

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 **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Пильщиков Вячеслав Сергеевич

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: Исследование формирования пучка отрицательных ионов в сильноточном
поверхностно-плазменном источнике

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук, профессор

ИЯФ СО РАН

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

«.....».....2018 г.

Научный руководитель

аспирант, ИЯФ СО РАН

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

«.....».....2018 г.

Дата защиты: «.....».....2018 г.

Новосибирск, 2018

Оглавление

Введение.....	3
1. Теоретические аспекты транспортировки пучка отрицательных ионов.....	5
1.1 Обдирка пучка отрицательных ионов.....	5
1.2 Угловая расходимость пучка	6
1.3 Расталкивание пучка объёмным зарядом	6
2. Экспериментальный стенд	9
3. Транспортировка пучка ОИ	14
3.1 Моделирование транспортировки пучка в PBGUNS	14
3.2 Измерение профиля пучка ОИ с помощью ЦФ	15
Выводы	18
Список литературы	19

Введение

В управляемом термоядерном синтезе одним из основных способов нагрева плазмы является инжекция нейтральных атомов водорода и дейтерия. Ионный пучок не может быть введён непосредственно в плазму, так как ему препятствует магнитное поле установки, поэтому быстрые ионы должны быть предварительно перезаряжены, что позволяет сформировать пучки нейтралов, которые могут быть беспрепятственно введены в плазму [8]

В Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН проводятся эксперименты, связанные с получением пучков нейтралов и их инжекцией в плазму [10]. Нагрев плазмы не является единственным возможным приложением инжекции: она используется также для создания тороидального тока в токамаках, что делает её актуальной для приложений в будущих реакторах для УТС.

При энергиях порядка 100 кэВ/нуклон отрицательные ионы образуют нейтралы с заметно большей эффективностью, чем положительные ионы. Сравнение эффективности конверсии в нейтралы при перезарядке положительных и отрицательных ионов приведено на рисунке 1.

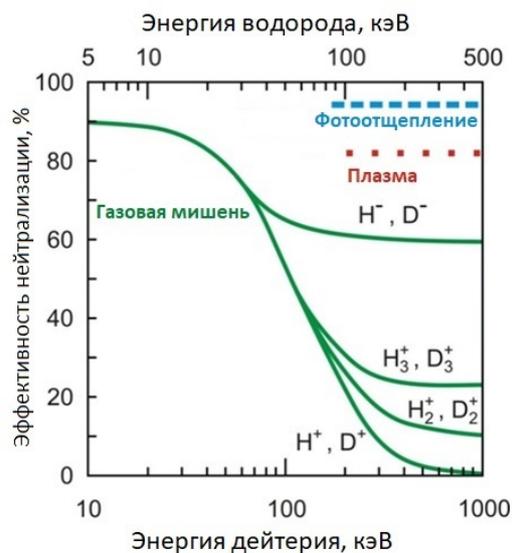


Рисунок 1 Сравнение эффективности конверсии в нейтралы

При использовании газовой мишени эффективность нейтрализации положительных ионов с увеличением энергии пучка устремляется к нулю, в то время как у отрицательных ионов она стремится к 65%. Это связано с тем, что отрицательные ионы (ОИ) обладают малым сродством к электрону, поэтому их эффективно использовать в инжекторах нейтральных атомов в установках по магнитному удержанию плазмы. Помимо этого, на рисунке приведены значения эффективности использования плазменной мишени (эффективность 80%) и эффекта фотоотщепления (эффективность 95 %).

Таким образом, предпочтительным способом генерации пучков высокоэнергетичных атомов является создание ускоренных пучков отрицательных ионов и их последующая нейтрализация. При высоких энергиях атомов в плазме нагреваются преимущественно ионы [8].

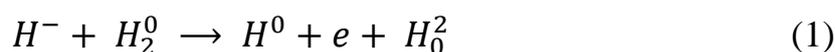
Однако низкая энергия сродства к электрону отрицательных ионов водорода 0,75 эВ, приводит к тому, что они легко разрушаются. Из-за этого ток пучка отрицательных ионов обычно на порядок меньше, чем ток пучка положительных ионов, при сопоставимых размерах источников [1]. В работе исследуются зависимости углового расхождения пучка от его энергии. Также исследуется динамика поперечного профиля пучка отрицательных ионов на расстоянии 1.6 м от источника ионов с помощью сканирования цилиндром Фарадея.

1. Теоретические аспекты транспортировки пучка отрицательных ионов

При транспортировке пучка отрицательных ионов через газовую мишень происходят три основных процесса: обдирка отрицательных ионов, расширение пучка вследствие угловой расходимости и расталкивания пучка объёмным зарядом.

1.1 Обдирка пучка отрицательных ионов

Основным процессом разрушения отрицательных ионов при их транспортировке является обдирка на молекулярном водороде [6]. Реакция, соответствующая этому механизму, следующая:



На рисунке 2 приведена зависимость сечения обдирки отрицательных ионов от энергии пучка. Как видно из рисунка, при энергии 10 кэВ сечение реакции равно 10^{-15} см^2 , а при 100 кэВ – $5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, то есть при увеличении энергии более 5 кэВ обдирка ионов происходит с меньшей эффективностью. Расчётная обдирка пучка в баке при давлении $3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ и энергии пучка 100 кэВ составляет 2% /м.

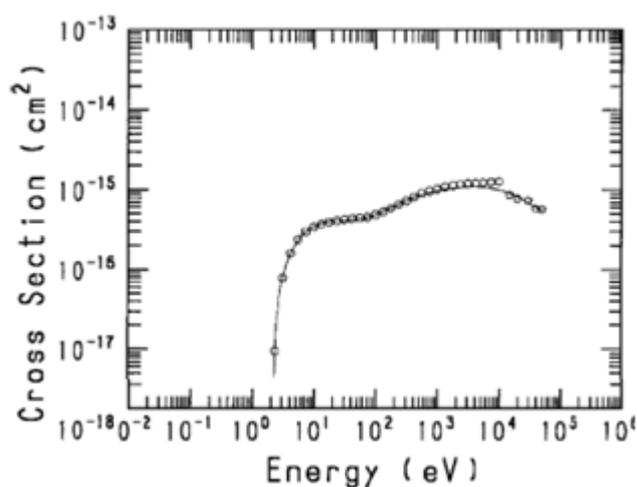


Рис. 2. Зависимость сечения обдирки отрицательных ионов водорода от энергии пучка

1.2 Угловая расходимость пучка

При формировании пучков в источниках ионы приобретают поперечную энергию, которая приводит к появлению угловой расходимости – пространственного уширения пучка, - приводящей к изменению поперечного размера пучка по продольной координате.

Оценка угловой расходимости пучка, приобретаемая в источнике, проводилась с помощью программы PBGUNS. На рисунке 3 представлены результаты моделирования эксперимента по получению пучка отрицательных ионов. Механизм её работы заключается в решении уравнения Пуассона [4] релаксационным методом. Решение используется для расчёта потенциала и траекторий частиц. PBGUNS автоматически определяет положение плазменной границы [9]. Для данного моделирования эксперимента были установлены следующие параметры: вытягивающее напряжение 9,4 кВ, ускоряющее - 90 кВ, ток пучка 37 мА • 21 с учётом количества апертур в плазменном электроде.

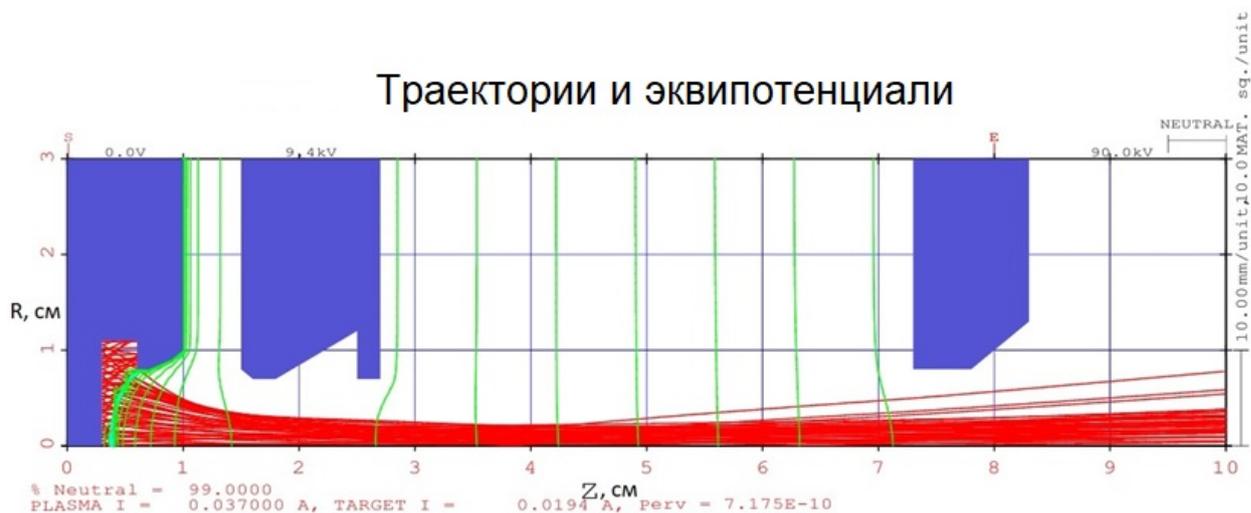


Рисунок 3. Типичные траектории отрицательных ионов в элементарной ячейке ионно-оптической системы источника

1.3 Раствалкивание пучка объёмным зарядом

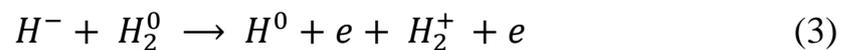
При транспортировке отрицательных ионов объёмный заряд пучка приводит к их расталкиванию. Формула (2) описывает зависимость

поперечного размера пучка от продольной координаты, появляющаяся в результате расталкивания объемным зарядом в приближении ленточного пучка. Эта величина характеризует влияние объёмного заряда на свойства пучка. Поперечная координата пучка меняется по закону

$$y = \frac{y_0}{2} + \frac{y_0}{18} \frac{I}{I_0} \left(\frac{z}{a} \right)^2 \quad (2),$$

где первеансом I обозначено отношение тока пучка к ускоряющему напряжению в степени три вторых, $I_0 = 0,17 \cdot U^{\frac{3}{2}}$ - начальный ток пучка в соответствии с законом Чайлда - Ленгмюра. y_0 - начальная координата границы пучка, z - координата продольного направления распространения пучка, a - поперечный размер пучка.

Расталкивание пучка объемным зарядом может быть снижено при компенсации пространственного заряда пучка зарядом частиц с противоположным знаком [5]. В случае ОИ компенсация может быть осуществлена посредством ионизации остаточного газа в рабочем объёме ионами пучка. Соответствующая реакция выглядит следующим образом:



Сечение реакции ионизации равно $2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Поток частиц пучка ОИ записан следующим образом:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = n_{H^-} v_{H^-} n_{vac} \sigma_i \pi r_0^2 - n_i v_i 2\pi r_0, \quad (4)$$

где первое слагаемое справа отвечает за рождение положительных ионов, а второе - за их радиальное движение из области пучка, n_i - концентрация положительных ионов, v_i - характерная скорость положительных ионов, приобретаемая в результате кулоновских соударений столкновений с частицами пучка [] и зависящая от массы частиц n_{H^-} - концентрация отрицательных ионов, v_{H^-} - скорость ОИ в пучке, n_{vac} - концентрация частиц газа на пути транспортировки, σ_i - сечение реакции ионизации, r_0 -

характерный поперечный размер пучка. Из условия равенства потоков частиц пучка и компенсирующих частиц имеем соотношение

$$n_H v_H - n_{vac} \sigma_i \pi r_0^2 = n_i v_i 2\pi r_0, \quad (5)$$

Из этого соотношения следует, что

$$n_{vac} \approx \frac{2v_i}{v_H - r_0 \sigma_i} \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), использование более тяжёлых частиц газа позволяет уменьшить критическое значение вакуума, так как у таких частиц меньше скорость разлёта вследствие столкновений [7].

2. Экспериментальный стенд

На рисунке. 4 приведена схема ВЧ сильноточного источника отрицательных ионов водорода. Её основными составляющими являются ВЧ драйвер, в котором происходит генерация водородной плазмы с помощью высокочастотного разряда, удерживаемого мультипольным магнитным полем, расширительная камера с периферийным магнитным полем, с помощью которого плазма удерживается внутри камеры, магнитным фильтром, отсеивающим быстрые электроны с помощью дипольного магнитного поля, а также ионно–оптическая система, состоящая из плазменного, вытягивающего и ускоряющего электродов. Из плазмы на поверхность плазменного электрода летят положительные ионы и атомарный водород. Бомбардировка плазменного электрода быстрыми частицами плазмы приводит к поверхностной генерации отрицательных ионов посредством механизма кинетической эмиссии. Плазменный электрод имеет 21 отверстие конической формы с диаметром 16 мм. С целью уменьшения работы выхода плазменного электрода и, как следствие, усиления генерации отрицательных ионов водорода в источник добавляется цезий, так как работа выхода с чистой поверхности металла недостаточно высока для получения желаемого тока пучка. Вытягивающий электрод также имеет конические отверстия диаметром 14 мм для прохождения через них пучка, который далее проходит через ускоряющий электрод. Вытягивающее напряжение меняется в пределах 7 – 12 кВ, а ускоряющее 50 - 90 кВ. [2]

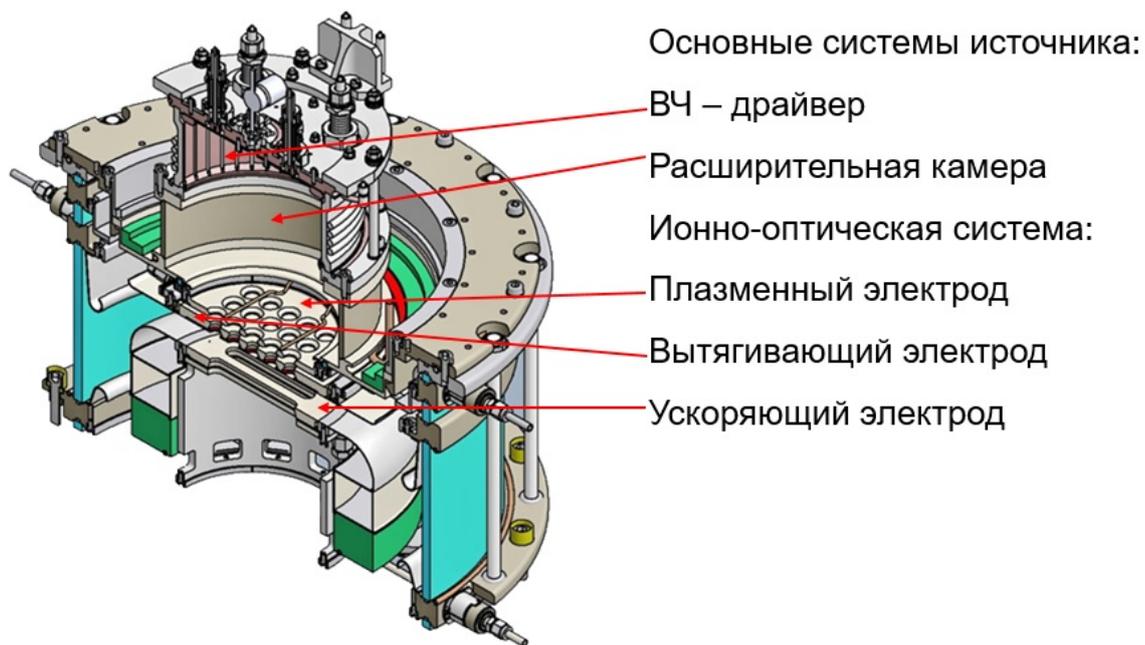


Рисунок 4. Схема источника отрицательных ионов

На рисунке 5 представлена схема экспериментального стенда для получения пучков отрицательных ионов водорода. Его основными составляющими являются вакуумный бак 3.1 м длиной и 2.1 м в диаметре с системой откачки, система поворотных магнитов, подвижный цилиндр Фарадея и калориметр. Система откачки состоит из двух крионасосов со скоростью откачки до $2 \cdot 10^5$ л/с и одного турбомолекулярного со скоростью до 3000 л/с. Источники питания обеспечивают мощность 35 кВт, подаваемую на ВЧ драйвер, а также создают вытягивающее и ускоряющее напряжения.

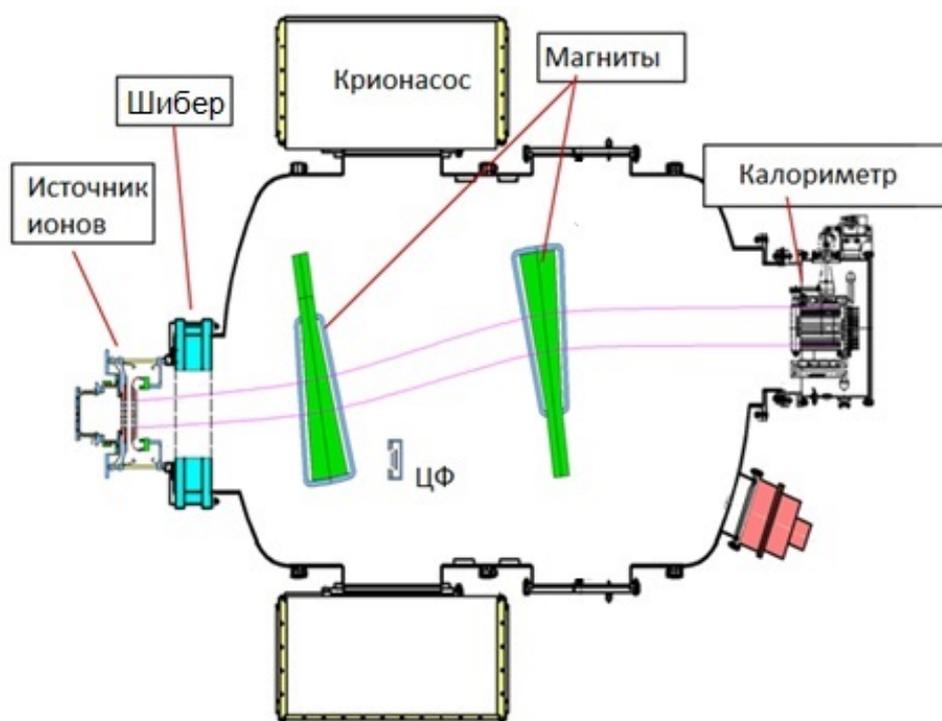


Рисунок 5. Схема экспериментального стенда для измерения интенсивности пучка

Одной из особенностей будущего инжектора являются применённая секция транспортировки пучка с низкой энергией и использование одноапертурного ускорителя, что является предпочтительным во избежание дополнительного оседания частиц пучка на элементах ускорителя. Также смещение оси ускорителя относительно оси источника приводит к тому, что протоны, вылетающие из ускорителя, не попадают в источник и не нарушают его работу. По этой же причине сопутствующие частицы, такие как нейтралы водорода и протоны, не попадают в ускоритель.

Принципиальная схема измерений токов в цепях питания источника приведена на рисунке 6. Ток пучка на выходе из источника может быть вычислен как разность тока в цепи 110 кВ – выпрямителя и тока перехвата ускоряющего электрода, состоящего из всех частиц, оседающих на ускоряющем электроде.

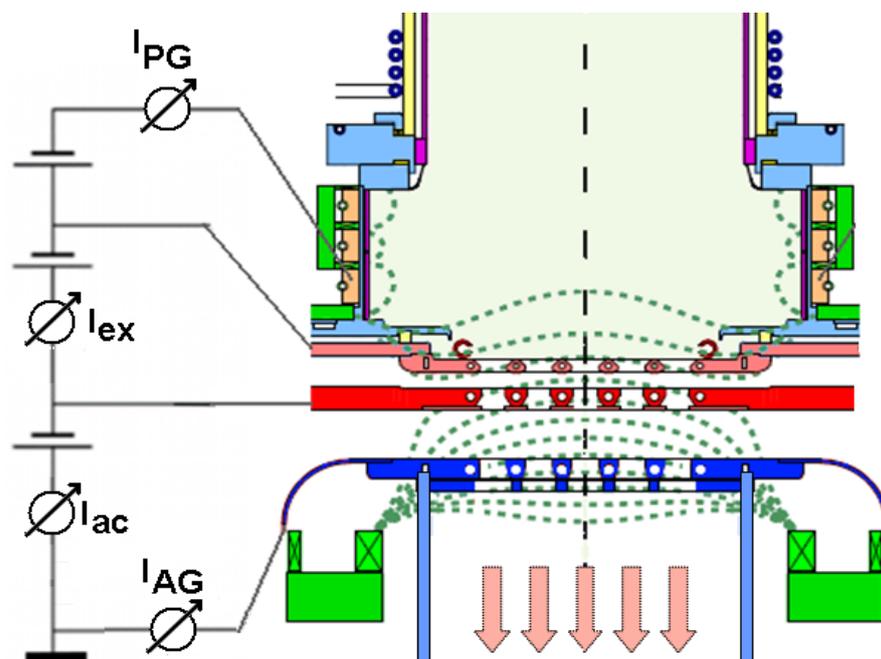


Рисунок 6. Схема измерения токов источника

Для проведения прямых электрических измерений тока пучка использовался цилиндр Фарадея, принципиальная схема которого изображена на рисунке 7. Цилиндр Фарадея является устройством для измерения электрического заряда и интенсивности пучка частиц. Он изготавливается из массивного проводника любой формы. В данной работе используется цилиндр Фарадея, сделанный из молибдена, с диаметром входного окна 170 мм и с диаметром дополнительного окна 10 мм. Для измерения тока пучка ток на коллекторе измерялся на сопротивлении 10 Ом. Цилиндр устанавливается в вакууме. При измерениях на него выводится пучок частиц и измеряется стекающий заряд.

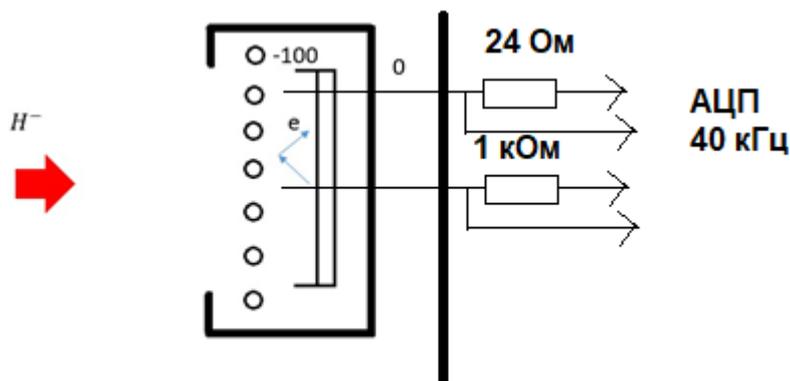


Рисунок 7. Принципиальная схема цилиндра Фарадея

Источниками ошибок измерений являются рассеяние частиц пучка на большие углы за пределы цилиндра и вторичная электронная эмиссия. [3] Для предотвращения последней в цилиндре установлена запирающая сетка с поданным на неё отрицательным относительно земли потенциалом.

На рисунке 8 приведена фотография используемого в эксперименте ЦФ в вакуумном баке. ЦФ размещён на штанге, позволяющей изменять его положение относительно оси пучка в двух измерениях поперёк пучка.



Рисунок 8. ЦФ в вакуумном баке

3. Транспортировка пучка ОИ

3.1 Моделирование транспортировки пучка в PBGUNS

Перед проведением экспериментов на стенде траектории пучка были смоделированы в программе PBGUNS. Типичная геометрия электродов приведена на рисунке 3. Были выбраны оптимальные напряжения вытягивания и ускорения пучка ОИ.

С помощью моделирования была получена зависимость угловой расходимости элементарной струйки пучка от напряжения на вытягивающем электроде при различных значениях начальной энергии ионов. Её график представлен на рисунке 9.

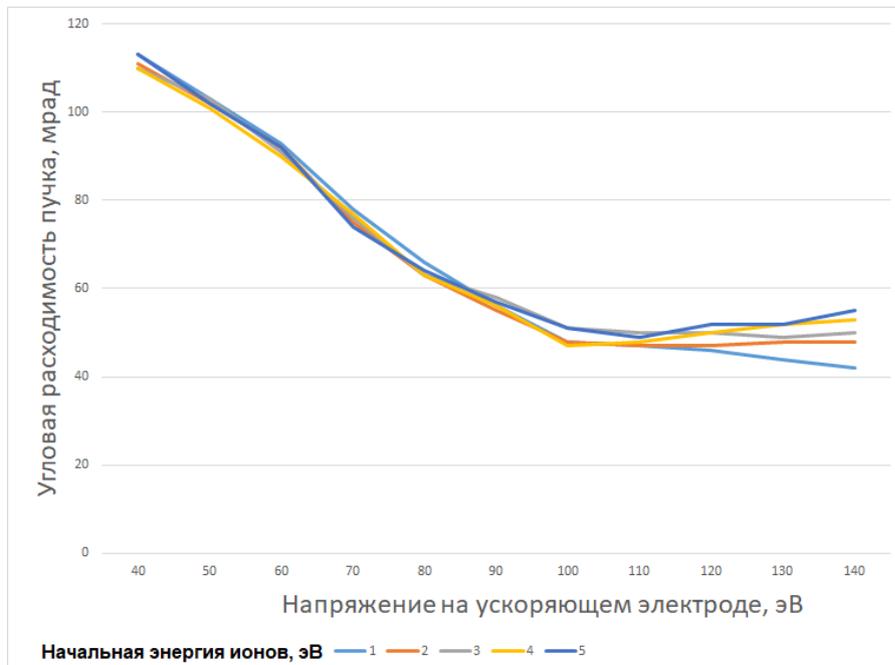


Рисунок 9. Зависимость угловой расходимости пучка от напряжения на ускоряющем электроде

Видно, что с увеличением ускоряющего напряжения угловая расходимость пучка уменьшается и устремляется к постоянному значению, начиная со значений ускоряющего напряжений приблизительно 90 кэВ, из чего можно сделать вывод, что для уменьшения разброса пучка необходимо увеличивать напряжение на ускоряющем электроде.

Также были проведены расчёты угловой расходимости для некоторых значений вытягивающего напряжения, результаты которых представлены в таблице 1. Видно, что при 10 кВ достигается оптимум угловой расходимости.

Таблица 1 Влияние вытягивающего напряжения на угловую расходимость пучка

Напряжение на вытягивающем электроде, кВ	Угловая расходимость пучка, мрад
8	57
10	48
12	62

3.2 Измерение профиля пучка ОИ с помощью ЦФ

Были проведены измерения тока пучка отрицательных ионов с помощью цилиндра Фарадея. Размер пучка превышал размеры ЦФ с диаметром входного окна 10 мм, поэтому для измерения полного тока пучка в паузах между импульсами цилиндр передвигался в фокальной плоскости пучка. На основании серии измерений восстанавливался профиль плотности тока пучка, из которого оценивался его полный ток. Распределение плотности тока пучка вдоль сечения показано на рисунках 10-11. Пучок был аппроксимирован распределением Гаусса. Параметры распределения были рассчитаны, исходя из координат начального положения штанги, на которой расположен ЦФ. Профиль мощности восстанавливался на основании 33 измерений цилиндром Фарадея.

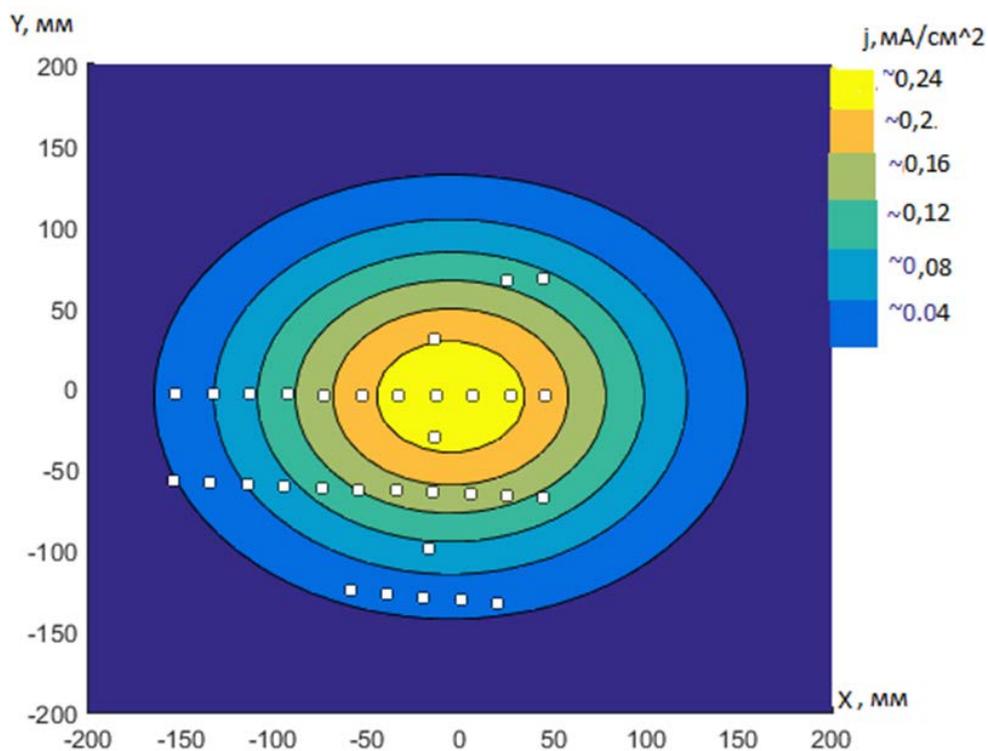


Рисунок 10. Поперечный профиль плотности тока пучка на расстоянии 1.6 м от источника, измеренный ЦФ, квадратиками обозначены точки измерений.

Синий профиль - черные квадраты вдоль оси X (см. рисунок 10), а оранжевый профиль - розовые квадраты вдоль оси Y. Видно, что профиль пучка вдоль оси X и Y практически одинаковый. Средний размер пучка на полувысоте составляет 155 мм.

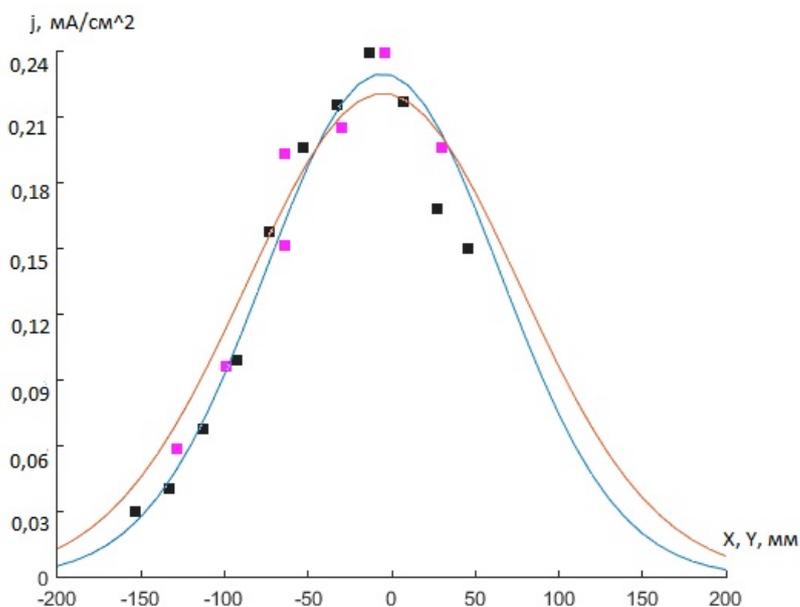


Рисунок 11. Срез поперечного профиля плотности тока пучка на расстоянии 1.6 м от источника, измеренный ЦФ

Размер пучка был оценён на уровне 15% от максимума и составил 320 мм. При длине щели ускоряющего электрода 130 мм угол отклонения крайней частицы от оси распространения пучка составил 60 мрад, что хорошо совпадает с результатами моделирования в программе PBGUNS (см. рисунок 9). Таким образом, увеличение размера пучка обусловлено его угловой расходимостью, что может свидетельствовать о том, что пространственный заряд скомпенсирован.

На рисунке 12 представлены осциллограммы тока пучка. Зелёным цветом нарисована диаграмма тока пучка, измеренного на расстоянии 1.6 м от источника, красным и синим – на цилиндре Фарадея. Импульс начинался на 0 с и заканчивался на 2 с. Длительность импульсов составляла 2 с. Запись осциллограмм тока пучка на цилиндр Фарадея позволила посчитать полный ток пучка в плоскости цилиндра Фарадея через 0.44, 0.64, 0.84, 0.94 и 1.24 с после начала импульса (см рис. 10). Видно, что ток пучка в плоскости ЦФ не меняется в течении импульса.

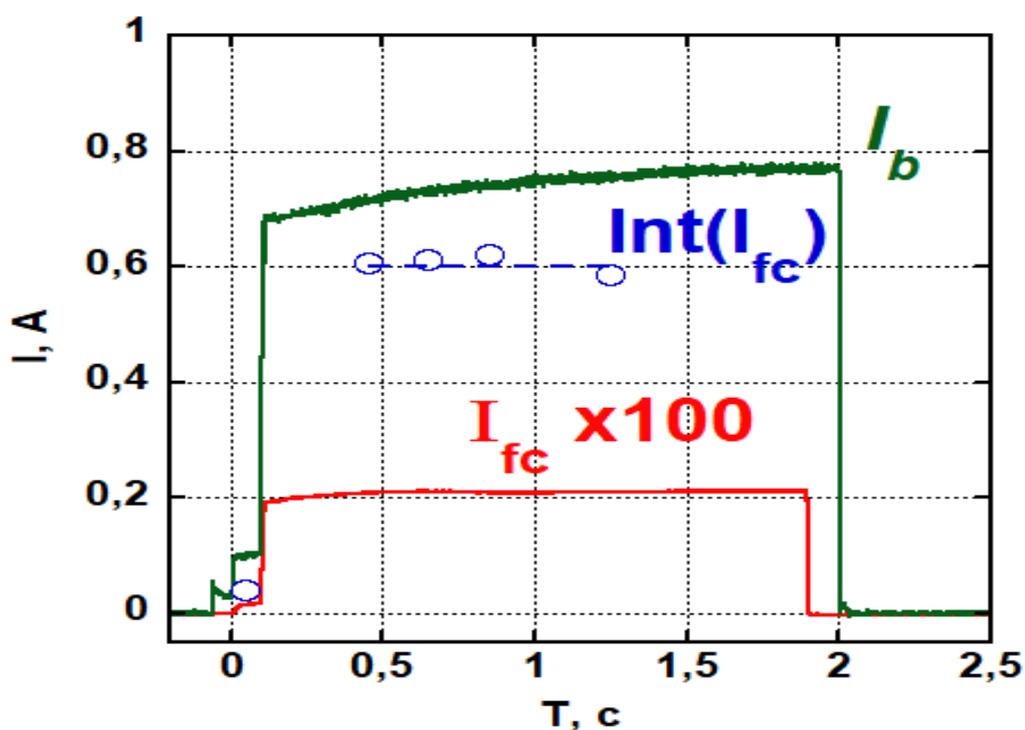


Рис. 12. Типичные осциллограммы тока пучка на выходе из источника и тока пучка, измеренного на расстоянии 1.6 м с помощью цилиндра Фарадея.

Выводы

Пучок отрицательных ионов водорода с током 0.77 А и энергией 90 кэВ был проведен на расстояние 1.6 м. Отработана процедура измерения поперечного профиля пучка на расстоянии 1.6 м от источника ионов. Исследована динамика пучка в течение импульса. Было выяснено, что поперечный профиль пучка не изменяется в течение импульса. Были получены зависимости угловой расходимости пучка от ускоряющего напряжения при различных энергиях отрицательных ионов. Подтверждено, что для улучшения транспортировки пучка необходимо увеличивать ускоряющее напряжение.

Список литературы

- 1) Мишенин Д. В. Система цезирования для сильноточных источников отрицательных ионов
- 2) Yu. Belchenko, G. Abdrashitov, P. Deichuli, A. Ivanov, A. Gorbovsky, A. Kondakov, A. Sanin, O. Sotnikov, and I. Shikhovtsev. Inductively driven surface-plasma negative ion source for N-NBI use
- 3) [Brown, K. L.; G. W. Tauffest. «Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams»](#)
- 4) Владимиров В. С., Жаринов В. В. Уравнения математической физики. — Физматлит, 2004.
- 5) http://profbeckman.narod.ru/RR0.files/L11_1_1.pdf
- 6) E. S. Solov'ev, R. N. Il'in, V. A. Oparin and N. V. Fedorenko Ionization of gases by fast hydrogen atoms and by protons.
- 7) Elizabeth Surrey and Michael Porton. Space Charge Neutralization of DEMO Relevant Negative Ion Beams at Low Gas Density
- 8) С. В. Мирнов. Физические процессы в плазме токамака.
- 9) Сотников О.З. Исследование источника отрицательных ионов водорода для инжектора высокоэнергетичных нейтралов.
- 10) Иванов А.А., Приходько В.В., «Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы,» Успехи физических наук, pp. 547-574, 2017.