

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

Ушмоткин Виталий Олегович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Исследование получения и транспортировки сильнооточного пучка отрицательных ионов водорода

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

канд. физ.-мат. наук, доцент

ИЯФ СО РАН

Беклемишев А. Д. /.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20... г.

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук,

н.с. ИЯФ СО РАН

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

«.....».....20... г.

Дата защиты: «.....».....20... г.

Новосибирск, 2020

Оглавление

1. Введение	3
2. Получение пучков высокоэнергетичных нейтралов с использованием источника отрицательных ионов	5
2.1. Образование пучков отрицательных ионов	5
2.2. Нейтрализация пучков заряженных частиц	7
2.3. Усиление поверхностно-плазменного механизма генерации ОИ	8
2.4. Поддержание цезиевого покрытия на эмиттере ОИ	10
3. ВЧ поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов для прототипа инжектора высокоэнергетичных нейтралов ИЯФ	12
3.1. Источник отрицательных ионов водорода для инжектора	12
3.2. Создание цезиевого покрытия на плазменном электроде для усиленной генерации отрицательных ионов	16
3.3. Длительный цезиевый эффект	22
4. Исследование транспортировки пучка ОИ на экспериментальном стенде прототипа инжектора ИЯФ	24
4.1. Моделирование траекторий частиц в ИОС	25
4.2. Экспериментальный стенд исследования транспортировки пучка	27
4.3. Физические процессы при транспортировке пучка ОИ	32
4.4. Экспериментальное исследование транспортировки пучка ОИ	32
4.5. Способы улучшения транспортировки ОИ	35
5. Заключение	37

1. Введение

Одна из основных задач в исследовании управляемого термоядерного синтеза (УТС) – это получение устойчивой, долгоживущей горячей плазмы. Одной из проблем физики УТС является проблема ввода в плазму мощности, необходимой для нагрева до термоядерной температуры. Одним из самых эффективных способов нагрева в установках с магнитным удержанием является инжекция в плазму пучков быстрых нейтралов (нейтральная инжекция, NBI). Инжектируемые в плазму нейтралы взаимодействуют с ней через процессы перезарядки и ионизации электрон-ионным ударом, тем самым передавая энергию плазме.

Магнитное поле в термоядерных установках препятствует попаданию инжектируемых ионных частиц внутрь плазмы, поэтому инжектируют нейтралы с энергией необходимой для нагрева. Для современных магнитных ловушек, имеющих большие размеры, необходимо инжектировать пучки с энергией частиц до 1 МэВ. Пучки нейтралов нужной энергии получают путем нейтрализации положительных или отрицательных ионов.

Эффективность нейтрализации пучка ускоренных положительных ионов водорода на газовой мишени при энергии в 100 кэВ/нуклон составляет приблизительно 20 %, а при энергиях в 1 МэВ/нуклон и вовсе стремится к нулю, в то время как для отрицательных ионов она составляет около 60 % на более широком диапазоне энергий. Данный факт объясняется тем, что дополнительный электрон слабо связан с атомом водорода. Из-за слабой связи электрон легко отрывается при взаимодействии с другими частицами [1]. К примеру, инжекторы быстрых нейтралов на основе источников отрицательных ионов используются для нагрева плазмы в стеллараторе LHD и будут использованы в токамаке JT-60SA.

Технология получения пучков отрицательных ионов сложнее, чем положительных. Пучок отрицательных ионов в большей степени подвержен

различным разрушающим его процессам, в следствии чего плотность тока, получаемая в источнике отрицательных ионов на порядок меньше плотности тока получаемой в источнике положительных с сопоставимыми характеристиками. В свою очередь, все сложности, возникающие при создании и транспортировке пучка отрицательных ионов, окупаются за счет высокой эффективности нейтрализации.

В настоящее время для получения высокоэнергетичных пучков отрицательных ионов в ионных источниках инжекторов используется поверхностно-плазменный метод генерации, эффективность которого повышается при добавлении в источник цезия.

В данной работе были проведены измерение тока пучка при различных цезиевых режимах работы источника и анализ транспортировки пучка на расстояние в 10 метров от источника.

2. Получение пучков высокоэнергетических нейтралов с использованием источника отрицательных ионов

2.1. Образование пучков отрицательных ионов

Существуют несколько методов получения отрицательных ионов (ОИ). Плазменный (объемный) метод, перезарядный метод, поверхностно-плазменный метод [2]. Остановимся на последнем. Поверхностно-плазменный метод генерации ионов, разработанный в 1972 г. в ИЯФ, позволяет получать ОИ с высокой плотностью тока.

Поверхностно-плазменный метод основан на процессах неравновесной кинетической ионной эмиссии. Эмиссия ОИ – явление захвата электрона атомом с уровня ферми металла подложки [3]. Различают два процесса ионной эмиссии: термоионная эмиссия (энергия атома $\ll 1$ эВ) и кинетическая эмиссия (энергия атома ≥ 1 эВ). Термоионная эмиссия ОИ более эффективна, когда сродство иона к электрону больше работы выхода электрона из металла, т.е. электрону энергетически выгоднее перейти в связанное состояние с образованием ОИ.

Отрицательные ионы водорода обладают малым сродством к электрону: 0,754 эВ, что меньше работы выхода электронов с поверхности металлов. Для создания пучков ОИ водорода используют кинетический механизм эмиссии. Для кинетической эмиссии необходимо, чтобы кинетическая энергия иона была больше потенциала связи электрона с поверхностью. При данной эмиссии ОИ можно получить ионы с энергией сродства меньше, чем работой выхода поверхности [4].

Степень отрицательной ионизации α^- равна произведению вероятностей захвата вблизи поверхности P_0 и вероятности не потерять электрон $P_{\cdot 0}$ при удалении от поверхности (2.1) [5].

$$\alpha^- = P_{0-}(1 - P_{-0}) \propto \frac{1}{v_{\perp}} \exp\left(-\frac{\varphi - S}{\delta v_{\perp}}\right) \quad (2.1)$$

где v_{\perp} – перпендикулярная к поверхности компонента скорости, φ – работа выхода с поверхности, S – энергия электронного сродства иона.

Таким образом, для улучшения процесса генерации ОИ водорода на поверхности необходимо использовать электроды с как можно более меньшей работой выхода электронов с поверхности.

На рисунке 1 схематично показан поверхностно-плазменный метод образования отрицательных ионов. В газоразрядной плазме, созданной, например, из плазмы ВЧ разряда, за счет ионизации рабочего вещества образуются атомы и положительные ионы. Эти частицы ускоряются в плазме и бомбардируют поверхность плазменного электрода (электрода, контактирующего с плазмой). В результате часть налетающих частиц перезаряжается на поверхности сетки. За счёт кинетической эмиссии быстрый атом захватывает электрон с электрода, имеющего низкую работу выхода, и образует отрицательный ион.

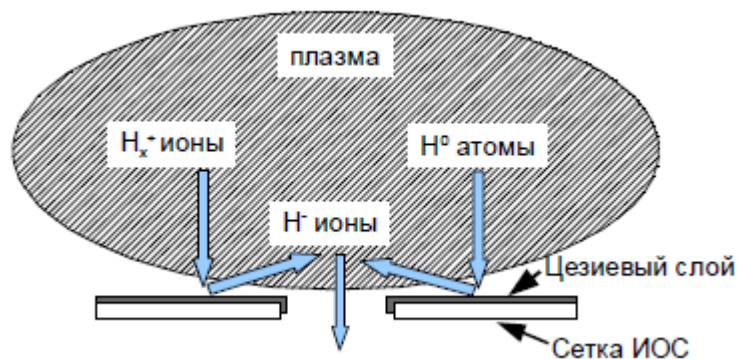


Рисунок 1. Схема поверхностной генерации отрицательных ионов.

Образованные ионы вытягиваются и формируются в пучок ионно-оптической системой (см. раздел 4.1). Для того, чтобы сформировать пучок с током в несколько ампер, используются многоапертурные электроды.

2.2. Нейтрализация пучков заряженных частиц

Инжекторы высокоэнергетичных нейтралов являются одним из основных способов нагрева плазмы до термоядерных параметров. Нейтральную инжекцию используют из-за того, что магнитные поля в термоядерном реакторе препятствуют попаданию заряженных частиц внутрь плазмы. Для получения пучка нейтралов необходимой энергии в начале разгоняют ионы, после чего их нейтрализуют. При прохождении пучка нейтралов через плазму происходит его ионизация и торможение.

Пучки атомов с высокой энергией можно создать как из положительных, так и из отрицательных ионов. На рисунке 2 изображена зависимость эффективности нейтрализации ионов водорода и дейтерия на газовой мишени от энергии нейтрализуемых частиц. При энергиях меньше 20 кэВ/нуклон эффективность нейтрализации ионов составляет 90 %. С дальнейшим ростом энергии эффективность падает и уже при энергии в 100 кэВ/нуклон эффективность становится около 50 %, а при энергиях в 1 МэВ и вовсе стремится к нулю.

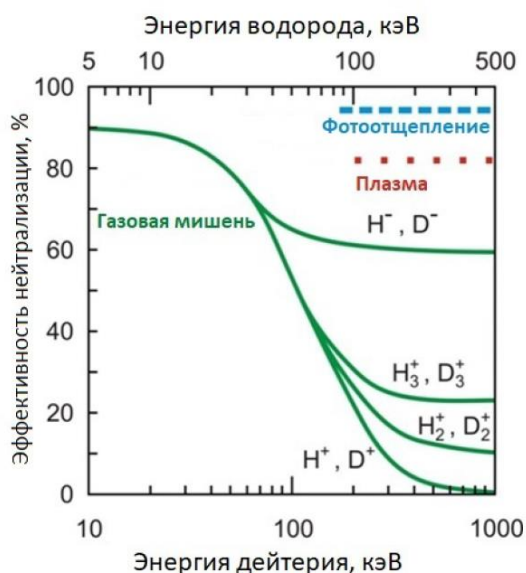


Рисунок 2. Эффективность нейтрализации ионов водорода и дейтерия на газовой мишени.

Сечение отрыва электрона от отрицательного иона слабо зависит от увеличения энергии, вследствие чего даже при энергиях в 1 МэВ эффективность нейтрализации сохраняется на уровне в 60 %.

Таким образом, для получения быстрых атомов из высокоэнергетичных частиц предпочтительно использовать ОИ.

2.3. Усиление поверхностно-плазменного механизма генерации ОИ

Чистая поверхность электродов имеет недостаточно низкую работу выхода (более 4 эВ) для генерации необходимого количества отрицательных ионов. В результате поисковых экспериментов удалось установить, что нанесение атомов щелочных металлов на поверхность металла приводит к уменьшению работы выхода и, как следствию, увеличению генерации ОИ. Наилучший результат показывает цезий.

Цезий химически самый высокоактивный металл, который является сильнейшим восстановителем. Из-за своей химической активности он образует огромное количество соединений на основе ионной связи, в связи с чем его также используют как гетер, для поглощения остаточных газов.

В связи с этим, на поверхности эмиттера отрицательных ионов создают однородное самоподдерживающееся цезиевое покрытие. Покрытая цезием поверхность имеет работу выхода заметно ниже чем у чистого электрода. Для удобного описания степени покрытия поверхности используется внесистемная единица измерения: монослой. Для цезия на молибдене монослой соответствует $4,5 \cdot 10^{14}$ атомам на см^2 на поверхности электрода. Значение плотности покрытия монослоя варьируется в зависимости от материала покрытия и материала электрода [6]. Следует обратить внимание, что наименьшая работа выхода достигается не при однородном цезиевом покрытии электрода, а при частичном. Зависимость работы выхода от коэффициента покрытия и от разных материалов электрода, показана на рисунке 3. Как видно из графика, работа выхода имеет минимум. Этот

минимум достигается при покрытии $\sigma_{min} = 0,5 - 0,7$ монослоя и составляет $\varphi_{min} \sim 1,5$ эВ [7]. Уменьшение работы выхода происходит благодаря формированию химического соединения между цезием и металлом электрода, в результате чего образуется дипольный слой. В свою очередь, если толщина цезиевого слоя на электроде превысит значение в $0,5 - 0,7$ монослоя, то работа выхода начинает расти, и дорастает до уровня полностью покрытой цезием поверхности (φ_{equ}).

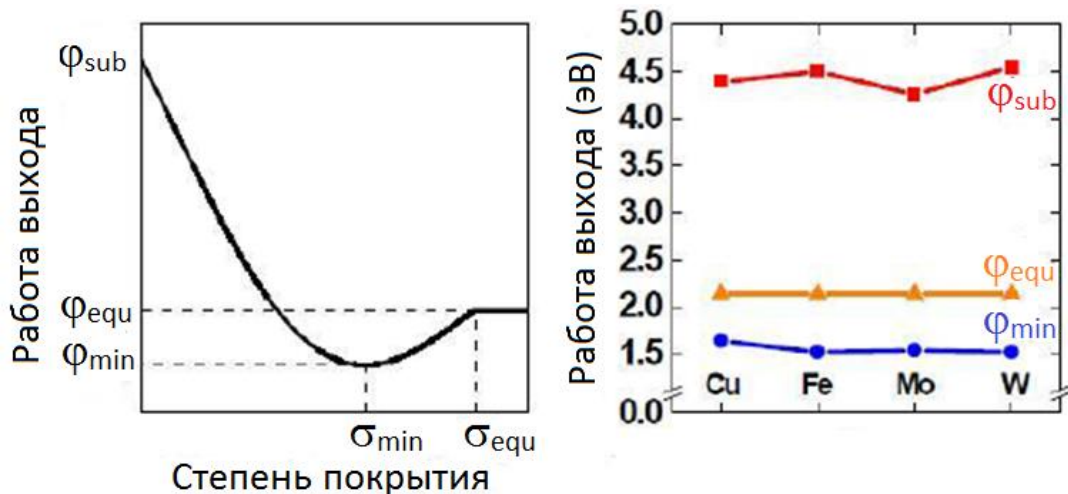


Рисунок 3. Зависимость работы выхода от степени покрытия цезием (слева) и от материала электрода (справа).

Цезий легко воспламеняется на воздухе, образуя пероксид, а при малом содержании кислорода образуются оксиды, в том числе и на плазменном электроде. Энергия связи оксида цезия $Cs_2O \sim 2$ эВ. Образование оксида цезия на плазменном электроде увеличивает работу выхода, необходимую для кинетической эмиссии. Отсюда вытекает проблема ввода цезия в источник.

На данный момент для подачи цезия в источники отрицательных ионов используются 2 основных способа: напуск металлического цезия из ампул и выделение ранее прореагировавшего цезия из таблеток.

Металлический цезий. Из-за его активного взаимодействия с атмосферой, данный способ относят к опасному типу подачи. Чистый цезий перевозится в закрытых стеклянных ампулах (рисунок 4, слева), которые помещаются в печь и лишь после откачки атмосферы данные ампулы разламываются, тем самым высвобождая чистый цезий.



Рисунок 4. Металлический цезий и прореагировавший цезий в таблетках.

Выделение прореагировавшего цезия из таблеток. Ввиду того, что таблетки, содержащие цезий, можно переносить на открытом воздухе, так как цезий в таком виде не вступает в реакции с атмосферой, данный способ можно считать безопасным (рисунок 4, справа).

2.4. Поддержание цезиевого покрытия на эмиттере ОИ

Выделенный цезий с помощью галереи раздачи (описание в разделе 3) в результате термодесорбции и переноса цезия разрядом равномерно распределяется по плазменному электроду, но со временем слой деградирует. Одной из причин деградации слоя является термодесорбция атомов цезия с нагретой поверхности электрода.

Плотность термодесорбционного потока можно описать формулой Френкеля [8]:

$$\frac{dN}{dt} = -N\omega e^{-I^0/T} \quad (2.3)$$

где N – поверхностная концентрация, ω – эффективная частота колебаний адсорбированной частицы на поверхности, T – температура поверхности, I^0 – теплота десорбции цезия (для оптимальных покрытий цезия на молибдене $I^0 \sim 2$ эВ).

Ввиду того, что коэффициент прилипания цезия к поверхности тугоплавких металлов близок к единице, можно найти необходимый поток цезия для компенсации десорбции как:

$$N\omega e^{-t^0/T} = \frac{n\bar{v}}{4} \quad (2.4)$$

где n – объёмная плотность цезия, \bar{v} – средняя скорость атомов цезия.

К примеру, при характерной для источников ОИ температуре плазменного электрода $T = 700$ К, для компенсации термодесорбции цезия на молибдене необходим поток цезия с плотностью примерно $3 \cdot 10^{14}$ см²с⁻¹ [8].

3. ВЧ поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов для прототипа инжектора высокоэнергетичных нейтралов ИЯФ

3.1. Источник отрицательных ионов водорода для инжектора

В институте ядерной физики для будущего применения на мощных термоядерных установках типа ИТЭР, был создан прототип ВЧ поверхностно-плазменного источника ОИ. Сравнение параметров инжекторов представлено в таблице ниже. Для инжекторов ИТЭР требуется мощный источник ОИ с током ~ 48 А, с энергией ~ 1 МэВ и с длительностью импульса ~ 3600 секунд. Площадь плазменного электрода ИТЭР 2 м^2 , а у прототипа источника ИЯФ 12.4 см^2 . Таким образом разница между источниками заключается в площади поверхности плазменного электрода, в то время как плотность эмиссии ОИ примерно одинаковая.

Таблица. Сравнение планируемых параметров инжекторов высокоэнергетичных нейтралов ИЯФ и ИТЭР. [9]

Параметр	ИЯФ	ИЯФ прототип	ИТЭР
U_{beam} , МВ	1		1
I_{ion} , А	9 (H^-)	1,5 (H^-)	46 (D^-)
$J_{\text{ion}}(\text{H}^-)$, А/ м^2	250	300	280
Мощность нейтральной инжекции, МВт	5	0,5	16,7
Длина импульса, с	1000	100	3600
Размер пучка, см x см	35 x 35	19 x 19	40 x 120
Количество апертур/диаметр, мм	142 / d16	21 / d16	1k / d14
Нейтрализатор	плазма или газ		Газ

На рисунке 5 представлена схема мощного поверхностно-плазменного источника с индукционным ВЧ разрядом, разработанным в ИЯФ. Плазма

создается в индукционном ВЧ драйвере с помощью разряда в водороде и направляется в расширительную камеру к плазменному электроду. В результате поверхностно-плазменного механизма генерации образуются отрицательные ионы H^- , которые вытягиваются и формируются в пучок с помощью трехэлектродной ионно-оптической системы (ИОС). В ВЧ источнике ОИ имеется 25 апертур для вытягивания и формирования пучка. В ходе экспериментов отверстия по углам были закрыты. В проводимых экспериментах, электрод, находящийся на потенциале земли, необходимый для запираания вторичного потока положительных ионов, идущего навстречу пучку, был убран.

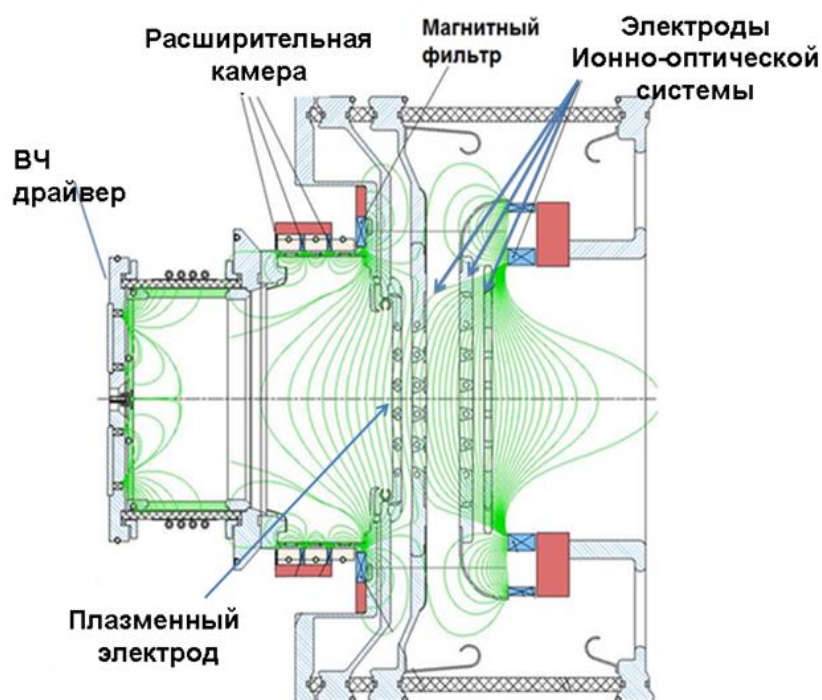


Рисунок 5. Схема источника ИЯФ.

Усиление поверхностной генерации ионов H^- обеспечивается подачей цезия на поверхность плазменного электрода. Для создания однородного цезиевого покрытия на поверхности используется цезиевая система, схема которой показана на рис. 6-7.

На рисунке 6 изображена схема подачи цезия в распределительную систему. Цезий содержащие таблетки (1) загружаются в цезиевую печь. Далее, с помощью внешнего нагревателя (2) таблетки нагреваются до

температуры более $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в результате экзотермической реакции выделяется металлический цезий, который накапливается в нагреваемом контейнере.

Охлаждение контейнера можно регулировать изменением температуры «холодной точки» (3). «Холодная точка» нагревается из-за теплообмена с контейнером, а охлаждение проводится с помощью внешнего вентилятора (направление потока воздуха показано стрелкой на рис. 6). Для того чтобы избежать образования пробок, в распределительной трубке используется нагрев внутренним термокабелем (5), который при выделении цезия из таблеток поддерживает температуру цезиевой галереи $260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура плавления цезия $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление в распределительной трубке равно давлению насыщенного пара жидкого цезия. Давление насыщенного пара является зависимой функцией температуры. Таким образом, с помощью контроля температуры «холодной точки» цезиевой системы можно управлять давлением цезиевого пара и изменять поток цезия через галерею в источник. Из-за того, что на «холодной точке» температура ниже, чем в распределительной трубке и в печи, металлический цезий преимущественно скапливается на ней. Чем выше температура «холодной точки», тем большая часть цезия уходит в трубку и поступает дальше на плазменный электрод источника.

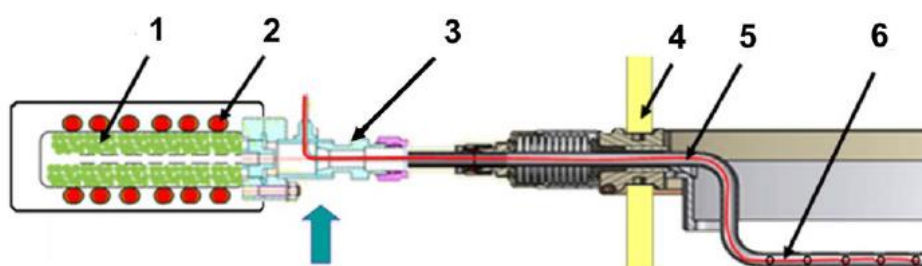


Рисунок 6. Схема подачи цезия: 1 – цезиевые таблетки, 2 – нагреватель контейнера, 3 – «холодная точка», 4 – граница атмосфера-вакуум, 5 – термокабель, 6 – Отверстия для подачи цезия на электрод. Стрелкой показано внешнее охлаждение «холодной точки» воздухом.

Плазменный электрод с галереей раздачи изображён на рисунке 7. Во время работы источника ионов цезиевый слой постепенно беднеет из-за распыления и испарения плазмой. Для решения этой проблемы было решено

использовать галерею раздачи для вывода паров цезия непосредственно с периферии электрода к ее центру, что и является главной особенностью такой схемы.

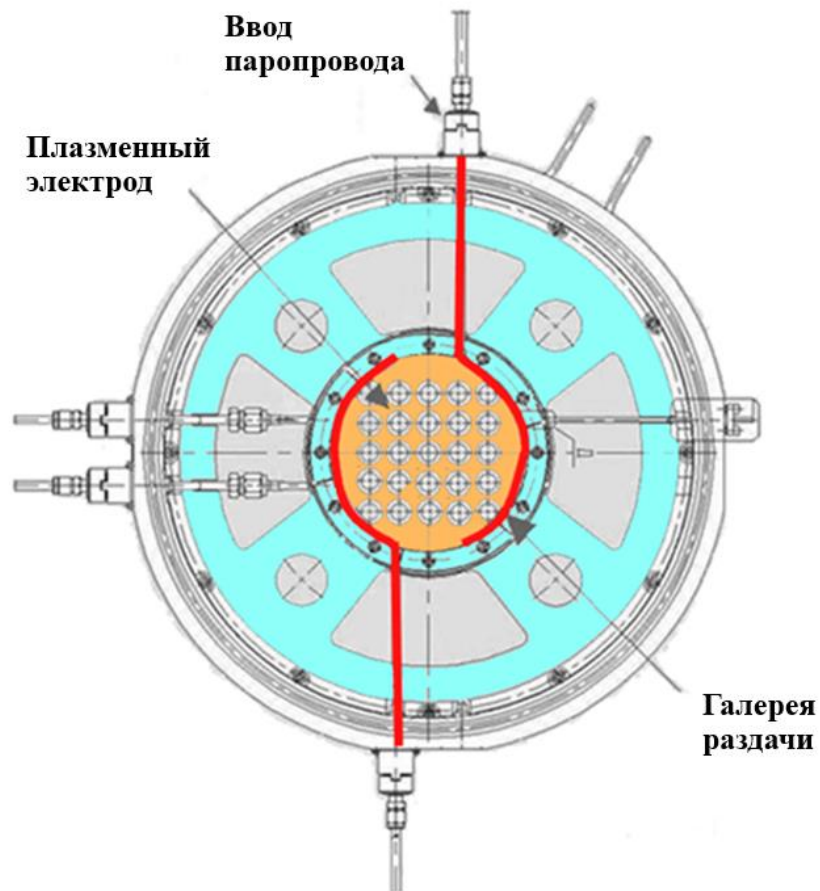


Рисунок 7. Схема галереи раздачи и плазменного электрода. Верхняя и нижняя трубки галереи раздачи выделены красным цветом.

Как видно из рисунков 6 и 7, металлический цезий попадает на плазменный электрод через распределительно-накопительную трубку диаметром 6 мм сквозь отверстия, направленные к центру электрода, с диаметром 0,3 мм, что и обеспечивает однородный поток цезия на поверхность плазменного электрода [10].

3.2. Создание цезиевого покрытия на плазменном электроде для усиленной генерации отрицательных ионов

Процедура выделения и подачи цезия из печки на плазменный электрод

На установке использовались таблетки из смеси хромата цезия и титана (рисунок 4). Данные таблетки при температуре порядка 500 °С в ходе экзотермической реакции по формуле 3.1 выделяют металлический цезий.



В одной таблетке массой 40 мг содержится 4 мг цезия. Одновременно в печку помещается до 500 таблеток. Основной недостаток данного способа: помимо цезия из таблеток также выделяются другие элементы, такие как водород и вода. «Избыточный титан» в таблетках используется в качестве геттера, который связывает газы, выделяющиеся из таблеток.

На рисунке 8-9 представлена типичная эволюция тока пучка на цилиндре Фарадея и линий, характеризующих парциальное давление элементов, при выделении цезия из таблеток. Для оптимально выделения цезия необходимо непрерывно следить за температурой «холодной точки», которая находится в диапазоне 120 – 200 °С, регулировать мощность печки (0 – 200 Вт) и следить за изменением количества водорода в баке. Сильный поток цезия в источник может повлиять на условия разряда и на высоковольтную прочность источника.

В ходе экспериментов с помощью квадрупольного масс анализатора измерялось давление большого числа элементов, в том числе аргона, кислорода и т.д. На рисунке 9 отдельно представлены изменения линии парциального давления водорода (2 а.е.м.) и воды (18 а.е.м.) в этом же эксперименте, так как эти линии значительно всего изменялись в ходе эксперимента.

Нагрев печки начался в 16:00 и через 22 минуты начал выделяться водород из таблеток. Давление растёт экспоненциально из-за увеличения

температуры таблеток в печке. Далее давление водорода в баке не изменяется в интервале времени с 17:08 до 17:30. Стационарный уровень давления соответствует равенству выделения водорода и скорости откачки из бака. Последний рост начинается, когда мощность нагрева печки поднимается выше 120 ватт (~ 17:40). Это соответствует началу обильного выделения цезия. Также, можно заметить, что в момент выделения цезия давление воды в баке резко падает, так как цезий активно реагирует с водой. Нагрев цезиевых таблеток был отключен в 17:57, когда ток пучка и давление водорода начали спадать из-за того, что цезиевое покрытие в источнике возросло настолько, что откачка водорода цезием стала быстрее чем его выход из таблеток. В этот же момент охлаждение «холодной точки» было включено на максимальную мощность, чтобы остановить экзотермическую реакцию в таблетках и прекратить напуск цезия в распределительную галерею. После остывания печки часть выделенного из таблеток цезия остается на «холодной точке» и в трубках галерей раздачи. Поэтому с помощью подогрева трубки можно выделять дополнительный цезий, не включая печку.

Ток пучка на цилиндре Фарадея, в ходе данного эксперимента, стабильно держался на уровне в 50 мА до выделения водорода из таблеток, что соответствует полному току пучка ОИ ~ 600 мА на выходе из источника. Когда скорость выделения и откачки водорода сравнялись, ток пучка немного снизился, опустившись до 40 мА. В момент выделения цезия ток пучка начал резко расти и дорос до 80 мА. Затем, когда выделение цезия прекратилось ток пучка постепенно начал снижаться (после 18:00), из-за перераспределения цезия в ВЧ драйвере источника и связанного с этим понижением мощности вкладываемой в ВЧ разряд [11]

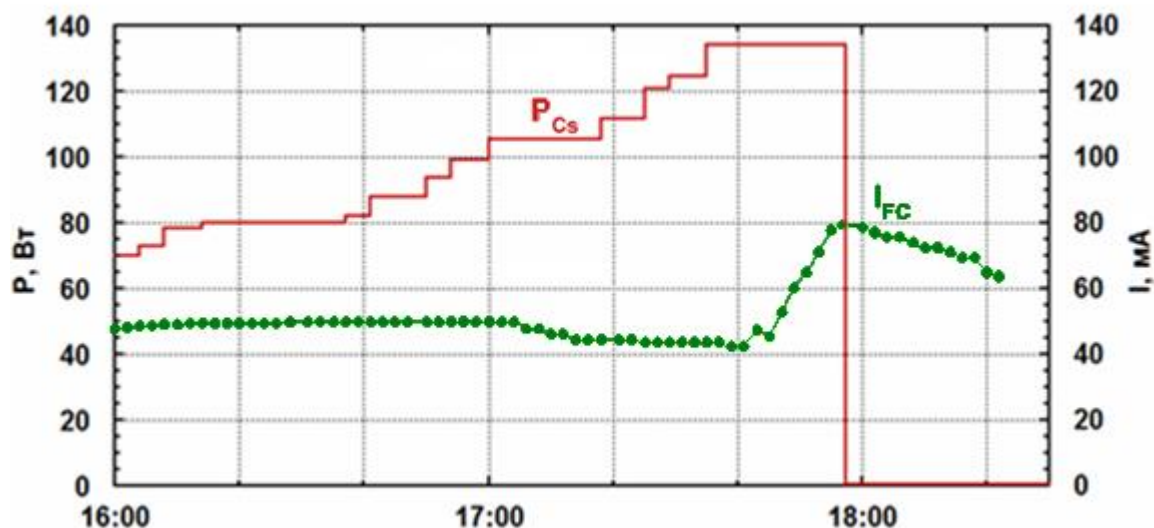


Рисунок 8. Типичная эволюция тока пучка при выделении цезия из таблеток. I_{FC} – ток пучка на ЦФ (диаметр 100 мм) на расстоянии 1.6 м от источника, P_{Cs} – мощность нагрева цезиевой печи.

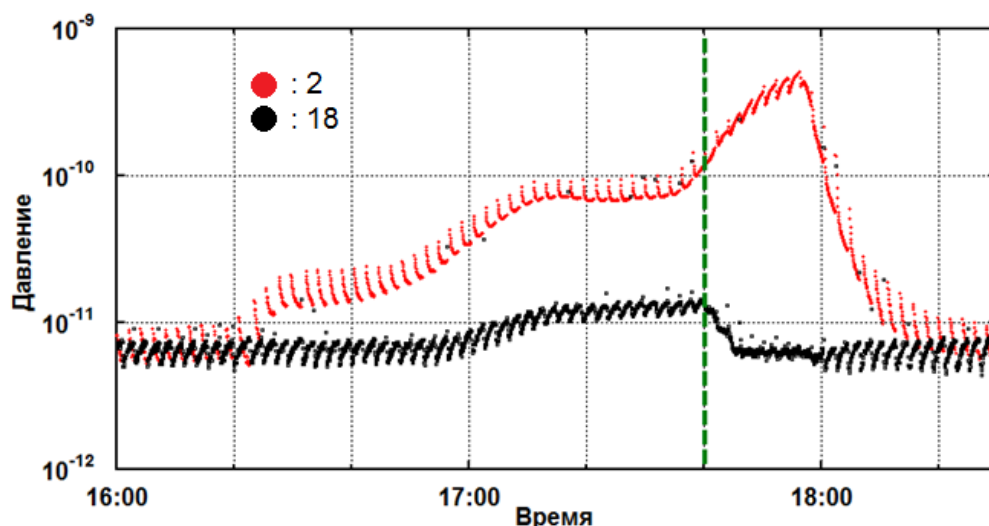


Рисунок 9. Эволюция линий давления воды и водорода при выделении цезия из таблеток в логарифмическом масштабе. 2 – водород, 18 – вода.

Уменьшение тока пучка перед резким его скачком обусловлено ухудшением цезиевого слоя на электроде при его отравлении газом из таблеток и со стенок нагретой печи.

В ходе экспериментов, было установлено, что подачу цезия в источник отрицательных ионов можно так же проконтролировать с помощью изменения линий воды и водорода в расширительной камере, не опираясь на измерения тока пучка в ходе регулярных импульсов.

Подача цезия с «холодной точки»

После выделения цезий оседает на стенках «холодной точки». Для повторной подачи цезия достаточно нагреть его до температур 150 – 200 °С. Таким образом, для длительного захода не обязательно каждый раз выделять цезий из таблеток. Помимо этого, после выделения цезий остается также в трубке галереи раздачи, на поверхности электрода и в баке. Для сохранения цезия в перерывах между работой установки, объем источника наполняют водородом (200 Па в 1м³). Цезий активно реагирует со всеми элементами остаточного газа. Например, с водородом образуется гидрид цезия CsH. Данное соединение очень полезно, так как позволяет сохранить прореагировавший с водородом цезий для последующих экспериментов. Энергия диссоциации гидрида цезия равна 1,82 эВ, которая легко разрушается плазмой разряда.

На рисунке 10 представлена эволюция тока пучка при подаче цезия с «холодной точки». Для постепенной подачи цезия с «холодной точки» температура галереи находится в диапазоне 140 – 150 °С, выделенном красными линиями на рисунке. Точки на рисунке были сняты раз в 2 минуты. Период нагрева и охлаждения составляет порядка одной минуты. На графике представлено моментальное значение температуры «холодной точки» в момент выстрела пучка.

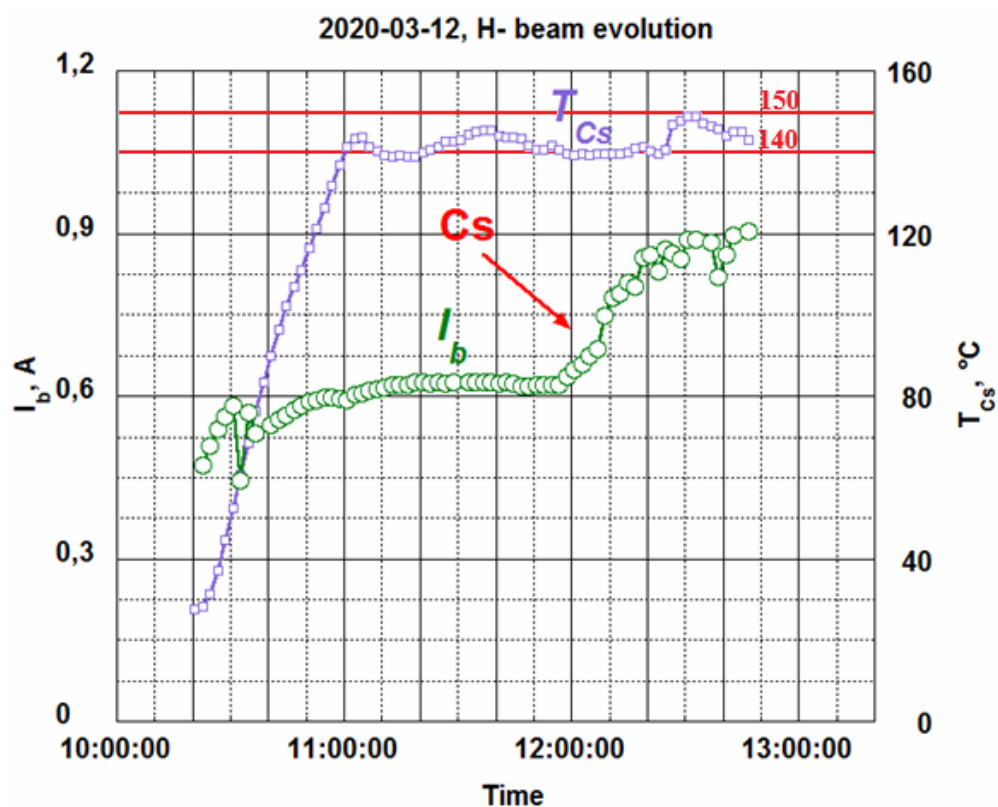


Рисунок 10. Эволюция тока пучка при подаче цезия с «холодной точки». T_{cs} – температура цезиевой галереи, I_b – ток пучка. Красными линиями выделен диапазон температур, в котором поддерживалась температура галереи.

В отличие от выделения цезия из таблеток в печи, за линиями давления следить уже вовсе необязательно. Данная подача цезия позволила увеличить ток пучка с 0,6 А до 0,9 А.

Улучшение покрытия плазменного электрода при работе с разрядом при небольшой добавке цезия и его деградация при работе без подачи цезия в ходе регулярного захода на источнике показана на рисунке 11.

В ходе первых импульсов проходит активизация цезиевого покрытия, накопленного на плазменном электроде, с помощью ВЧ разряда, в следствие чего ток пучка поднялся до значения 0,8 А (зеленые маркеры в начале захода на рис. 11). Постепенно цезиевое покрытие беднеет и ток пучка начинает снижаться (желтые маркеры на рис. 11). Небольшой подъем связан с оптимизацией параметров источника. Когда ток пучка стал опускаться до уровня 0,6 А, для восстановления генерации ОИ был включен нагрев

«холодной точки» с поддержанием температуры на уровне 150 – 160 °С (оранжевые маркеры на рис. 11). Ток пучка со временем восстанавливается, что в последствии позволяет обеспечить стабильную генерацию пучка (зеленые маркеры в конце захода на рис. 11). Стабильная генерация тока пучка соответствует значению тока 0,9 А.

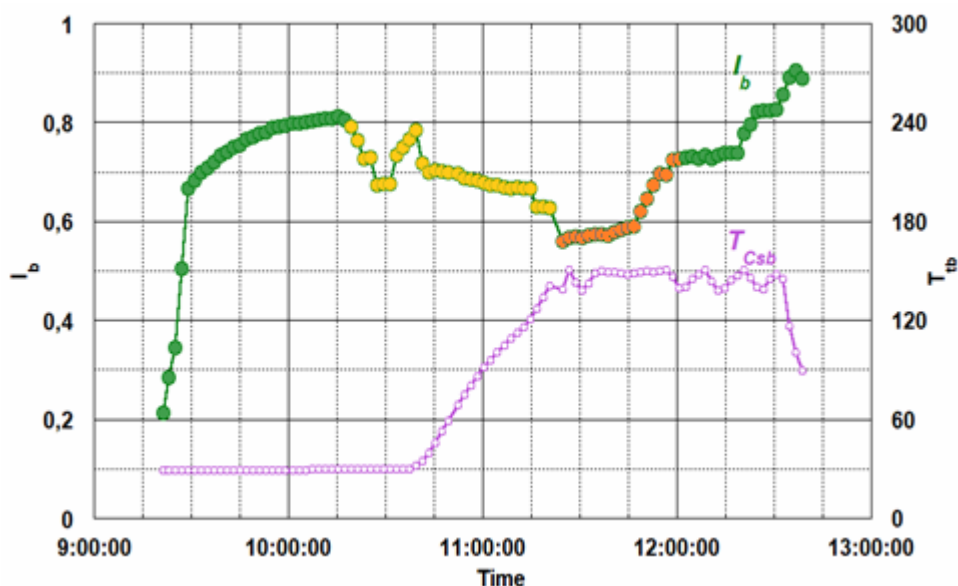


Рисунок 11. Управление усиленной генерацией пучка ОИ при контроле температуры «холодной точки». T_{csb} – температура нижней цезиевой галереи, I_b – ток пучка.

Контроль температуры «холодной точки» позволяет контролировать подачу цезия на электрод, обеспечивая его оптимальную подачу. Поток цезия с «холодной точки», при таких условиях, достаточен для обеспечения однородного покрытия.

Естественно, подача цезия таким образом может быть осуществлена пока на «холодной точке» остаётся достаточное количество цезия для формирования давления насыщенного пара. Для возобновления процесса подачи необходимо периодически выделять новый цезий из таблеток. Как правило, было достаточно одного выделения цезия раз в 3 месяца. Далее приведено экспериментальное измерение расхода цезия.

3.3. Длительный цезиевый эффект

Для того чтобы оценить расход цезия была проанализирована эволюция тока пучка после однократного выделения цезия из таблеток. На рисунке 12 рассмотрены данные в период с 10.05 по 7.06 2014 года.

После промывки установки и заполнения печки новыми таблетками был измерен ток пучка в отсутствие цезия. Как видно из рисунка 12, значение тока было в районе 0,4 А. Важно отметить, что ток пучка зависит от тренировки поверхности плазменного электрода. После выделения цезия из верхней печки (коричневый маркер на рис. 12) и тренировки поверхности ток пучка вырос до уровня 0,9 А. После дополнительного нагрева галереи и подачи цезия из нее (желтый маркер на рис. 12) ток пучка вырос еще на 10 %. Затем был выделен цезий из нижней печки (фиолетовый маркер на рис. 12) и прогревалась нижняя галерея для дополнительной подачи (синий маркер на рис. 12). Данные процедуры помогли поднять ток пучка до значений более чем 1 А.

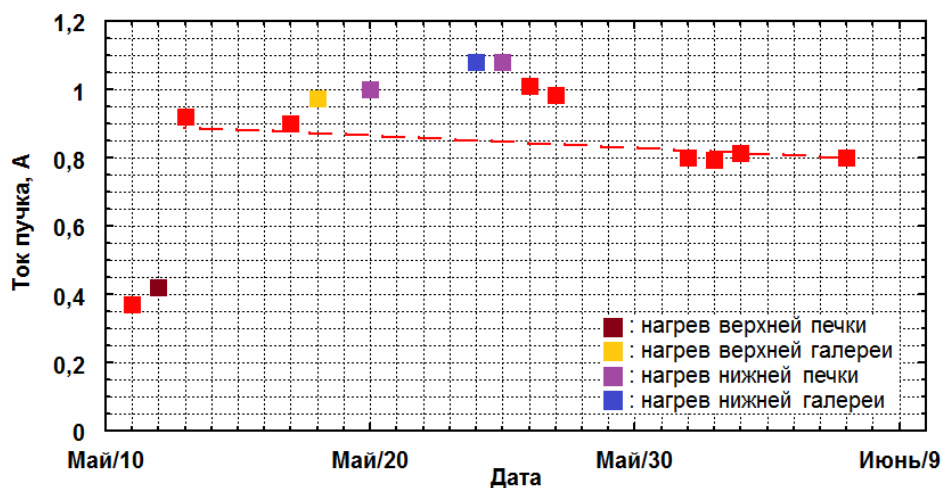


Рисунок 12. Эволюция тока пучка после нескольких подач цезия.

Таким образом, как видно из рисунка 12, однократной подачи цезия оказалось достаточно на период с 26 мая по 7 июня. Хватило бы и на большее время, но в связи с летней паузой эксперименты были приостановлены.

Дополнительно рассмотрим более свежие результаты. На рисунке 13 представлен график эволюции максимального тока пучка за период с 26.01 по

28.04 2020 года. В конце января из таблеток был выделен цезий и после 900 проведенных импульсов ток пучка постепенно опустился с 0,7 А, до 0,4 А. После паузы было решено подавать цезий с «холодной точки», после чего ток пучка сразу же вырос до 0,9 А. С дополнительной подачей цезия с «холодной точки» ток пучка удалось удерживать на данном уровне в течении двух месяцев, за время которых было произведено еще 1100 импульсов.

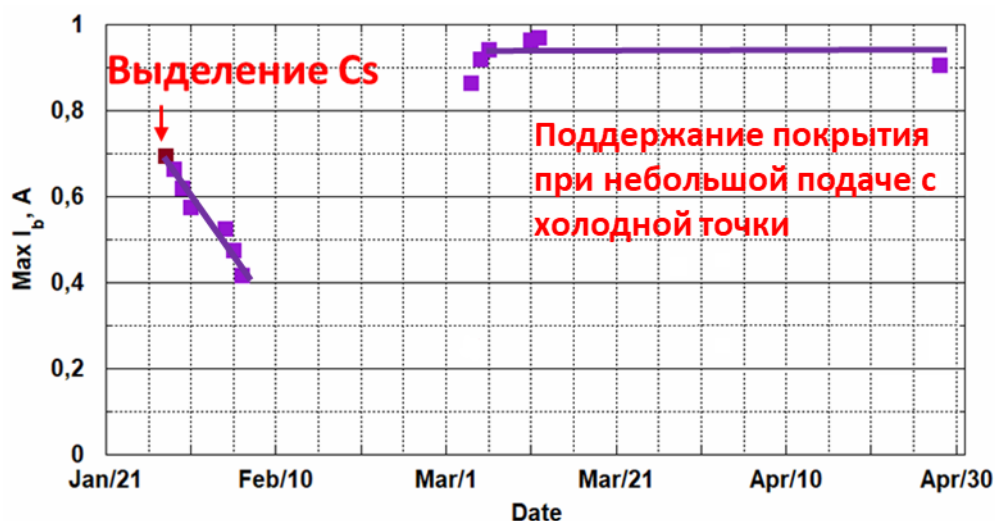


Рисунок 13. Эволюция тока пучка после выделения цезия из таблеток.

Как правило, из одних и тех же таблеток цезий удаётся выделить 4 – 5 раз. За одно выделение порядка 400 мг цезия, которого хватило более чем на три месяца работы, в ходе которой было произведено 2000 импульсов длительностью плазменного разряда 7 секунд и вытягивания пучка порядка 2 секунд. Таким образом, можно сделать верхнюю оценку расхода цезия: 14000 секунд – 400 мг, т.е. расход цезия при стрельбе короткими импульсами и большими паузами не более 0,1 мг/ч.

Таким образом, можно заключить, что дополнительная подача цезия из галереи при её нагреве плазменным разрядом уменьшает деградацию цезиевого покрытия на плазменном электроде. При этом отравление цезия в галерее может привести к усилению деградации цезиевого покрытия на поверхности плазменного электрода.

4. Исследование транспортировки пучка ОИ на экспериментальном стенде прототипа инжектора ИЯФ

Детальный план высоковольтного инжектора нейтралов с энергией пучка до 1 МэВ для установок с магнитным удержанием плазмы был описан в 2011 году [9]. Схема инжектора представлена на рисунке 14.

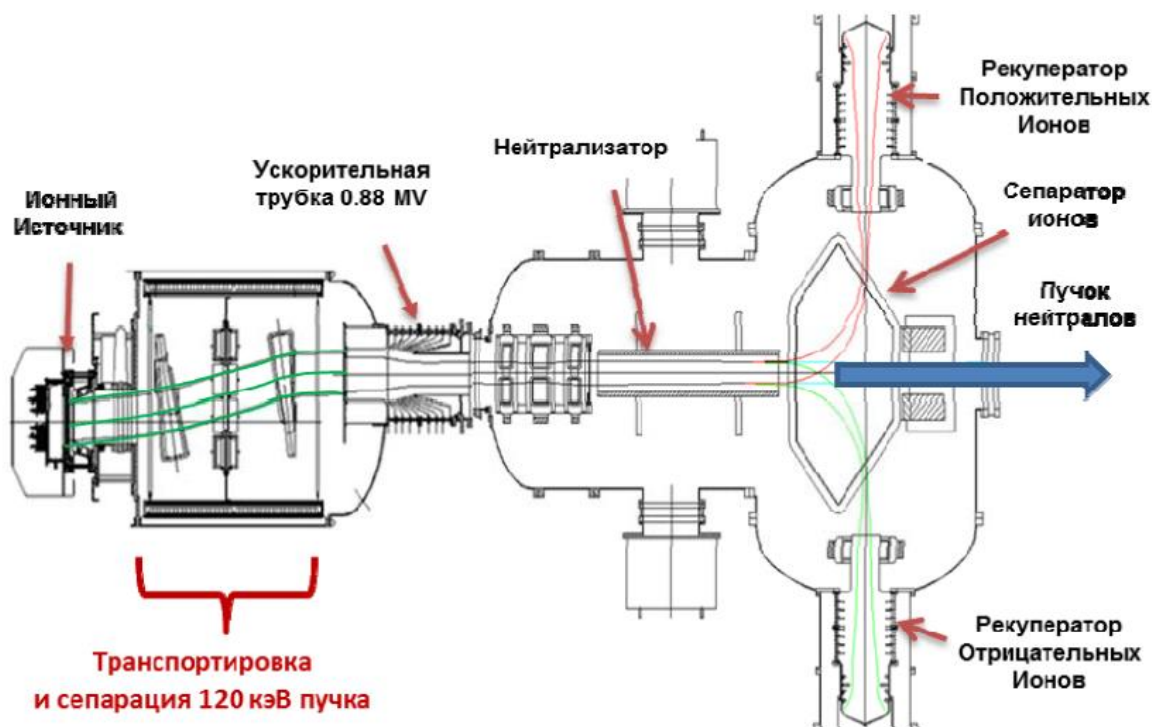


Рисунок 14. Схема высоковольтного инжектора ИЯФ с ускорением отрицательных ионов.

Инжектор включает в себя ионный источник (см. раздел 3), ускоритель, нейтрализатор, сепаратор и рекуператоры.

На рисунке 15 представлена фотография экспериментального стенда строящегося высоковольтного инжектора, на которой показаны его основные элементы. На момент проводимых экспериментов на месте нейтрализатора находился калориметр, который измерял попадающий на него пучок, а высокое напряжение на ускорительную трубку не прикладывалось. Сепаратор и рекуператор пока не установлены.

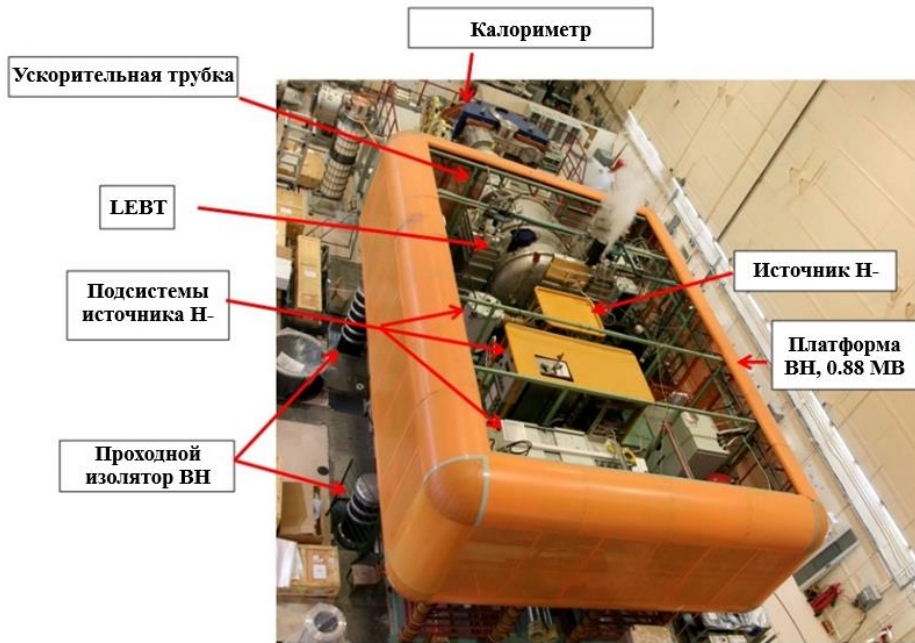


Рисунок 15. Фотография высоковольтного инжектора ИЯФ с ускорением отрицательных ионов.

4.1. Моделирование траекторий частиц в ИОС

О процессе образования ОИ было рассказано в разделе 2.1. Ниже рассмотрим, как формируется пучок ОИ в ИОС источника.

Важным фактором формирования пучков ОИ является положение плазменной границы. Представим частый случай, когда между двумя бесконечно протяженными плоскими электродами течет ток электронов. Ток будет зависеть от вытягивающего напряжения между электродами U , и расстояния между ними d .

Зависимость тока электронов j можно описать законом Чайлда-Ленгмюра для вакуумного диода (формула 4.1):

$$j_{3/2} = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{|U|^{3/2}}{d^2} \quad (4.1)$$

где e – элементарный заряд m_e – масса иона.

Данный закон можно обобщить для случая вытягивания ионов. В случае плазменного эмиттера ток эмиссии определяется процессами внутри плазмы

($j = en_0c_s$, где c_s – скорость ионного звука). При заданном напряжении U плазма заполняет пространство так, чтобы до коллектора остался зазор нужного размера [12]. Отсюда, приравняв $j = j_{3/2}$, получаем формулу 4.2.

$$d = \frac{\sqrt{2}}{3} * \left(\frac{2e|U|}{T_e} \right)^{3/4} * \lambda_d \quad (4.2)$$

где $\lambda_d = \sqrt{T_e/4\pi e^2 n}$ – длина Дебая, T_e – температура электронов, d – зазор между поверхностью эмиттера и коллектором ионов.

Моделирование формирования пучка в ИОС были произведены с помощью коммерческого кода PBGUNS. Для построения траектории программа решает уравнение Пуассона релаксационным методом и автоматически определяет положение плазменной границы.

Результат подобного расчета представлен на рисунке 16. Были приняты следующие параметры: электронная температура $T_e = 8.0$ эВ, ионная температура $T_i = 2.0$ эВ. Помимо траекторий пучка (красный цвет) и формы плазменной границы и эквипотенциальных линий электрического поля (зеленый цвет), моделировались диаграммы эмиттанса на заданных расстояниях и распределения плотности частиц в пучке.

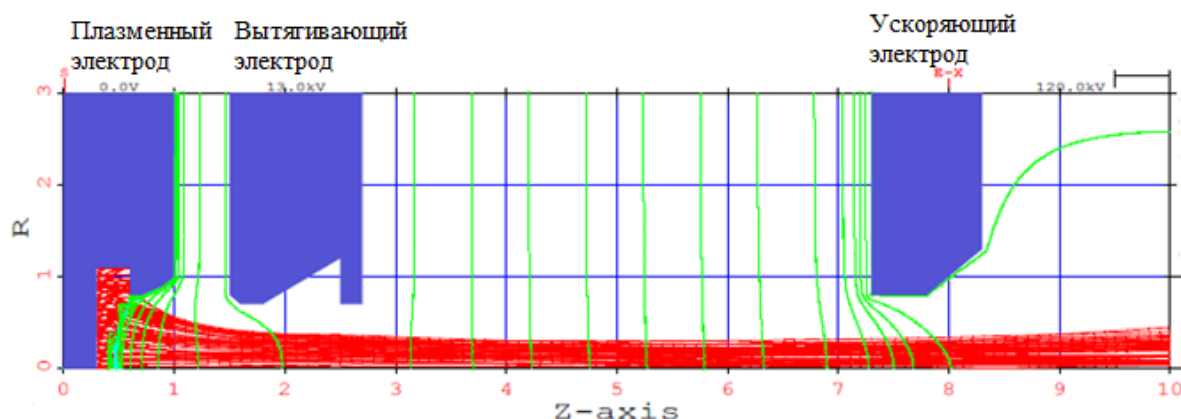


Рисунок 16. Элементарная ячейка ИОС и результат моделирования в программе PBGUNS: красным – траектории пучка и зеленым – эквипотенциалей.

Энергия пучка – 120 кэВ, плотность эмиссии ОИ – 30 мА/см²

Отметим, что при уменьшении ускоряющего напряжения пучок начинает оседать на ускоряющем электроде. Однако даже при полном отсутствии

ускоряющего напряжения около 50% пучка все равно проходит через ИОС. В результате моделирования в PBGUNS получена зависимость расхождения пучка от напряжения на ускоряющем электроде которая показана на рисунке 17.

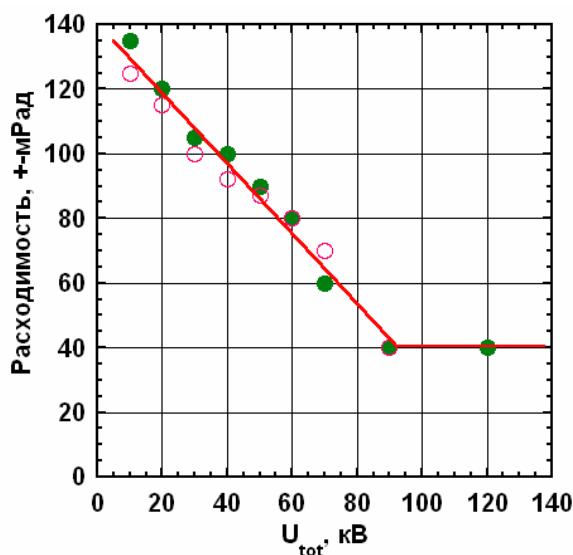


Рисунок 17. Зависимость расхождения пучка от напряжения на ускоряющем электроде. Плотность тока эмиссии 50, 60 мА/см².

Из рис. 17 видно, что для формирования пучка с угловой расходимостью 40 мРад необходимо приложить полное напряжение более 85 кВ.

4.2. Экспериментальный стенд исследования транспортировки пучка

На рисунке 18 представлена схема транспортировки пучка в проводимых экспериментах. Расчет траекторий пучка с энергией в 120 кэВ был произведен в программе COMSOL с угловой расходимостью пучка 40 мРад. Из источника пучок попадает в ЛЕВТ, где параллельно отклоняется с помощью двух магнитов. Далее пучок проходит через прицельное устройство # 1, который представляет собой диафрагму с отверстием в форме квадрата 240 x 240 мм, и попадает в ускорительную трубку, за которой располагается НЕВТ с двумя квадрупольными магнитами. На ускорительную трубку напряжение не подавалось, а электроды были заземлены. На выходе из НЕВТ находится прицельное устройство # 2 – диафрагма с отверстием в форме круга с

диаметром 190 мм. Далее пучок пролетает входную диафрагму калориметра с диаметром в 240 мм и попадает на калориметр.

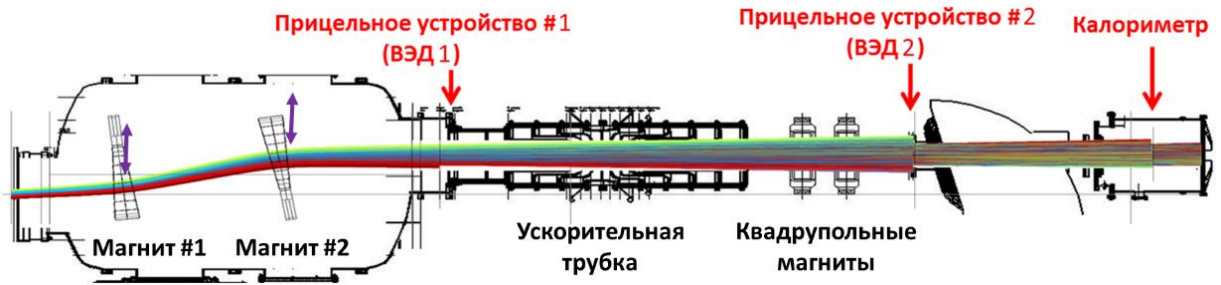


Рисунок 18. Схема транспортировки пучка ОИ на МЭВ стенде: пучок выходит из источника слева (не показан на рисунке), проходит через LEVT, входную диафрагму ускорительной трубки (прицельное устройство #1), ускорительную трубку с заземленными электродами, входную диафрагму в поворотный магнит (прицельное устройство #2) $d190$ и принимается на калориметр пучка. Расчет траекторий в Comsol: энергия 120 кэВ с угловой расходимостью ± 40 мРад.

У стенда можно выделить несколько основных элементов: LEVT (light energy beam tube), ускорительную трубку, HEVT (high energy beam tube) и калориметр.

LEVT представляет собой бак с двумя широкоапертурными поворотными магнитами, схема которых представлена на рис. 19. Размеры бака позволяют расположить большие крионасосы и обеспечить высокую скорость откачки газа $2 \cdot 10^5$ л/с.

Смещение пучка относительно оси источника ионов, необходимо чтобы защитить сам источник от потока встречных положительных ионов из ускорителя, а сам ускоритель от потока цезия и электронов из источника. Как видно из рисунка размер апертур магнитов больше измеренных (рис 19) и расчетных (рис 18) размеров пучка. Отметим, что основное магнитное поле магнитов создается постоянными NdFeB магнитами, для корректировки полей которых ($\pm 30\%$) используются электромагнитные катушки с изменяемым номиналом тока. С помощью первого магнита корректируется смещение пучка в LEVT, а вторым магнитом угол влета в ускорительную трубку. Необходимо тщательное согласование полей первого и второго магнита для

попадания центра пучка в центр калориметра. Небольшое изменение угла пучка в баке приводит к его существенному смещению на калориметре. Во время экспериментов пучок имел энергию до 85 кэВ. В связи с этим для проведения пучка на калориметр было необходимо скорректировать траекторию пучка в ЛЕВТ, изменяя магнитные поля поворотных магнитов.

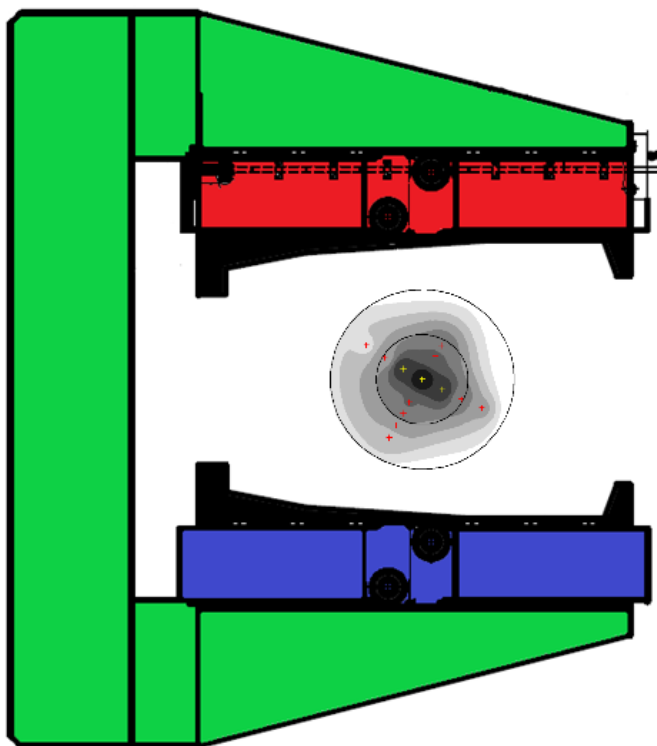


Рисунок 19. Профиль пучка на расстоянии 1.6 м от источника [13] относительно поворотного магнита.

Ускорительная трубка представляет собой одноапертурный многоэлектродный ускоритель с 8 зазорами для ускорения пучка, который добавит энергию первичного пучка с 120 кэВ до 0.33 – 1 МэВ.

НЕВТ секция для транспортировки пучка с полной энергией. В нем расположены ионно-оптические компоненты для фокусировки пучка (два квадрупольных магнита на рис. 18), диагностика пучка (описана далее), будет установлен нейтрализатор и магнитный сепаратор пучка от сопутствующих частиц (см. рис 14). Для фокусировки пучка в трубке используют два квадрупольных магнита.

Для изучения транспортировки пучка и его корректировки на выходе из ЛЕВТ, перед ускорительной трубкой и на выходе из НЕВТ (см. рис. 18) были

установлены прицельные устройства: ВЭД1 и ВЭД2, включающие в себя по 4 вторично эмиссионных датчика, на расстояниях в 3,5 м и 8 м от источника соответственно и калориметр на расстоянии в 10 м.

Схема прицельного устройства на выходе из ускорительной трубки представлена на рисунке 20. Окно ограничивающей пучок диафрагмы имеет диаметр 19 см. 4 вторично эмиссионных датчика располагаются по кругу диаметром 22 см.

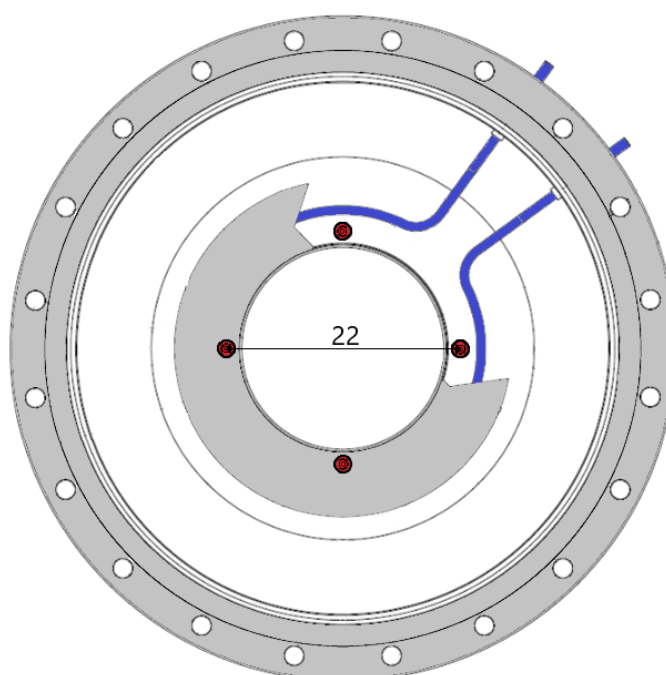


Рисунок 20. Схема прицельного устройства # 2 со вторично эмиссионными датчиками (выделены красным цветом) с трубками охлаждения (синий цвет) и окном диафрагмы (круг по центру).

ВЭД представляет собой металлический коллектор с диаметром 4 мм, который вставлен в металлическую диафрагму. На ВЭД подается напряжение -500 В от внешнего источника питания относительно потенциала диафрагмы. Пучок попадает на коллектор и вызывает ион-электронную эмиссию. Из-за того, что коллектор находится под минусом относительно стенок диафрагмы, то вторичные электроны летят на неё. Ток измеряемый в цепи 500 В выпрямителя характеризует плотность мощности пучка. Отметим, что чувствительность ВЭД к ОИ и к высокоэнергичным нейтралам одинаковая,

так как увеличенная эмиссия электронов ОИ компенсирована током прилетающих ОИ.

Схема и фотография приёмника пучка показана на рис. 21. Приёмник пучка представляет собой двустворчатый калориметр, рассчитанный для приёма пучка с током 1 А и энергией 1 МэВ. Каждая створка состоит из 15 медных блоков. В случае 1 МВт пучка, для отведения мощности попадающей на калориметр предполагается прокачивать через эти блоки воду с расходом 40 л/м. Так как длительность импульса была низкой (~ 2 с), а мощность пучка была менее 100 кВт, то в проводимых экспериментах охлаждение калориметра водой не производилось. Калориметр охлаждался за счет теплопереноса на элементы конструкции.

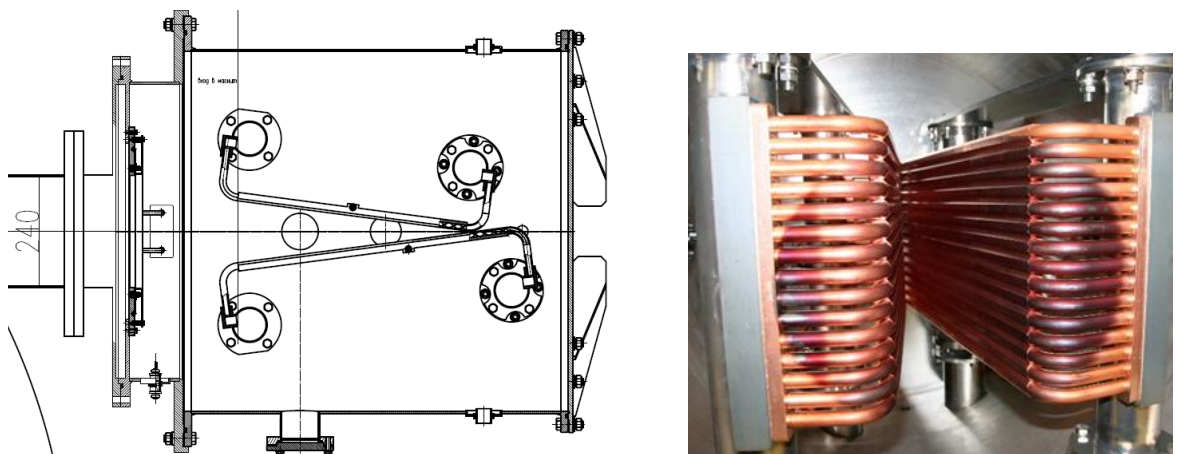


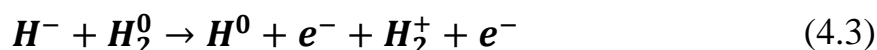
Рисунок 21. Схема двустворчатого калориметра для пучка с проектной мощностью 1 МВт. Фотография калориметра после серий экспериментов. Темное пятно – место в которое попадает пучок.

Для измерения профиля мощности пучка на медных блоках створок калориметра симметрично располагаются термопары: 7 датчиков в составе вертикальной линейки термопар и 1 сдвинутый относительно неё по горизонтали. Расстояние между вертикальными термопарами калориметра 36 мм. Горизонтальные датчики располагаются на расстоянии 100 мм от них и используются, чтобы контролировать положение ускоренного пучка относительно центра калориметра. Как видно из фотографии на рисунке 21 справа, часть пучка, которая попадает на калориметр имеет круглую форму,

которая вызвана обрезанием пучка на элементах транспортировочного канала (стенок ускорительной трубки, НЕВТ, входной диафрагмы калориметра).

4.3. Физические процессы при транспортировке пучка ОИ

Для транспортировки интенсивного пучка ионов в пространстве без внешних электрических полей необходима компенсация пространственного заряда пучка, которая в случае пучка ОИ выполняется за счет ионизации молекул остаточного газа в транспортировочном баке. Данный процесс описывается формулой (4.3).

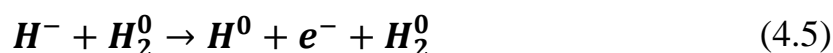


Приравнивая число ионизаций положительного заряда и ухода положительных ионов в единицу времени можно оценить необходимое давление в баке для компенсации пространственного заряда.

$$n_{vac} = \frac{2v_i}{v_H - r_0 \sigma_i} = \frac{2U_i^{0.5}}{v_H - r_0 \sigma_i m_i^{0.5}} \quad (4.4)$$

где n_{vac} – плотность частиц в вакуумном баке, v_H – скорость частиц пучка, v_i – скорость положительных ионов в направлении поперек v_H , r_0 – начальный радиус пучка, σ_i – сечение реакции ионизации молекул (формула 4.3), U_i – энергия положительных ионов, а m_i – масса ионов.

В нашем случае, основным процессом разрушения ОИ при их транспортировке является обдирка пучка на молекулярном водороде:



Сечение обдирки снижается при увеличении энергии с 5 кэВ. При энергии в 10 кэВ сечение реакции $\sigma = 10^{-15} \text{ см}^2$, а при 100 кэВ $\sigma = 4.5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$

4.4. Экспериментальное исследование транспортировки пучка ОИ

Экспериментальные данные полученные в ходе экспериментов на стенде исследования транспортировки пучка (см. рис 14) показаны на рисунках

22 – 23. В первую очередь было экспериментально подобрано оптимальное магнитное поле для транспортировки пучка. Для корректировки траектории пучка магнитное поле в магнитах было снижено, так как пучок имел энергию меньшую чем в расчетах.

Данные с ВЭДов представлены на рисунке 22. Максимумы сигналов, которые видны на графиках, соответствуют попаданию центра пучка по оси X в соответствующий датчик ВЭД. Когда на верхнем и нижнем датчиках сигнал максимален центр пучка находится в центре диафрагмы. Что говорит о том, что мы можем направить центр пучка через окно транспортировки при токе магнита #1 220 А (максимум блока питания), магнита #2 260 А.

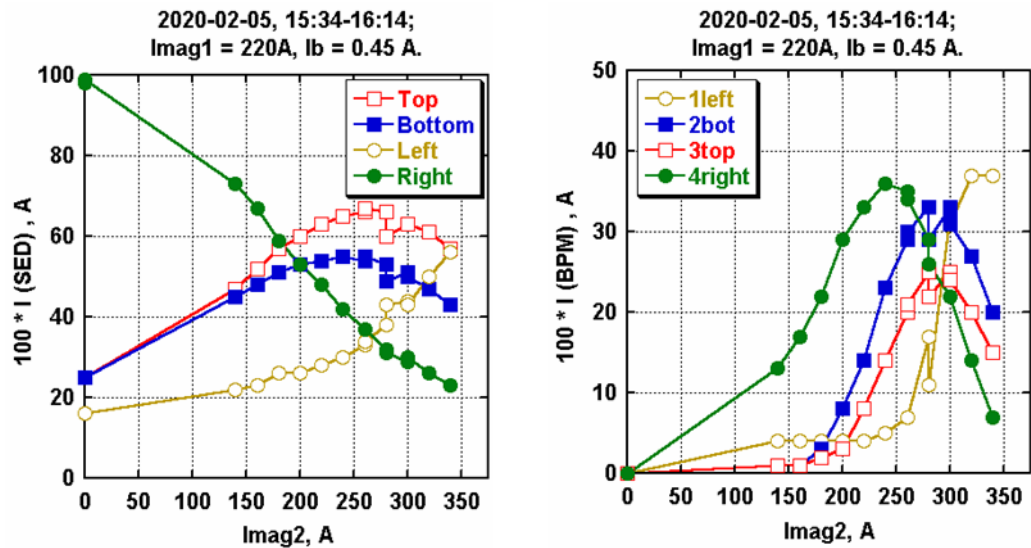


Рисунок 22. Зависимость попадающего на ВЭД пучка при различных значениях тока поворотного магнита №2. (ВЭД1 – SED, ВЭД2 – BPM).

Как итог, пучок ОИ был проведен приблизительно через центр прицельного устройства на входе в ускорительную трубку и через центр прицельного устройства на выходе из НЕВТ.

Характерные осциллограммы с ВЭД показаны на рисунке 23. Частота точек на осциллограмме соответствует частоте измерения АЦП, которая составляет 10 Гц. Видно, что отсутствует изменение сигналов на ВЭД во время импульса, это говорит о том, что разрушение пучка и давление в баке постоянно, а генерация пучка и его угловая расходимость не зависит от времени.

Справа на рисунке показан нагрев термопар калориметра в течение регулярного 1,7 с импульса. Однородный тепловой профиль показывает, что пучок, в случае отсутствия ускорения в трубке, сильно больше калориметра. Однородный нагрев термопар калориметра позволяет оценить ток части пучка прошедшей на калориметр (смотри ниже).

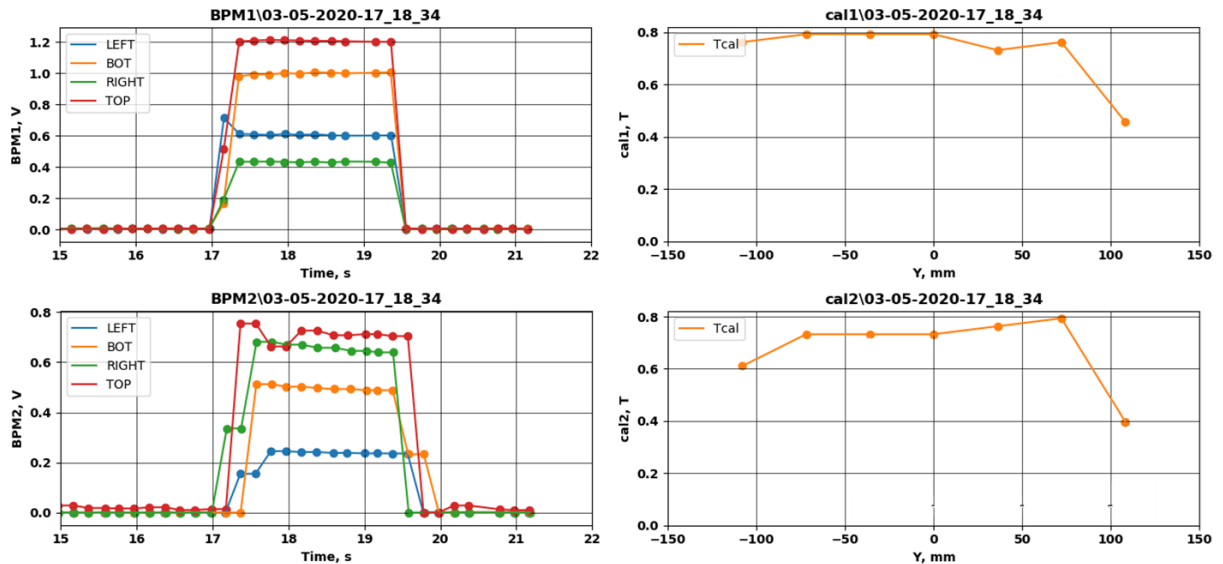


Рисунок 23. Характеристики транспортированного 84 кэВ пучка Н: осциллограммы пучка, измеренного на ВЭД (слева) и вертикальный профиль пучка на калориметре (справа).

По первым вторично эмиссионным датчикам видно, что пучок находится по центру прицельного устройство (окна) и попадает в ускорительную трубку, так как значения с противоположных датчиков находятся примерно на одном и том же уровне. Сигнал со вторых вторично эмиссионных датчиках на выходе из НЕВТ уже стал смещен правее и выше. При необходимости можно более аккуратно настроить магниты для более точного прохождения пучка, однако существуют иные, более предпочтительные, способы фокусировки, которые будут разобраны далее.

После всех корректировок на калориметре было получено равномерное пятно, что соответствует расчетам в программе COMSOL.

Для оценки того, какая часть пучка оседает на калориметре воспользуемся законом Джоуля – Ленца, представленным формулой 4.6, в

приближении того, что пучок на выходе из НЕВТ и на входе в диафрагму калориметра имеет однородное распределение поперек пучка.

$$I \times U \times t = C \times m \times \Delta T \quad (4.6)$$

где, I – ток пучка, U – напряжение между, C – удельная теплоемкость меди, m – масса створок калориметра, ΔT – изменение температуры меди.

Расчетный ток отрицательных ионов, пролетевший на расстояние 10 м, составил – 0,02 А, что составило около 3 % от изначального тока пучка. Уменьшение пучка обусловлено угловой расходимостью при отсутствии ускорения в ускорительной трубке.

4.5. Способы улучшения транспортировки ОИ

Основным шагом для уменьшения размеров пучка является включение ускорительной трубки, которое запланировано на конец 2020 года. По расчетам, в случае ускорения на первом зазоре ускорительной трубки >100 кВ весь пучок, прошедший через входную диафрагму ускорителя, попадет в калориметр (см. рис. 17). Так же увеличение энергии пучка на выходе из источника позволит провести его большую часть к калориметру.

В формуле 4.4 описывается необходимое давление для компенсации пространственного заряда, однако увеличение давления в линии транспортировки приводит к более сильной обдирке пучка, т.к. ОИ водорода обладают очень маленькой энергией сродства и легко отдают свой электрон. Главным образом обдирка происходит на молекулярном водороде (формула 4.5). С увеличением давления эффективность данного процесса также увеличивается.

Для более эффективной компенсации пространственного заряда при низкой обдирке пучка можно использовать подачу дополнительных газов, таких как Ar, Xe, N₂. Сечение ионизации молекул высокоэнергетичными ионами слабо зависит от сорта молекул [14]. Из формулы 4.4 видно, что

увеличение массы означает снижение необходимого давления для компенсации пространственного заряда.

Что немаловажно добавление тяжелых газов, вроде Хе, не только компенсирует отрицательный пространственный заряд пучка, но также приводит к появлению положительного пространственного заряда, который может дополнительно фокусировать пучок, при этом почти не разрушая его.

5. Заключение

Выделение цезия из таблеток в источник позволяет значительно повысить ток пучка ОИ. После однократной подачи цезия ток пучка выходит на стабильный уровень более 0.9 А.

Плазма ВЧ разряда нагревает галерею раздачи, и в результате термодесорбции высвобождает накопленный в галерее цезий. Данный дополнительный нагрев цезиевой галереи после подачи цезия из печи увеличивает ток пучка ещё примерно на 0,1 А.

Перераспределение ранее выделенного цезия с «холодной точки» приводит к восстановлению генерации пучка. Перераспределять цезий можно в течении нескольких месяцев, поддерживая стабильный уровень генерации пучка ОИ, в ходе проведенных экспериментов генерация поддерживалась в течении 1100 произведенных в ходе 4 месяцев работ импульсов.

Магнитные поля в ЛЕВТ были скорректированы для прохода пучка через центр прицельных устройств на входе ускорительной трубки и выходе из НЕВТ. Центральная часть пучка ОИ была успешно транспортирована на расстояние 10 м от источника в центр калориметра. Экспериментальный стенд подготовлен к экспериментам по дальнейшему ускорению пучка до энергий >100 кэВ.

Список литературы

- [1] Berkner K. H., Pyle R. V., Stearns J. W. Intense, mixed-energy hydrogen beams for CTR injection // Nucl. Fusion.— 1975.— V. 15 (2).— P. 249
- [2] Сотников О. З. Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов: дис. канд. физ. наук. — Новосибирск, 2018. — НГУ.
http://www.inp.nsk.su/images/diss/Sotnikov_disser.pdf
- [3] Belchenko Yu., Dimov G., and Dudnikov V. A powerful injector of neutrals with a surface-plasma source of negative ions // Nucl. Fusion.— 1974.—V. 14 (1).— P. 113
- [4] Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г., Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов. — Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1977. — 43 с.— Препринт 77-56.
- [5] Hiskes J. R., Schneider R. J. Formation of H- and D- ions by hydrogen and deuterium particle backscattering from alkali-metal surfaces // PHYSICAL REVIEW B.— 1981.— V. 23.— P. 949
- [6] Raphael Gutser. Experiments and Simulations for the Dynamics of Cesium in Negative Hydrogen Ion Sources for ITER N-NBI. Doctoral dissertation. University of Augsburg, 2010.
- [7] Мишенин Д. В. Система цезирования для сильноточных источников отрицательных ионов: дис. магистра физ. наук — Новосибирск, 2012. — НГУ.
- [8] Давыденко В. И. Цезий в поверхностно-плазменных источниках отрицательных ионов: дис. магистра физ. наук. — Новосибирск, 1977. — НГУ.
- [9] Ivanov A. A., Abdrashitov G. F., Anashin V. V., et al. Development of a negative ion-based neutral beam injector in Novosibirsk // Rev. sci. instrum.— 2014.— V. 85.— P. 02B102

- [10] С.Г. Константинов. Система распределённой подачи цезия для увеличения эффективности мощных источников отрицательных ионов водорода. — М.: ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2017, 1. — 82 – 85 с.
- [11] Efficient cesiation in RF driven surface plasma negative ion source / Yu. Belchenko, A. Ivanov, S. Konstantinov, A. Sanin, O. Sotnikov // Review of Scientific Instruments 87, 02B133 (2016). doi: 10.1063/1.4935242.
- [12] И. А. Котельников, В. Т. Астрелин. Теория плазменного эмиттера положительных ионов. — М.: УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, июль 2015, 7. — 757 – 758 с.
- [13] Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use / Yu. Belchenko, G. Abdrashitov, P. Deichuli, A. Ivanov, A. Gorbonovsky, A. Kondakov, A. Sanin, O. Sotnikov and I. Shikhovtsev // Review of Scientific Instruments 87, 02B316 (2016). doi: 10.1063/1.4932583.
- [14] Cristhian A. Valerio-Lizarraga, Ildefonso Leon-Monzon, and Richard Scrivens Negative ion beam space charge compensation by residual gas // Phys. rev. ST Accel. beams.— 2015.— V. 18.— P. 080101