшаяся в прианодной области разряда плазма собственным давлением вытесняется через отверстие в аноде и

образует на выходе из него расширяющуюся плазменную струю, которая потом используется для формирования плазменного эмиттера ионов. Внешним соленоидом и магнитным экраном в анодной области разряда создается продольное магнитное поле около 1 кГс. В устойчивом режиме разряда во внешнем магнитном поле выход плазмы из анодного отверстия увеличивается более чем в 3 раза по сравнению с разрядом без магнитного поля при неизменной мощности питания разряда. Железный экран экранирует область расширения струи от магнитного поля.

Для поддержания устойчивой генерации выходящего плазменного потока необходимо наличие водорода с плотностью 10^{15} мол/см³ в прианодной области, окружающей разрядный столб. При импульсной работе (с длительностью до нескольких миллисекунд) оказывается достаточно водорода, накопившегося в прианодной области перед началом разряда. При недостаточной плотности водорода в прианодной области происходит эрозия прианодной диафрагмы и анода.

Неустойчивость разряда возникает при превышении критического значения магнитного поля, зависящего от тока разряда. В квазистационарном режиме работы поддержание необходимой плотности водорода в прианодной области производится непрерывным поддувом газа непосредственно в прианодную область.

Для получения устойчивого осесимметричного разряда большое значение имеет его диафрагмирование, а также хорошая аксиальная симметрия газоразрядной камеры и токоподводов. При токах разряда в сотни ампер происходит распыление катода в блуждающих на его поверхности катодных пятнах разряда. Распылённый в виде отдельных кусочков металл катода оседает на ближайших к катоду диафрагмах. Испарившиеся в катодных пятнах атомы металла ионизируются в прикатодной области и частично возвращаются на катод, а частично на прикатодные диафрагмы в виде ионов, где последние рекомбинируют в атомы и прилипают к поверхности. Дуговое распыление материала катода ограничивает ресурс работы дугового генератора. Достоинством дуговых генераторов плазмы является их сравнительная простота, надежность катодного узла, дешевизна, малая энергетическая цена иона в генераторах с внешним магнитным полем. Особенно следует выделить ионный состав плазменной струи. Доля атомарных ионов близка к 100 % в отличие от газоразрядных камер, где типичная величина доли атомарных ионов $\leq 60 - 75$ %. К недостаткам дуговых генераторов плазмы прежде всего следует отнести сравнительно невысокий ресурс катодного узла в квазистационарном режиме работы с длительностью импульсов в десятые доли секунды.

1.2 Формирование однородного плазменного эмиттера протонов.

При разработке сильноточных атомарных инжекторов для создания или нагрева плазмы в магнитных ловушках, как правило, не стоит задача обеспечения высокой яркости первичного ионного пучка. Вполне приемлемы для этой цели пучки с плотностью тока эмиссии в доли ампер на квадратный сантиметр и угловой расходимостью, соответствующей тепловым скоростям ионов плазмы с температурой в $5 \div 10$ эВ. Дуговые генераторы плазмы обеспечивают достаточно высокую энергетическую и газовую эффективность генерируемых плазменных струй при высоком содержании моноатомных ионов в плазме – свыше 90 %. Однако при этом плотность потока ионов в струе вытекающей плазмы сильно неоднородна, что усложняет формирование из такого эмиттера слаборасходящегося ионного пучка. Для формирования высокоинтенсивных ионных пучков желательно иметь высокую однородность эмиссии на его поверхности с площадью в сотни квадратных сантиметров. Для создания однородного плазменного эмиттера, использующего большую часть вытекающей из дугового генератора плазмы, применяется отражение плазменного потока периферийным магнитным полем. Один из способов создания периферийного магнитного поля состоит в возбуждении магнитного поля током прозрачной тороидальной обмотке – “магнитной стенке” (рис 4).

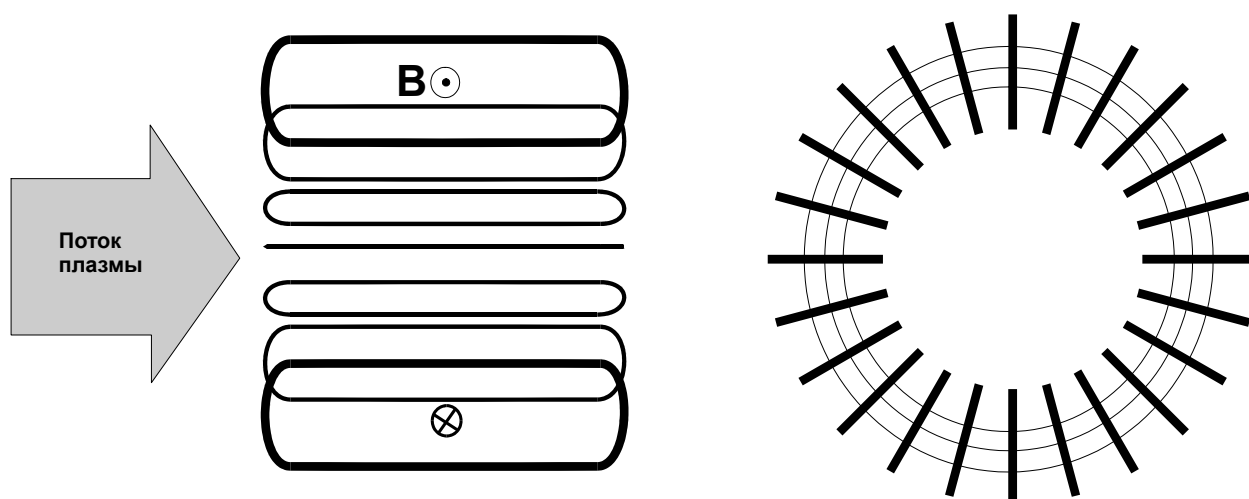


Рисунок 3. Схема токовой магнитной стенки.

В результате отражения магнитным полем стенки плазменной струи в основной части эмиттера плотность потока ионов возрастает более чем в два раза. При этом в основной части эмиттера, где неоднородность плотности ионного тока не превосходит

$\pm 10 \%$, сосредоточено свыше 60% полного потока плазмы, создаваемой дуговым генератором.

В качестве “магнитной стенки” можно использовать высоко-мультипольное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами. Такая магнитная стенка хоть и менее эффективна, чем токовая магнитная стенка, однако более проста в изготовлении и не нуждается в питании. Последнее обстоятельство начинает сильно сказываться при длительностях работы свыше нескольких мс, т.к. питание витков токовой МС на большие длительности становится достаточно сложным. На рисунке 5 представлена схема мультипольной магнитной стенки на постоянных магнитах и структура магнитного поля в ней. Магниты расположены на одинаковом радиусе от центра расширительной камеры с одинаковым шагом по азимуту. Вектор намагниченности каждого магнита направлен вдоль радиуса, при этом полярность магнитов чередуется. В такой конфигурации магнитов магнитное поле представляет собой как бы зубцы, направленные внутрь объёма. При этом радиус, на котором расположены магниты, должен быть таким, чтобы поле зубцов не перекрывалось с первой сеткой ИОС. Это необходимо для того, чтобы та часть потока плазмы, которая будет неоднородной по азимуту, не попадала на ИОС. Неоднородность по азимуту образуется на зубцах из-за движения ионов в магнитном поле разной направленности. По внешнему радиусу магниты окружены магнитопроводом, который замыкает магнитный поток и усиливает поле на поверхности магнитов.

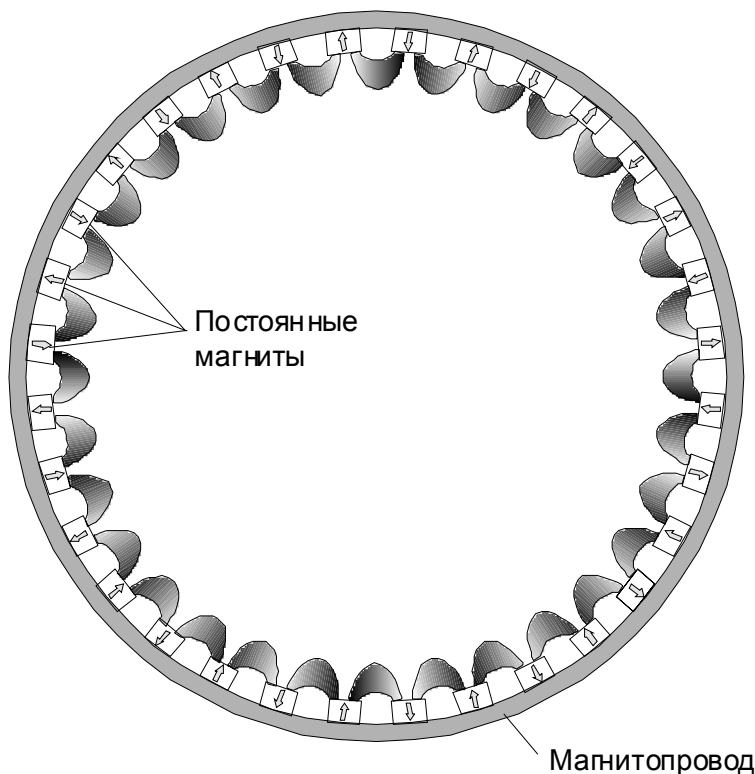


Рисунок 4. Схема магнитной стенки на постоянных магнитах.

1.3 Особенности отбора ионов с поверхности плазмы.

Как известно для электронной эмиссии выражение для плотности тока,

ограниченного объёмным зарядом:
$$j_e = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{U_0^{3/2}}{d^2} \quad (4)$$

Механизм установления предельной плотности тока с повышением потенциала связан с происходящим при этом уменьшением глубины потенциального барьера $\Delta U_{\text{мин}}$. При дальнейшем увеличении U_0 во всем межэлектродном пространстве нет тормозящего электроны поля и, следовательно, все испускаемые электроны приходят на анод, а ток в цепи равен току эмиссии катода. Происходит переход от тока, ограниченного объёмным зарядом, к току насыщения.

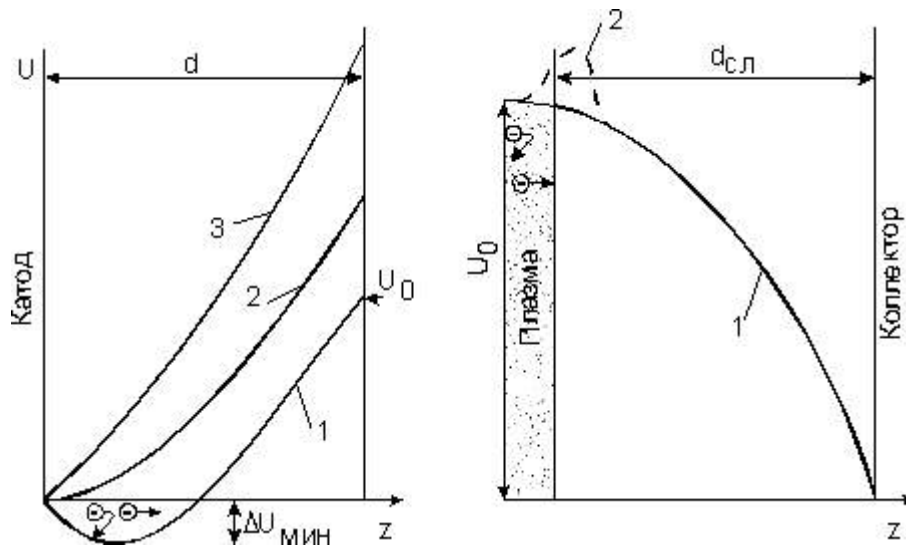


Рисунок 5. Распределение потенциала в диоде с накаливаемым катодом при различных значениях анодного потенциала (кривые 1–3) и в слое между плазмой и коллектором, находящимся при отрицательном потенциале - кривая 1, (кривая 2 образоваться не может).

Иначе происходит отбор положительных ионов из плазменного эмиттера – источника зарядов обоих знаков. Предположим, что в плазму введен коллектор, имеющий по отношению к ней отрицательный потенциал. При достаточно большом значении этого потенциала электроны возвращаются в плазму, а коллектор собирает только положительные ионы. Между коллектором и образующейся границей плазмы возникает слой движущихся ионов. По определению, плазма квазинейтральна ($n_+ \approx n_e$) и электрическое поле в ней очень мало. Вне плазмы имеется объёмный заряд ионов, движущихся к коллектору. Однако максимум потенциала, который аналогично минимуму для электронов служил бы потенциальным барьером для ионов и ограничивал их ток, в этом случае образоваться не может: его немедленно сгладит приток электронов из плазменного эмиттера. Таким образом, при отборе ионов из плазмы истинного ограничения тока объёмным зарядом быть не может. Все ионы,

направляющиеся из плазмы к её границе, уходят на коллектор – всегда идет ток насыщения. Плотность тока (A/cm^2) ионов, уходящих из плазмы, – плотность тока “ионной эмиссии плазмы” – пропорциональна плотности ионов и скорости, которую они приобретают на границе плазмы: $j_+ = 0,4en_+ \cdot (2\chi T_e/M)^{1/2} = 8 \cdot 10^{-16} n_+ (T_e/\mu)^{1/2}$ (5).

Ионная эмиссия зависит от температуры электронов, а не ионов, потому что в действительности в плазме, вблизи её границы существует электрическое поле, возвращающее электроны в плазму и, следовательно, ускоряющее ионы в этой области. Таким образом, ионы приобретают начальную скорость, зависящую от T_e . Несмотря на отсутствия ограничения тока объёмным зарядом, закон “3/2” действителен и в случае отбора ионов из плазменного эмиттера – ведь электрическое поле на его границе равно нулю. Для ионов этот закон можно представить выражением $j_+ = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U_0^{3/2}}{d_{cl}^2}$ (6), где

M – масса иона; d_{cl} – ширина слоя ионного объёмного заряда, отделяющего коллектор ионов от границы плазмы. Однако изменение U_0 теперь влияет не на плотность ионного тока, которая зависит только от параметров плазмы, а лишь на d_{cl} , т.е. приводит к

перемещению границы плазмы: $d_{cl} = \frac{1}{(9\pi)^{1/2}} \left(\frac{2e}{M}\right)^{1/4} \frac{U_0^{3/4}}{j_+^{1/2}}$ (7).

Таким образом, основной особенностью плазменного эмиттера ионов является отсутствие ограничения тока объёмным зарядом. Положение, а в реальных условиях и форма плазменного эмиттера, существенно зависят от плотности тока ионной эмиссии j_+ и разности потенциалов U_0 .

1.4 Ионно-оптические системы формирования ионных пучков с малой расходимостью.

Конструктивная схема ИОС ионных источников представляет собой многоапертурную, трёх- или четырёхэлектродную, электростатическая система извлечения, ускорения и формирования ионного пучка. Оптимальной для получения ионного пучка с малой расходимостью является ИОС с большим количеством отдельных ячеек. При этом каждая ячейка служит независимым источником элементарного пучка.

К настоящему времени наибольшее распространение получили ИОС с круглыми или прямолинейными щелевыми ячейками с профилированными электродами. Одной из первых ионно-оптических систем, формирующей интенсивный протонный пучок из газоразрядной плазмы, является предложенная и исследованная в начале 70-х годов в ИЯФ трёхэлектродная мелкоструктурная сеточная система [4÷6] - (рисунок 6).

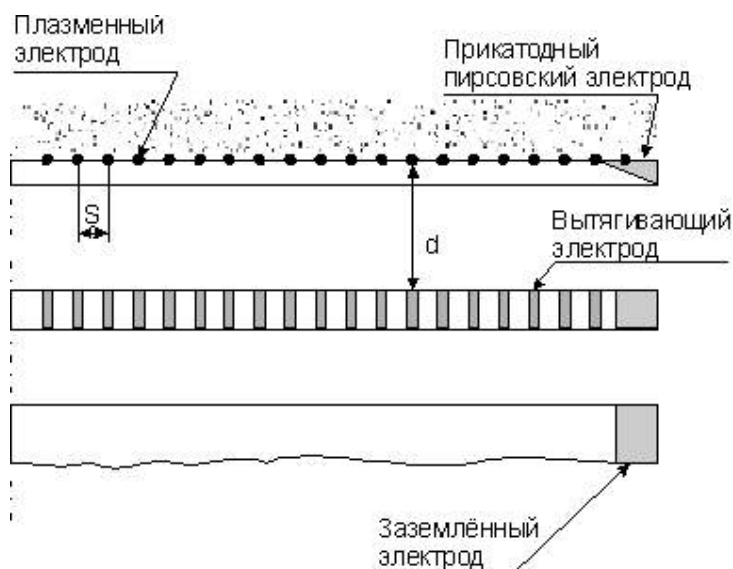


Рисунок 6. Трехэлектродная мелкоструктурная сеточная ионно-оптическая система.

Приосевая часть плазменной струи падает по нормали на плазменный (эмиссионный) электрод, образованный параллельными металлическими проволочками и находящийся под плавающим потенциалом. Эмиссионная поверхность ограничивается диафрагмой, установленной вплотную к выходной поверхности плазменного электрода. Внутренние края этой диафрагмы скошены для улучшения оптических свойств на краю пучка. Второй (вытягивающий) электрод изготовлен из параллельных пластинок, установленных точно против проволочек плазменного электрода. Вытягивающее напряжение подается между анодом генератора плазменной струи и вытягивающим электродом. На вытягивающий электрод подаётся отрицательное смещение (несколько сот вольт) относительно третьего заземленного выходного электрода без щелей (выходной трубки). Отрицательный потенциал предотвращая попадание электронов, компенсирующих пространственный заряд ионного пучка в вытягивающий промежуток, значительно снижает ток в нём.

При некоторой оптимальной плотности тока протонной эмиссии, выражающейся в форме закона “ $3/2$ ”, угловая расходимость пучка, минимальна. Этот факт можно объяснить исходя из представлений о формировании плазменной границы при вытягивании электрическим полем ионного пучка из плазмы. Основное отличие формирования ионных пучков из газоразрядной плазмы от задач электронной термоэмиссионной оптики состоит в отсутствии жёстко заданной эмитирующей поверхности. Геометрическая форма плазменной границы при этом определяется решением уравнения Пуассона с нефиксированной поверхностью ионного эмиттера, на которой электрическое поле обращается в нуль при заданных плотности тока эмиссии j и потенциалах плазмы и электродов ИОС. Зависимость угловой расходимости пучка в

сеточной ИОС от плотности потока плазмы может быть объяснена изменением формы плазменной границы. При шаге сеток $S \ll d$ и радиусе r_0 нитей первой сетки $r_0 \ll S$ граница плазмы близка к плоской и совпадает с плоскостью первой сетки при $j = j_{\text{опт}}$. Если $j < j_{\text{опт}}$, то плазменная граница между нитями сетки становится вогнутой, при возрастании j выше оптимального значения плазменная граница между нитями сетки прогибается в вытягивающий промежуток. В обоих случаях при $j \neq j_{\text{опт}}$ граница плазменного эмиттера не является плоской, что ведет к значительной расходимости пучка в направлении перпендикулярном нитям сетки.

Трехэлектродные ИОС имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение диапазоном достаточно коротких импульсов тока $\leq 10^{-3}$ сек и низкой энергией пучков ~ 10 кэВ. Эти ограничения связаны с тем, что, используя мелкоструктурную многоапертурную систему с $r_0 \ll S \ll d$ для получения пучка с малой угловой расходимостью при достаточно высокой плотности тока в доли ампера на см^2 , приходится делать тонкие ажурные электроды с толщиной нитей в сотые доли миллиметра. При этом, хотя эффективная прозрачность выходной жалюзной сетки достаточно высока и превышает 90 %, тем не менее около 10 % тока пучка перехватываются этой сеткой, что приводит к её нагреву и ионному распылению. Тепловые деформации, возникающие из-за неравномерного нагрева пластинок, имеющих малую теплоёмкость, приводят к ухудшению ионно-оптических характеристик пучка, а также к электрическим пробоям вытягивающего промежутка.

Для получения протонных пучков с длительностями в миллисекунды и более, с токами в десятки ампер, с энергией в десятки килоэлектронвольт необходимо использовать многоапертурные ИОС с крупной структурой электродов с $S \approx d$. В таких системах легче обеспечить малые тепловые нагрузки на электроды, однако при этом требуется при заданной плотности тока эмиссии найти такие формы электродов и определяемую ими форму границы плазмы, при которых достигается малая угловая расходимость пучка.

В связи с развертыванием работ по созданию мощных атомарных пучков для УТС и развитием численных методов решения самосогласованных задач электростатики в 70-х годах был достигнут большой прогресс в разработке ионно-оптических систем. Хорошо изученной и получившей широкое распространение является многоапертурная трехэлектродная система, элементарная ячейка одного из вариантов которой представлена на рисунке 7. В разных вариантах ионных источников используются щелевые или круглые эмиссионные отверстия с профилированными

кромками. Каждая ячейка такой системы является независимым источником элементарного пучка.

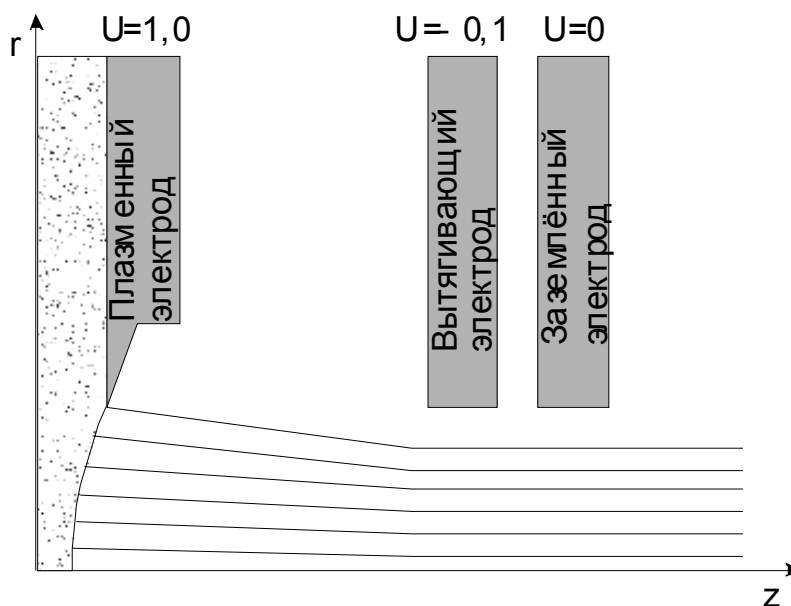


Рисунок 7. Трёхэлектродная ИОС с профилированными электродами.

Профилированные кромки играют роль “пирсовского” катодного электрода, применяемого для устранения в ускоряющем промежутке поперечного электрического поля объёмного заряда ленточного или круглого электронного пучка. Компенсация суммарного действия пространственного заряда элементарного пучка и рассеивающей электростатической линзы, образованной выходным отверстием, достигается вогнутостью плазменной границы. Технологические сложности изготовления идеальных расчетных профилей электродов, абберации и поперечная температура ионов эмиттера ($T_{i\perp} \approx 2 \div 5$ эВ) приводят к тому, что в практически используемых трёхэлектродных ИОС с крупной структурой угловая расходимость элементарного пучка составляет $1 \cdot 10^{-2}$ рад \times $5 \cdot 10^{-2}$ для щелевых апертур и $2-3 \cdot 10^{-2}$ рад для круглых.

Другой системой, обеспечивающей малые потоки частиц и мощности на электроды, является четырёхэлектродная ионно-оптическая система. Такая ИОС позволяет получить высокие ионно-оптические характеристики пучка при простой технологической форме электродов (прежде всего плазменного). Схема элементарной ячейки ИОС представлена на рисунке 8.

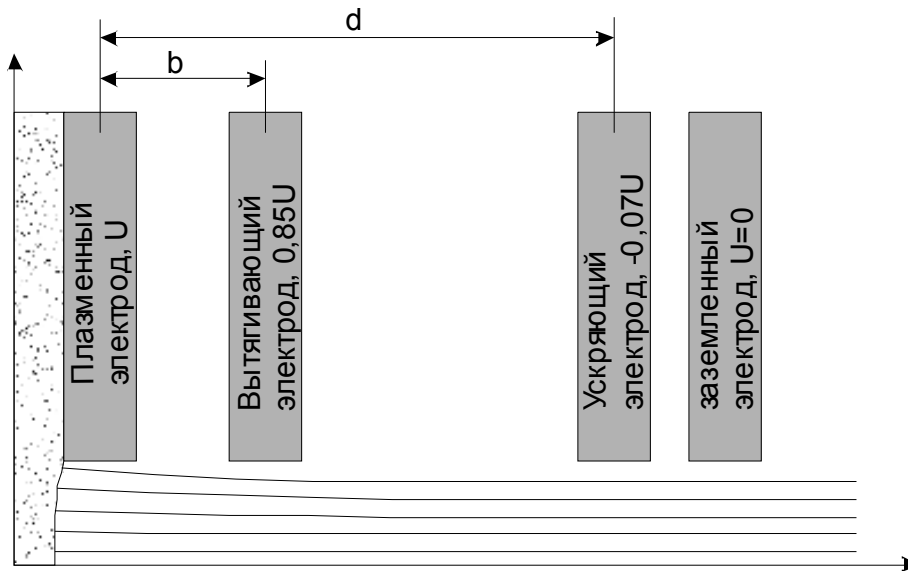


Рисунок 8. Четырёхэлектродная ионно-оптическая система.

Основное отличие 4-х электродной ИОС от 3-х электродной состоит в том, что поперечный импульс приобретаемый электронами в поле пространственного заряда и поперечном электрическом поле вблизи предпоследнего (2-го в 3-х электродной и 3-го в 4-х электродной ИОС) компенсируется не на самом начальном участке траектории иона за счёт искривления плазменной границы соответствующим подбором плотности тока и формы плазменного электрода, а в поперечном электрическом поле вблизи вытягивающего электрода. Фокусирующее действие вытягивающего электрода аналогично действию широко применяемой в электронной оптике катодной линзы.

Проведем простую оценку, демонстрирующую принцип действия 4-х электродной ИОС. Предполагая, что плотность тока эмиссии такова, что граница является плоской, и пренебрегая пространственным зарядом ионов рассмотрим действие на ион двух тонких электростатических линз: фокусирующей, локализованной в плоскости вытягивающего электрода, и дефокусирующей, локализованной в плоскости ускоряющего электрода. В фокусирующей линзе поперечный импульс, получаемый ионом, вылетающим из плазмы с нулевой начальной скоростью, равен

$$P_{1\perp} = x \frac{\frac{U_1 - U_2}{d - b} - \frac{U_0 - U_1}{b}}{4\sqrt{1 - \frac{U_1}{U_2}}} \sqrt{\frac{2Me}{U_0}} \quad (8).$$

Поперечный импульс, приобретаемый электроном в дефокусирующей линзе, равен

$$P_{2\perp} = -x \frac{U_1 - U_2}{4(d - b)} \sqrt{\frac{2Me}{U_0}} \quad (9),$$

где x – смещение от оси ячейки старта иона, U_0, U_1, U_2 – потенциалы плазменного, вытягивающего и ускоряющего электродов, а расстояния b и d – расстояния между плазменным и вытягивающим и плазменным и ускоряющим электродами соответственно. Минимальная расходимость пучка будет достигнута в случае взаимной компенсации полученных в обеих линзах поперечных импульсов: $P_{1\perp} + P_{2\perp} = 0$ (10).

Отсюда определится соотношение, определяющее необходимые потенциалы

$$\text{электродов, полагая } U_2 = 0, \text{ найдём } 1 - \left(\frac{d}{b} - 1\right) \left(\frac{U_0}{U_1} - 1\right) = \left(1 - \frac{U_1}{U_0}\right)^{1/2} \quad (11).$$

Однако оценки, проведенные выше, не дают ответа на вопрос о величине оптимальной плотности тока, минимальной угловой расходимости пучка, которая определяется нелинейными aberrациями и кривизной плазменной границы. Для решения этих вопросов и получения информации о ряде других параметров необходимо численное моделирование и экспериментальное исследование ионно-оптических свойств исследуемой ИОС.

Типичная V –образная зависимость угловой расходимости от плотности тока приведена на рис. 9.

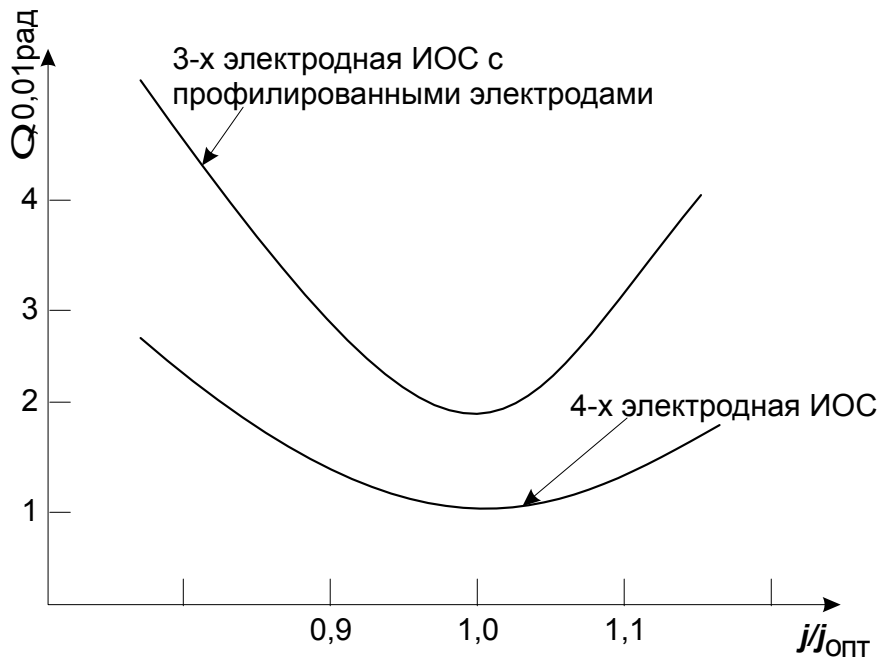


Рисунок 9. Зависимость расходимости пучка от тока.

4-х электродная ИОС слабо чувствительна к отклонению плотности тока эмиссии от оптимального значения. При флуктуациях плотности тока на $\pm 10\%$ от оптимальной, угловая расходимость увеличивается всего на 10% . Для сравнения на рис приведена аналогичная характеристика 3-х электродной ИОС. Сравнение результатов лишней раз показывает преимущества 4-х электродной ИОС в сравнении с 3-х

электродной с профилированными электродами. Ещё одним преимуществом 4-х электродной ионно-оптической системы является малая мощность, выделяемая на электродах. Так на фокусирующем и вытягивающем электродах выделяется всего $\approx 0,6$ % от мощности пучка. Токи же на эти электроды составляют – 4 % (ускоряющий электрод) и 0.5 % (вытягивающий электрод) от тока пучка. Отличие в токовых и мощностных нагрузках на электроды связано с тем, что на ускоряющий электрод приходят, в основном, медленные ионы, вытягиваемые из вторичной плазмы, порождаемой пучком за пределами ИОС, а на вытягивающий электрод приходят электроны, выбитые ионами из ускоряющего электрода и ускоренные почти до полной энергии.

Как уже упоминалось выше, отверстия в сетках ИОС могут быть как круглой, так и щелевой формы. Очевидно, что, расположив отверстия на сферических (цилиндрических) поверхностях можно обеспечить геометрическую фокусировку частиц пучка, при этом для щелевых отверстий фокусировка будет только в направлении поперек щелей, а для круглых отверстий можно обеспечить фокусировку по двум направлениям. Наиболее логичным было бы использовать сетки, являющиеся фрагментами концентрических сфер (соосных цилиндров). Тогда точка пересечения осей каждой ячейки будет совпадать с центром этих сфер. Фокусное расстояние сетки равно её радиусу кривизны (рисунок 10 а). Однако изготовление сферических сеток с большой точностью достаточно сложно. В случае если диаметр сетки много больше её радиуса кривизны (что, в принципе, всегда верно), тогда можно использовать сетки одинакового радиуса кривизны, но шаг отверстий и в этом случае будет переменным. При изготовлении сеток сначала делают отверстия, после чего происходит формовка сеток. Для изготовления комплектов сеток для ИОС с разными фокусными расстояниями необходимо большое число сеток с переменным, своим для каждого комплекта, шагом отверстий. Было бы экономически оправдано изготовление и использование сеток ИОС с равным шагом отверстий. Как показывают аналитические и численные расчеты, в этом случае траектории частиц также пересекаются в одной точке, которая, однако, отлична от точки центра сферы, сегментом которой является сетка (рисунок 10 б). Рассчитаем импульс, который приобретает частица по направлению к вектору радиуса кривизны, воспользовавшись (8 –11). При этом надо учесть, что $x_1 = x + r \cdot b/R$, а $x_2 = x + r \cdot d/R$. Здесь r – расстояние от ячейки до оси ИОС, а R – радиус кривизны сеток. Также для центральной ячейки верно $P_{1\perp} + P_{2\perp} = 0$. Таким образом, для ячейки, отстоящей от оси на расстояние r

$$P_{1\perp} + P_{2\perp} = \frac{r}{4R} \sqrt{\frac{2Me}{U_0 \left(1 - \frac{U_1}{U_0}\right)}} \left(b \left(\frac{U_1 - U_2}{d - b} - \frac{U_0 - U_1}{b} \right) - d \frac{U_1 - U_2}{d - b} \sqrt{1 - \frac{U_1}{U_0}} \right) \quad (12).$$

Дополнительный угол наклона к движению частицы определится как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \approx \frac{P_{\perp}}{\sqrt{\frac{2Me}{U_0}}} \quad (13).$$

Таким образом, точка пересечения траекторий частиц (точка фокуса) без учета пространственного заряда зависит только от зазоров между электродами и напряжениях на них.

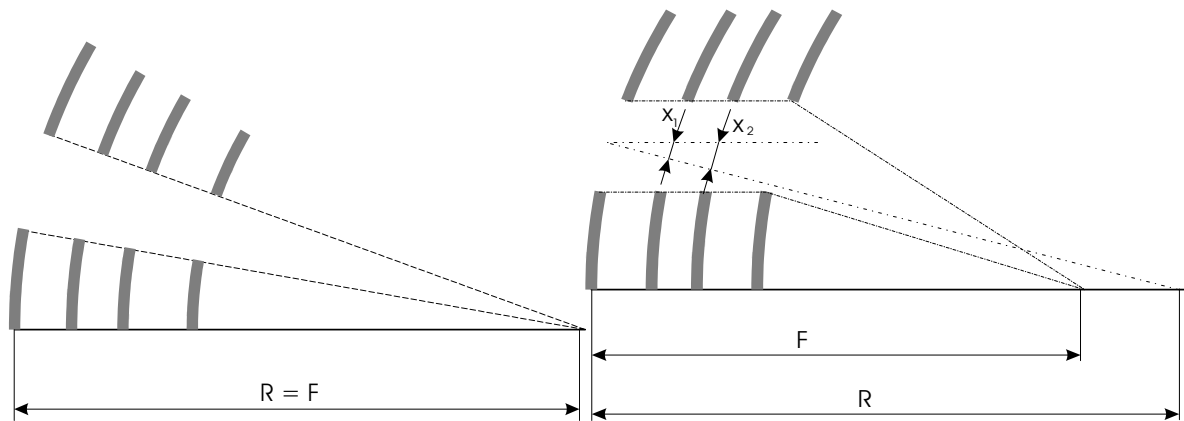


Рисунок 10. Траектории частиц в ИОС с переменным и постоянным шагом отверстий.

2 Нагревной инжектор СТАРТ – 4.

2.1 Цели создания нового инжектора.

На ближайшие несколько лет намечена модернизация установки ГДЛ с целью увеличения основных параметров плазмы. Одним из этапов модернизации является замена существующей системы нагрева плазмы с целью увеличения её суммарной мощности, энергии инжектируемых частиц и увеличения длительности работы. Сейчас система нагревных инжекторов ГДЛ состоит из 6 инжекторов СТАРТ-3, которые обеспечивают суммарную мощность, инжектируемую в плазму ≈ 4 МВт. Эти инжектора хорошо зарекомендовали себя в работе на установке ГДЛ и имеют ряд неоспоримых достоинств, таких как: высокая надежность работы каждого инжектора, высокая прозрачность ИОС, что позволяет достичь хорошей газовой эффективности инжектора и высокой удельной мощности. Однако конструкция этих инжекторов была разработана ещё в 80-х годах, модернизировалась с целью увеличения ионного тока и длительности работы, и к настоящему времени ресурс модернизации этой схемы исчерпан. Так, например, невозможно поднять ускоряющее напряжение на электродах

ИОС. Длительность также ограничена 1 мс вследствие нагрева проволочек (электродов) ионно-оптической системы. Ещё один этап модернизации установки ГДЛ состоит в создании дополнительного пробкотрона, температура и плотность плазмы в котором будут на уровне современных токамаков. Нагрев плазмы в этом пробкотроне также будет осуществляться путем инъекции пучков атомов водорода. Существующие инжекторы СТАРТ-3 не могут быть использованы в этом эксперименте, так как диаметр плазменного шнура в этом месте установки сравним с размером инжектируемого пучка, а уменьшить последний не представляется возможным (многощелевая ИОС позволяет фокусировать пучок только в одном направлении – поперек проволочек). Также был заключён контракт на разработку нагревного инжектора для установки MST (Madison Symmetric Torus). Конструкционные особенности этой установки таковы, что в её корпусе нельзя делать отверстие диаметром более 60 мм. Таким образом пучок инжектируемых частиц необходимо провести внутрь установки через отверстие \varnothing не более 60 мм. Однако максимальная плотность тока эмиссии в ионно-оптических системах не превышает $0,5 \text{ A/cm}^2$, значит для получения пучка ионов с током $\sim 50 \text{ A}$ необходимая апертура ИОС составит не менее 100 мм. Очевидно, что для того, чтобы провести этот пучок через предоставляемое отверстие в корпусе установки, необходима его фокусировка. Поскольку многощелевая ИОС позволяет фокусировать пучок только в одном направлении, такой тип ИОС не может быть применен. Фокусировку по двум координатам может обеспечить только дырочная ИОС со сферическими сетками. К тому же, с 1995 года в институте ведутся разработки диагностических инжекторов со сферическими сетками на напряжение до 50 кВ и длительностями до нескольких секунд. Такие сетки обеспечивают хорошую геометрическую фокусировку пучка. Предельная длительность пучка, полученного в такой ИОС, также на несколько порядков превосходит максимальную длительность для многощелевых проволочных ИОС.

Таким образом, для выполнения задач по модернизации инжекционного комплекса установки ГДЛ и выполнения требований контракта по установке MST необходим инжектор, который бы позволил:

- увеличить мощность каждого инжектора до 1,5 МВт с одновременным увеличением ускоряющего напряжения.
- увеличить длительность работы до 3 – 5 мс с перспективой дальнейшего роста.
- фокусировать пучок в точке наименьшего размера до диаметра 60 мм.

Для того, чтобы выполнить эти требования, был разработан новый нагревной инжектор, схематический чертёж которого представлен на рисунке 11. При создании инжектора была выбрана схема, типичная для ИЯФовских нагревных инжекторов. Основные параметры, заложенные в инжекторе при его разработке следующие:

- рабочее напряжение – 25 кВ
- ионный ток – до 60 А
- длительность импульса высоковольтного и дугового питания – 4 мс
- дуговой источник плазмы с током до 1200 А
- мультипольная магнитная стенка на постоянных магнитах
- 4-х электродная ИОС на основе дырочной оптики
- начальная апертура пучка 200 мм.

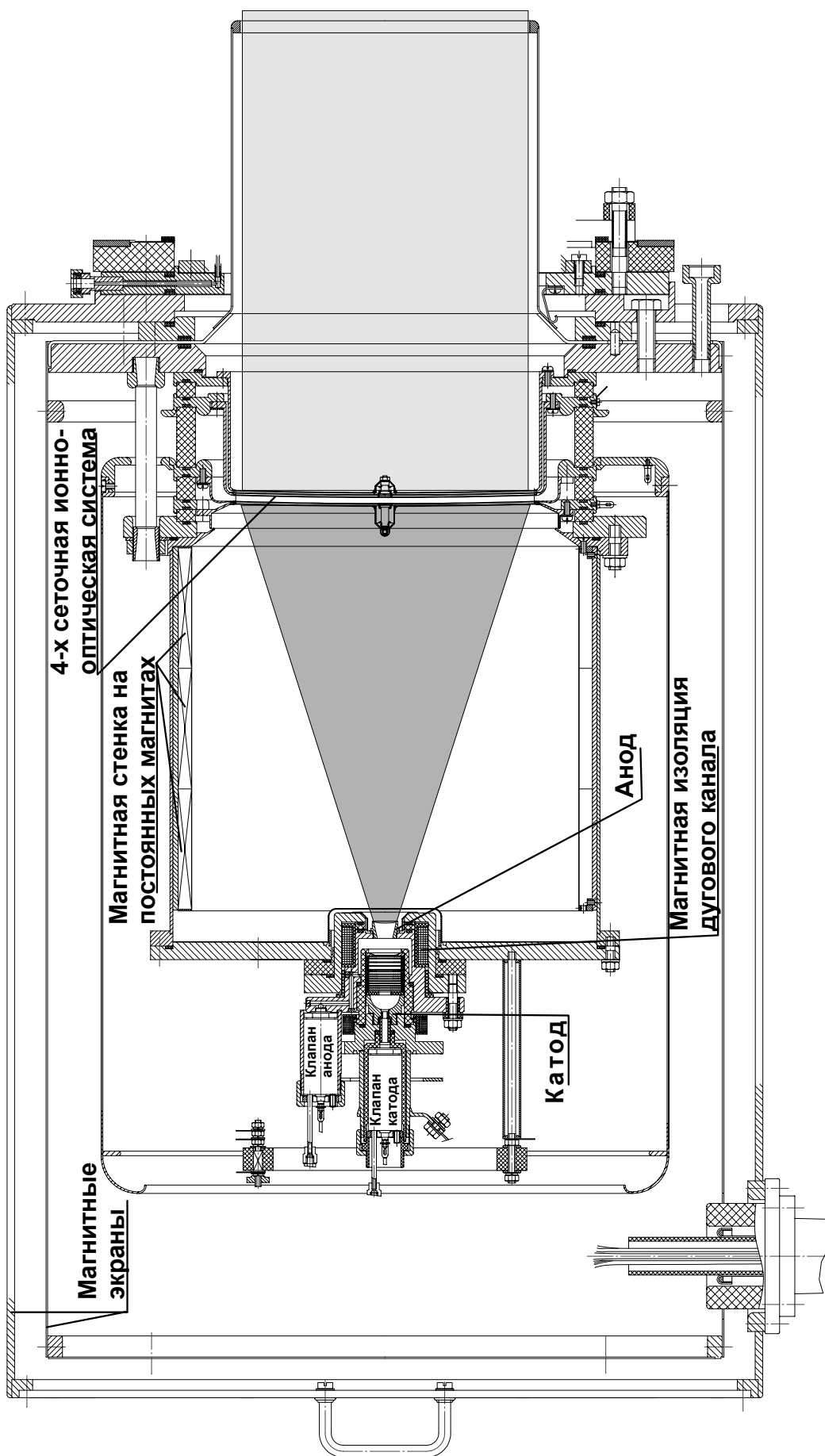


Рисунок 11. Чертёж нагревного инжектора.

3.2 Конструкция основных узлов инжектора.

В качестве источника плазмы для нового нагревного инжектора был выбран дуговой генератор плазмы. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых на временах работы до нескольких десятков миллисекунд практически не проявляется основной недостаток дуговых генераторов – распыление материала катода и износ катодного узла. Кроме того, дуговые генераторы отличаются от прочих источников плазмы относительной простотой и надежностью. Плазма, получаемая в таком источнике, отличается очень хорошим массовым составом – свыше 90 % в протонах. Хотя массовый состав плазмы и не является существенным параметром для нагревного инжектора, однако получение хорошей расходимости пучка, а как следствие и малого его размера, проблематично при том массовом составе плазмы, которая получается, например, в ВЧ источниках. К тому же в институте уже существовал дуговой генератор плазмы, с потоком плазмы свыше 100 А – источник плазмы инжектора СТАРТ-3.

Как уже упоминалось выше, для создания более однородного потока плазмы на первую сетку ионно-оптической системы и для уменьшения потерь плазмы в расширительной камере необходимо применение магнитной стенки, которая бы отражала часть расходящегося потока плазмы. Уже применявшиеся ранее в диагностических инжекторах мультипольные магнитные стенки на постоянных магнитах хорошо себя зарекомендовали. Стенка для нового нагревного инжектора выполнена на 32 постоянных NeFeB_3 магнитах размером 9x12x240 мм. Внутренний диаметр, на котором расположены магниты, равен 240 мм. На рисунке 12 фотография её внешнего вида. Магнитное поле на поверхности каждого магнита измерялось холловским датчиком и равно 3 кГс.

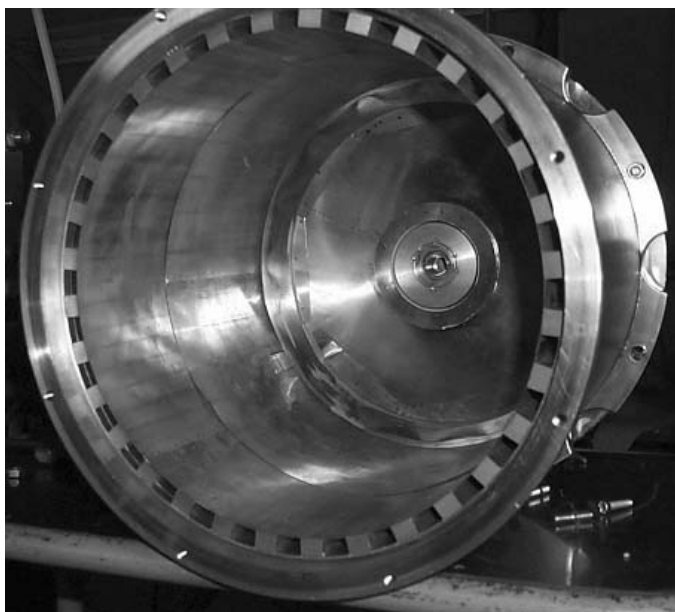


Рисунок 12. Внешний вид магнитной стенки на постоянных магнитах для нагревного инжектора.

Для измерения потока плазмы на плазму применялся сеточный зонд, который можно было передвигать по радиусу и по азимуту. Результаты, полученные с сеточного зонда, представлены на рисунке 13.

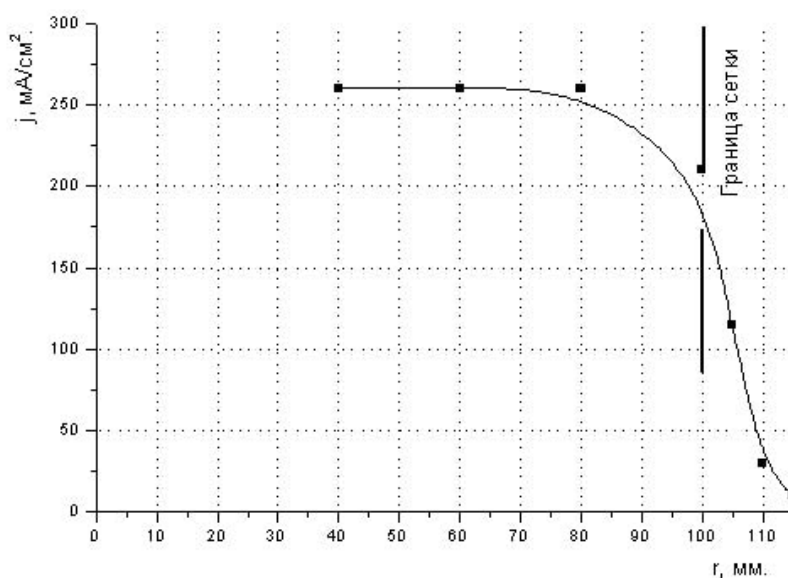


Рисунок 13. Поток плазмы на первую сетку ИОС, измеренный сеточным зондом.

Как видно из полученных результатов, существует область, в которой неоднородность потока плазмы по радиусу составляет величину порядка 15 %. При этом максимальная неоднородность по азимуту примерно такой же величины, а суммарный поток плазмы равен ≈ 140 А.

3.3 Ионно-оптическая система.

Сетки для инжектора изготавливались из молибдена толщиной 0,5 мм. В качестве материала для сеток молибден выбран потому, что он обладает хорошими электровакуумными свойствами. Диаметр сеток 200 мм. В каждой сетке выполнены 3433 отверстия диаметром 2,5 мм, расположенные в гексагональном порядке с шагом 3,2 мм. Такое расположение отверстий обеспечивает прозрачность каждой сетки 52 %. Предполагается использовать комплекты сеток с различными радиусами кривизны. В стендовых испытаниях использовались сетки ИОС с $R_{кр} = 150$ см. Для таких сеток согласно (13) с зазорами между сетками, соответствующими оптимальному току 50 А при полном напряжении 25 кВ, фокусное расстояние составит $\approx 0,8R_{кр} = 120$ см. При установке сеток необходимо следить за точным выставлением отверстий сеток друг напротив друга. Кроме этого оказалось необходимым проверять зазоры между сетками по всему радиусу, так как при установке в держак могут менять радиус кривизны.

Существенным отличием ионно-оптической системы этого инжектора от других нагревных является конструкция изоляторов между сетками. На рисунке 14 приведен чертеж сеточного узла.

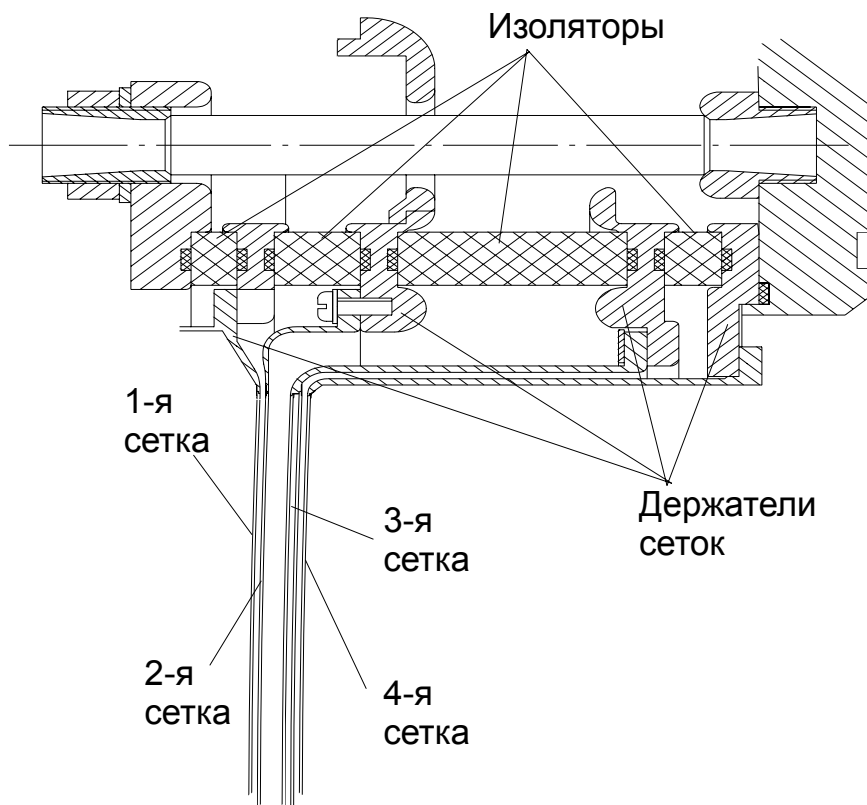


Рисунок 14. Конструкция ионно-оптической системы.

Если раньше в конструкции сеточного узла нагревных инжекторов применялись изоляторы в виде палочек из оргстекла, которые одновременно фиксировали сетки, то в этом варианте изоляторы – керамические кольца. Между держакками сеток и торцевой поверхностью кольца – вакуумные уплотнения. Фиксация сеток производится стягиванием изолирующими шпильками, которые расположены со стороны атмосферы. Преимущество подобной конструкции состоит в том, что достаточно просто подвести охлаждение к держаккам сеток. Держаки выполнены из меди и в перерыве между выстрелами происходит периферийное охлаждение сеток. На фото показан внешний вид ИОС со стороны источника плазмы.



Рисунок 15. Внешний вид ИОС со стороны первой сетки.

Хорошо зарекомендовало себя использование на предыдущих моделях ИОС диагностических инжекторов “толстой” третьей сетки. Она представляет собой две сетки обычной толщины с зазором. Как показывают расчеты, такая конструкция позволяет существенно снизить необходимый запирающий потенциал на третьей сетке. А так как зазор между вытягивающим и ускоряющим электродом является наиболее проблемным с точки зрения электропрочности, то снижение поля в зазоре приводит к увеличению надежности работы инжектора. Результаты расчета запирающего потенциала на оси ячейки в зависимости от напряжения на третьей сетке для толстой и тонкой сеток приведены на рисунке 16.

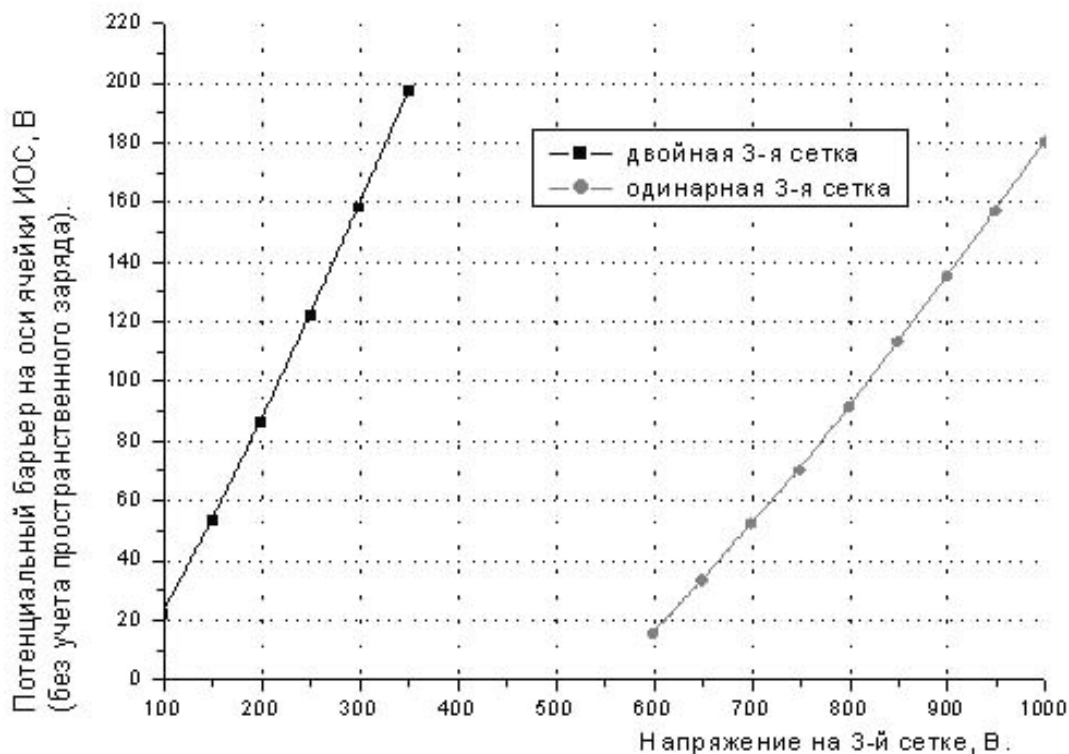


Рисунок 16. Расчет запирающего потенциала 3-ей сетки на оси ячейки ИОС.

Моделирование различных вариантов элементарной ячейки ИОС проводилось при помощи программного кода AXCEL. Также для качественного получения картины можно воспользоваться программным пакетом SAM. Также при помощи программ SAM проводились расчеты конструкции ИОС на электрическую прочность.

3.4 Система питания для стендовых испытаний инжектора.

Для проведения испытаний было изготовлено питание инжектора. В нем можно выделить несколько основных блоков:

- Высоковольтный модулятор.
- Питание дуги генератора плазмы.
- Дополнительные устройства (питание клапанов мишеней, блок 3-й сетки, блок запусковых импульсов).

Высоковольтный модулятор выполнен на основе линии, в которой конденсаторы заряжаются до 2 – 3 кВ. Для повышения напряжения использован импульсный трансформатор с предварительным перемагничиванием сердечника. Высоковольтный сигнал стабилизируется при помощи системы варисторов и тиристоров. Питание второй сетки выполнено как делитель напряжения первой. В схеме присутствует блок защиты, который отключает питание при пробое в ИОС. Питание позволяет получать

импульсы с максимальной длительностью 3 мс, предельным напряжением 30 кВ и током до 100 А.

Дуговое питание отвязано от земли и при выстреле приобретает полный потенциал. В корзине питания присутствуют конденсаторная батарея, блок магнитной изоляции дуги, блок поджига, блоки катодного и анодного клапанов, 5 блоков стабилизированного тока БСТ – 250, блок разгона и гашения дуги. Запуски этих блоков производятся с помощью оптических сигналов. Это питание может обеспечить ток дуги до 1200 А, а максимальная длительность дуги составляет 3 мс.

3 Стендовые испытания нагревного инжектора.

Особенностью ионно-оптической системы инжектора можно считать сами сетки с большой апертурой и большим числом отверстий. Тренировка таких сеток занимает много времени. Для оптимизации процесса тренировки сеток применялся разряд в атмосфере тяжелого газа (аргона). В камеру напускался газ под давлением $5 \div 2 \cdot 10^{-2}$ Па, а на те электроды ИОС, зазор между которыми надо было тренировать, через РС – цепочку подавалось высоковольтное напряжение в той полярности, которая существует при работе инжектора. РС – цепочка необходима для ограничения тока, текущего между электродами при пробое. Время тренировки в аргоне каждого зазора составляло несколько суток.

В первой серии испытаний нового инжектора был выявлен ряд недостатков конструкции. Которые, в частности, проявлялись в низкой надежности работы инжектора.

Так не удавалось достичь длительности импульса более $600 \div 700$ мкс – происходил пробой между второй и третьей сетками ИОС. Длительность уменьшалась ещё сильнее при попытке поднять ионный ток более $30 \div 35$ А. Для выявления уязвимых мест конструкции ИОС были проведены статистические измерения мест пробоев в ионно-оптической системе. Напротив инжектора, на противоположной стороне вакуумного объёма, было сделано стеклянное окно. Через это окно цифровым фотоаппаратом проводилась съёмка ИОС в момент выстрела. На приведенной фотографии отчетливо видно место пробоя. Было сделано около сотни таких фотографий. И хотя пробой происходили по всей поверхности сеток, всё же большая их часть располагалась на периферии сеток, в месте заделки в держаки.

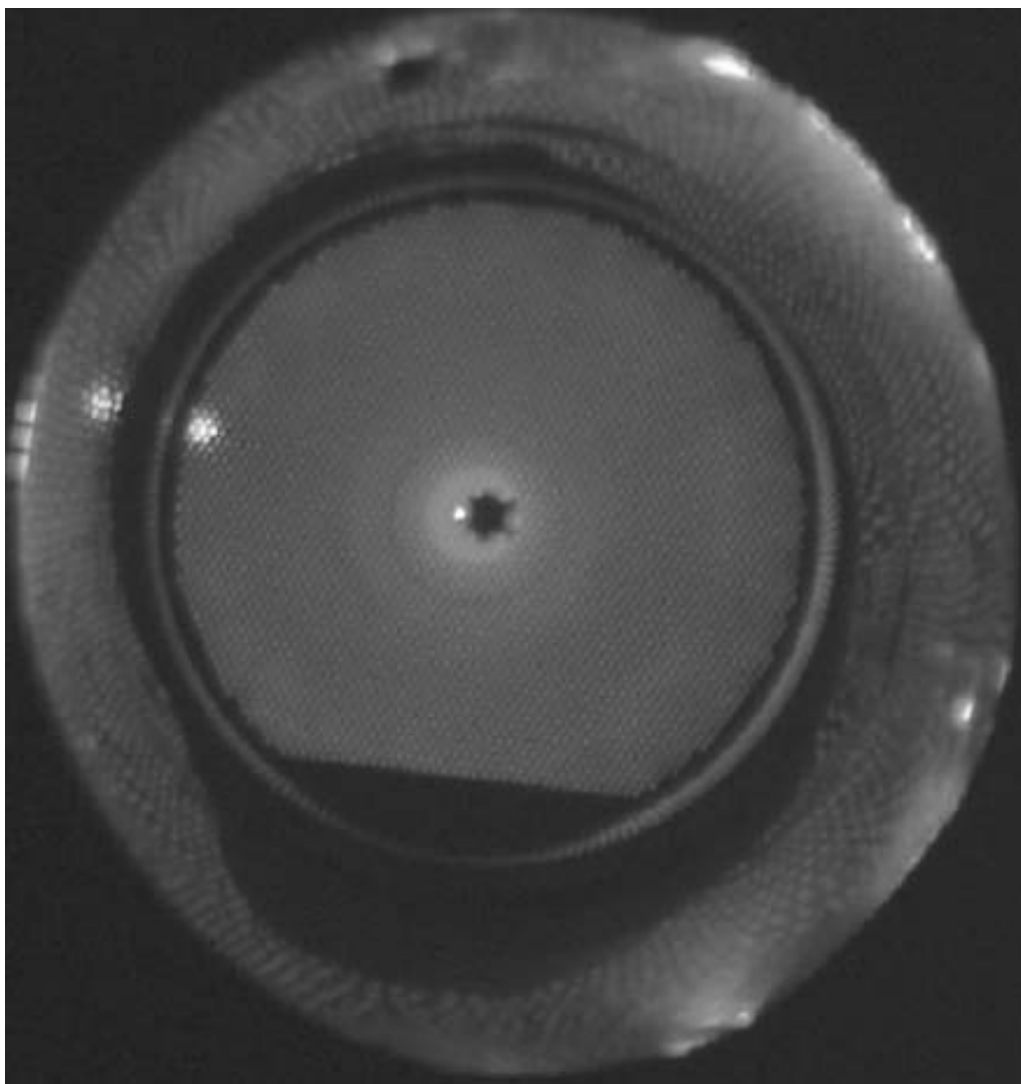


Рисунок 17. Фотография ИОС в момент пробоя.

По результатам проведенных испытаний внесено изменение в конструкцию державок ИОС. Та их часть, к которой непосредственно привариваются сетки, ранее была изготовлена из нержавеющей стали. Сталь была заменена ниобием – материал с температурным коэффициентом расширения близким к молибдену. Кроме того, технология сваривания молибдена с ниобием более проста, нежели со сталью.

Этот шаг привел к качественному изменению надежности работы инжектора. Были получены режимы работы инжектора, с длительностью, которая ограничивалась существующей на тот момент системой питания. При этом надежность не уменьшалась с увеличением потока плазмы. Максимальный полученный ток в ионах превышал 60 А. Количественное выражение надежности можно выразить тем, что пробой в ИОС происходили не чаще, чем 1 из 20 выстрелов. Необходимо отметить, что надежность в работе одного инжектора является критической величиной при использовании системы инжекторов. Как легко посчитать, для получения беспробойного импульса более чем в половине выстрелов в системе из шести инжекторов (число инжекторов на ГДЛ)

необходимо, чтобы каждый инжектор пробивался не чаще, чем 1 раз из 10. На рисунке 18 представлена типичная осциллограмма для ионного тока и напряжения на первой сетке ИОС. При напряжении 25 кВ получен ток свыше 50 А. Длительность 1,2 мс была ограничена системой высоковольтного питания.

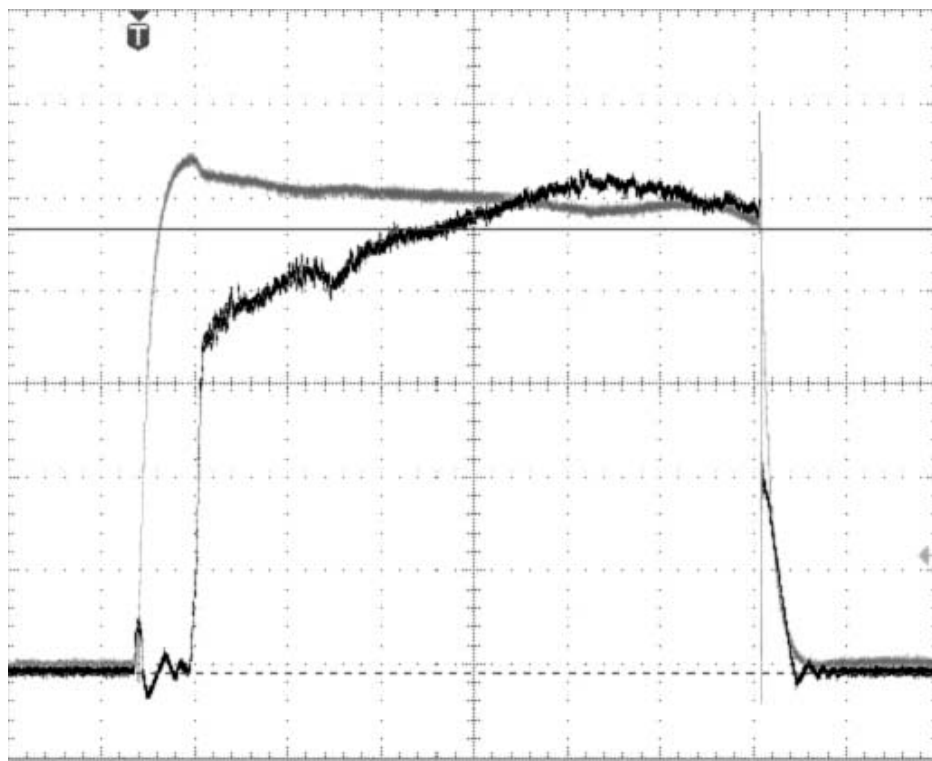


Рисунок 18. Осциллограмма ускоряющего напряжения (серый луч, 5 кВ/клетка) и тока пучка (чёрный луч, 10 А/клетка), развертка 200 мкс в клетку.

На важном месте при испытаниях инжектора стоит вопрос измерения различных параметров. При этом желательно измерение одних и тех же величин разными, независимыми методами для исключения грубых систематических ошибок.

4.1 Измерение электрических параметров инжектора.

Ток пучка отслеживался при помощи бесконтактного датчика LEM, измеряющего ток в цепи питания инжектора. Показания датчика периодически сверялись с сигналом, полученным с низкоомного шунта. В общем, использование датчика LEM для измерения тока пучка является достаточно надежным, точным и удобным методом.

Ток дуги измерялся при помощи шунта в дуговой цепи. Сигнал с шунта через оптронную развязку подавался на осциллограф. Помимо этого для измерений использовался датчик LEM на токи до 1000 А.

Важную информацию несут сигналы напряжения на первой и второй сетки. По полярности броска напряжения на второй сетке при пробое можно судить о том, в каком зазоре произошёл этот пробой.

4.2 измерение параметров пучка.

Измерение различных параметров пучка, полученного в инжекторе, представляют определенные трудности, т.к. основная часть частиц в пучке – нейтральные атомы, а именно параметры этой части пучка представляют интерес.

Для качественного отслеживания изменения такого параметра, как размер пучка использовалась система подвижных вторично-эмиссионных датчиков. На рисунке 19 показана схема включения датчиков в цепь.

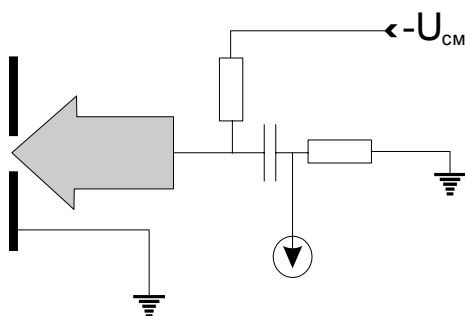


Рисунок 19. Схема включения вторично-эмиссионных датчиков.

Датчики расположены крестом с шагом 20 мм на подвижке, которая позволяет передвигать их по оси пучка. Вторично-эмиссионные датчики позволили достаточно просто найти расстояние до ИОС, на котором пучок имеет минимальный размер. Это расстояние оказалось равным 112 см, что, как и должно быть, немного меньше расстояния геометрического фокуса. В этом месте и измерялась зависимость размера пучка от тока при различных значениях полного и вытягивающего напряжений. На рисунке 20 показана характерная V – образная зависимость, полученная для инжектора на полном напряжении 25 кВ и оптимальном вытягивающем напряжении.

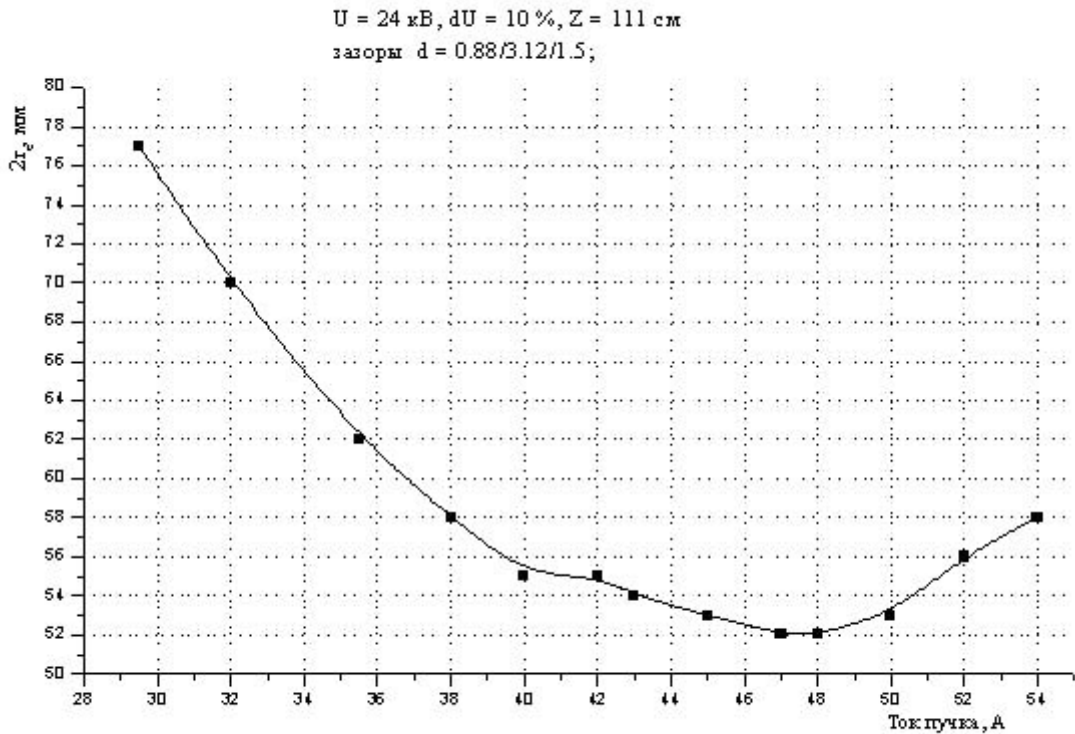


Рисунок 20. Зависимость размера пучка от тока в точке фокуса. Измерения проводились в/э датчиками.

Необходимое вытягивающее напряжение также было определено вторично-эмиссионными датчиками. Минимальный диаметр пучка, который был измерен в/э датчиками, составил 50 мм. Однако подобные измерения обладают малой точностью, потому что коэффициент вторичной эмиссии может меняться от датчика к датчику и быть разным для разной плотности тока пучка. При вскрытии было замечено, что те датчики, на которые попадает центральная часть пучка, стали иметь рыхлую, пористую поверхность из-за бомбардировки и нагрева частицами.

Хорошей иллюстрацией того, что размер пучка действительно мал, а плотность мощности велика, служит пятно кипения на пластине, закрывавшей в/э датчики.

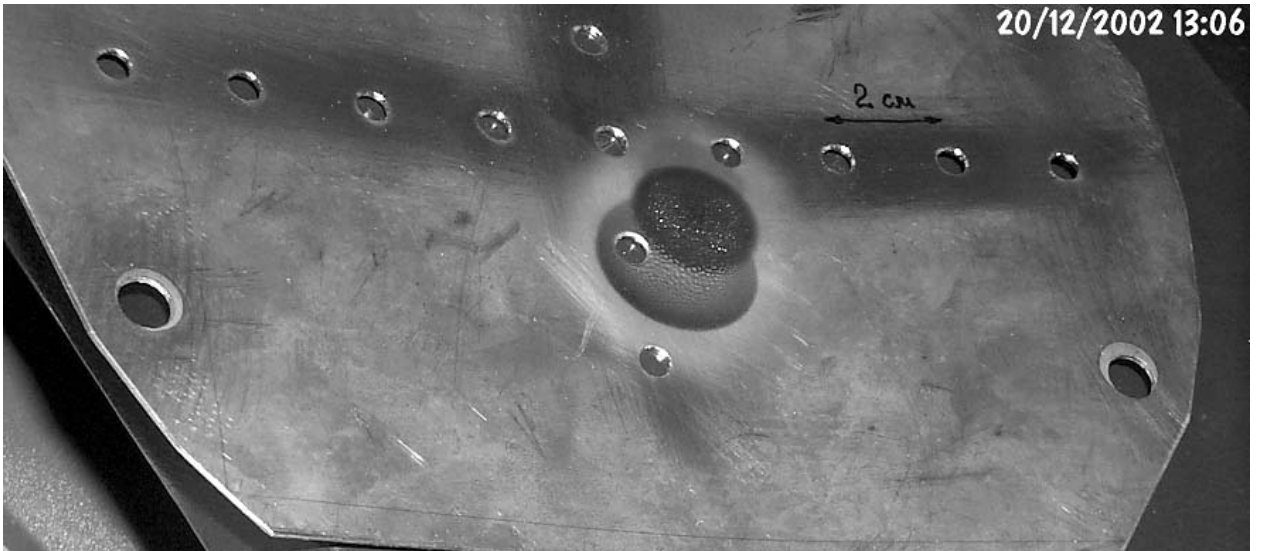


Рисунок 21. фотография пятна кипения на стальной пластине.

Для более точного измерения размера пучка в точке фокуса при оптимальном токе мы использовали подвижный калориметр. Измерения калориметром хоть и являются более трудоемкими и не позволяют получить временную зависимость сигнала, однако более точны, чем в/э датчики. Профиль пучка полученный калориметром приведен на рисунке 22. и в этом случае диаметр пучка оказался менее 40 мм.

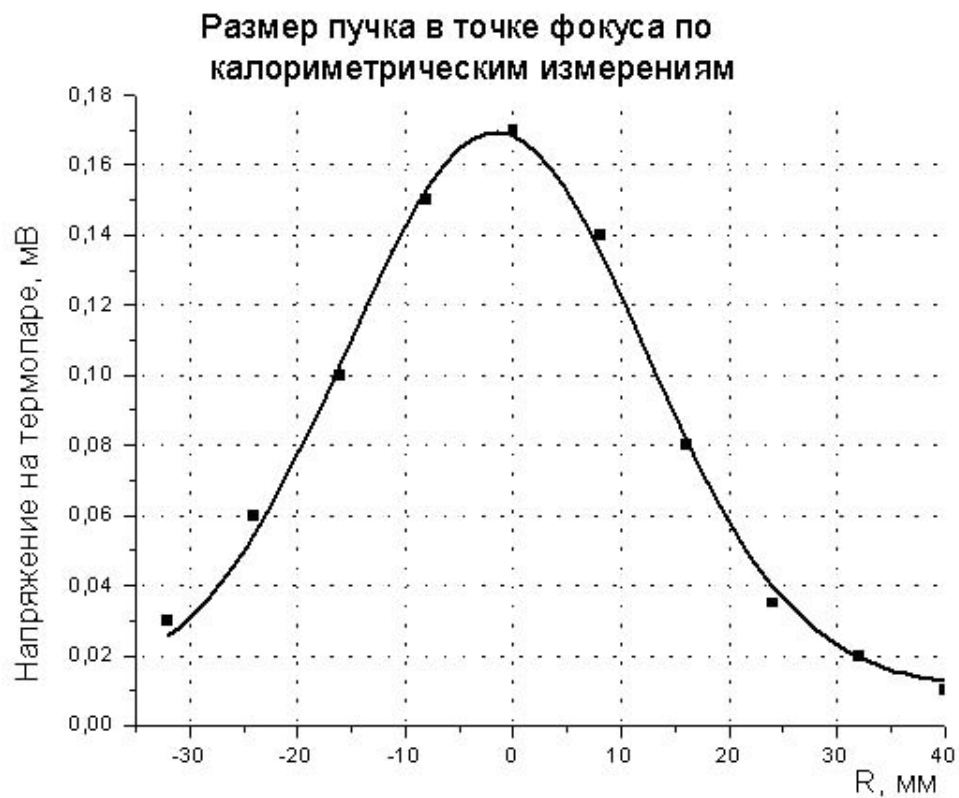


Рисунок 22. Размер пучка в точке фокуса при оптимальном токе по измерениям калориметром.

В любом случае, видно, что испытываемый образец инжектора позволяет провести пучок через отверстие $\varnothing 60$ мм.

При проведении измерений было отмечено, что пучок наносит сильный механический удар по поверхности, и возникла идея, сделав измеритель импульса, провести ещё одно измерение на ток пучка. Был изготовлен баллистический измеритель импульса, который представлял собой тонкую пластину на подвесе (рисунок 23).

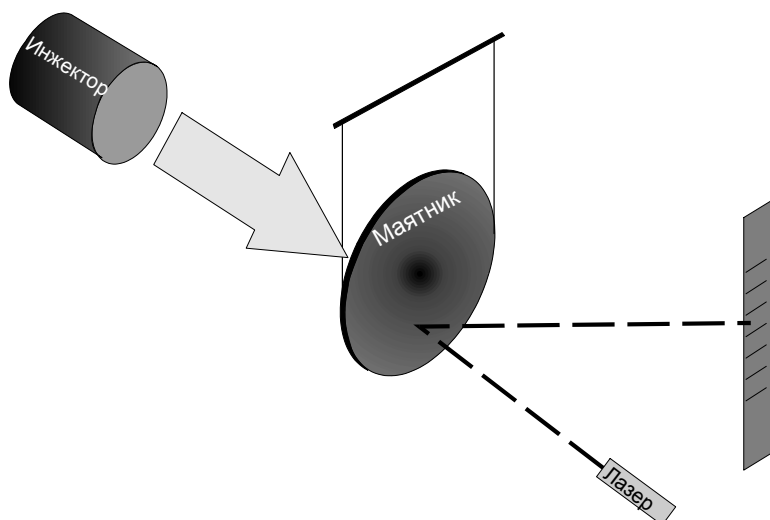


Рисунок 23. Схема измерителя импульса пучка.

Можно было передвигать маятник по двум координатам поперек оси пучка, и по свечению пластины, нагретой частицами, выставлять точно на ось пучка.

Максимальный угол отклонения маятника фиксировался по отраженному лучу лазера.

Величина интеграла тока пучка, полученная маятником, с хорошей точностью совпадает с $\int Idt$, измеренной в цепи питания инжектора.

Как говорилось выше, использование дугового генератора плазмы позволяет получать очень хороший массовый состав плазмы. Для этого инжектора он также был измерен. Измерения проводились магнитным масс-анализатором с равновесной гелиевой мишенью. На рисунке 23 показана его схема.

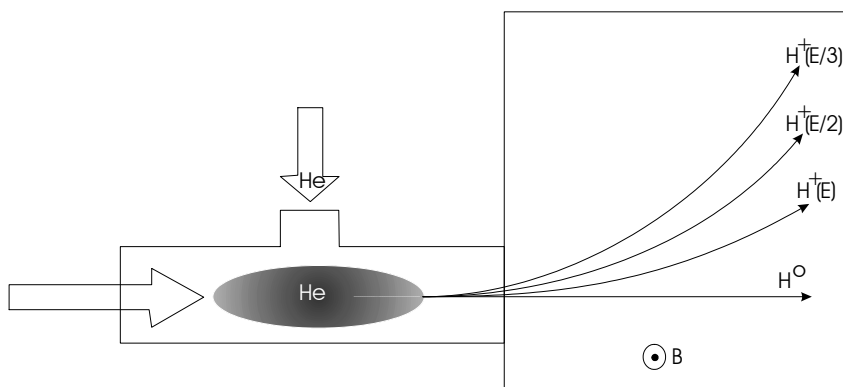


Рисунок 24. Схема магнитного масс-анализатора с равновесной гелиевой мишенью.

Данные, полученные с его помощью приведены на рисунке 25, как и ожидалось, у плазмы очень хороший массовый состав $\sim 90\%$ в протонах.

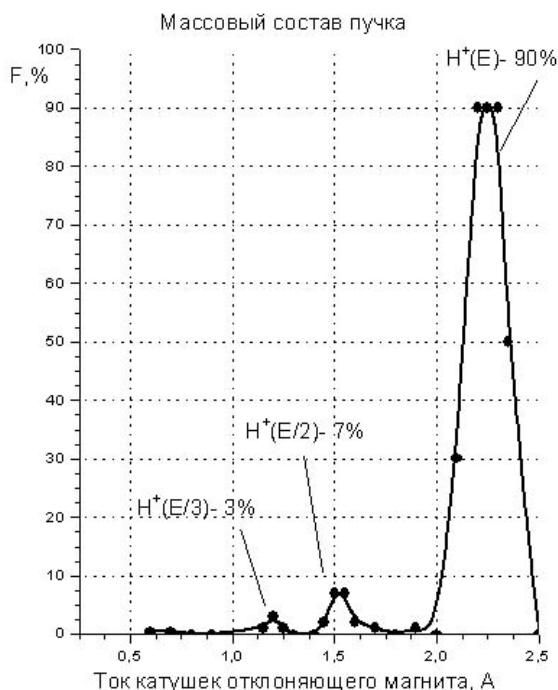


Рисунок 25. Измерение массового состава пучка.

Также магнитным масс-анализатором был измерен коэффициент нейтрализации пучка на равновесной газовой мишени. Измерения проводились двумя способами и их результаты совпали между собой. Измеренный коэффициент нейтрализации равен 70 %.

Первый способ: используя или не используя магнитный сепаратор, сравнивали амплитуды сигналов с коллектора масс-анализатора.

Второй способ: не используя сепаратор использовали только равновесную гелиевую мишень. В этом случае и протоны, и нейтралы, проходя через мишень, имеют одинаковый выход в ионах (при энергии 25 кВ $\approx 40\%$). Сравнив амплитуду полученного с коллектора сигнала со случаем, когда гелиевая мишень отсутствует (сигнал только от заряженных частиц), получили коэффициент нейтрализации.

Заключение.

Подводя итог сделанной работе, можно сказать следующее: Изготовлен и прошел стендовые испытания мощный атомарный инжектор атомов водорода. Проведен ряд экспериментов, позволивших существенно повысить надежность работы. Импульсы с пробоями происходят не чаще чем в 5 % случаев. Получены следующие параметры пучка:

Энергия атомов – до 25 кэВ.

Полный ток в ионах – до 60 А.

Длительность импульса 1,2 мс.

Минимальный диаметр пучка – 40 мм.

Массовый состав – 90 % в протонах.

Полученные параметры позволяют применять этот инжектор в системе атомарной инъекции установки ГДЛ и на установке МСТ.

Литература.

1. Димов Г.И., Кононенко Ю.Г., Савченко О.Я., Шамовский В.Г. Получение интенсивных пучков ионов водорода. ЖТФ, 1968, т.38, в.6, с.997-1004.
2. Димов Г.И., Росляков Г.В., Савченко О.Я. Формирование потока ионов и нейтральных атомов из плазмы импульсного дугового источника. – Новосибирск, 1967, 25 с. – (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР, 1967).
3. Димов Г.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. Диагностический инжектор атомов водорода. – ПТЭ, 1977, №4, с.29-32.
4. Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Диагностический инжектор атомов водорода. – Физика плазмы, 1981, т.7, в.2, с.464-469.
5. Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Многоамперный импульсный источник протонов. – ЖТФ, 1983, т.53, с.258-263.
6. Давыденко В.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. Протонный источник импульсного инжектора атомов установки АМБАЛ. – В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1983, вып.2(12), с.67-70.
7. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. Москва, Энергоатомиздат, 1986.
8. Физика и технология источников ионов, под редакцией Я.Брауна, Москва, “Мир”, 1998.