

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

Абдрахманова Сергея Игоревича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы **Оптическая диагностика пучка отрицательных ионов водорода для БНЗТ**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

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

«.....».....20...Г.

Научный руководитель

ученая степень, звание

должность, место работы

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

«.....».....20...Г.

Дата защиты: «.....».....20...Г.

Новосибирск, 2020

Оглавление

Введение	3
1. Теоретическая часть	5
1.1. Модель уширения спектральной линии H_{α}	5
1.2. Механизм компенсации пространственного заряда пучка.....	7
2. Экспериментальное оборудование.....	10
2.1. Экспериментальный стенд	10
2.2. Общий обзор существующих методов диагностики пучка.....	11
2.3. Схема эксперимента по исследованию пучка ионов водорода.....	12
2.4. Схема эксперимента для измерения углового и энергетического разброса частиц пучка	14
3. Экспериментальная часть	16
3.1. Измерение геометрических параметров пучка и выбор газа для диагностических приложений	16
3.2. Измерение углового и энергетического разброса частиц пучка по доплеровскому уширению линии H_{α}	20
Заключение	21
Список литературы	22

Введение

На данный момент рост числа онкологических заболеваний представляет собой серьёзную проблему для человеческого общества. Значительная часть научного сообщества занята поиском способов лечения злокачественных опухолей. Перспективным методом лечения некоторых видов онкологий, главным образом труднодоступных опухолей головного мозга, является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). Физические принципы БНЗТ позволяют осуществить селективное воздействие прямо на клетки злокачественного образования.

БНЗТ основана на эффективном поглощении теплового нейтрона нерадиоактивным ядром ^{10}B . Сечение поглощения данной реакции составляет 3837 барн, в то время как для большинства элементов оно порядка единиц барн. Результатом поглощения теплового нейтрона ядром ^{10}B является ядерная реакция $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ с выделением 2,8 МэВ энергии. В 6% случаев происходит распределение энергии между ядром лития и α -частицей, а в 94% случаев ядро лития возбуждено и испускает фотон с энергией 0,48 МэВ. Длины пробега ядра лития и α -частицы в ткани организма 5 и 7 мкм соответственно, в то время как клетка имеет характерный размер порядка 10 мкм. Следовательно, около 80% энергии ядерной реакции выделится в той самой клетке, где эта реакция и произошла [1].

В настоящее время проводятся активные исследования БНЗТ с применением ускорителей заряженных частиц для получения эпитепловых нейтронов. Предложено и реализуется несколько проектов ускорительных источников нейтронов, в том числе источник нейтронов в ИЯФ СО РАН на основе ускорителя–тандема с вакуумной изоляцией [1, 2, 3].

Важной задачей в создании клинической установки является простая и эффективная процедура настройки и проводки пучка частиц на всех стадиях, поскольку обладающий мощностью до 30 кВт пучок частиц, попадая на стенку вакуумного канала, приведет к быстрому выходу из строя всей установки.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию оптической диагностики для контроля положения пучка и его наклона относительно канала транспортировки. необходимы диагностики положения и направления распространения пучка. В основе диагностики лежит процесс возбуждения частиц пучка и частиц остаточного газа в результате столкновений. При переходе возбуждённых частиц в стабильное состояние происходит излучение квантов света, при регистрации которых можно получить необходимую информацию о пучке. В целях увеличения количества центров взаимодействия, а, следовательно, повышения интенсивности излучения, в транспортную камеру добавляется некоторый диагностический газ.

Целями данной студенческой дипломной работы являлись:

1. Измерение положения пучка, его наклона и фокусировки с помощью оптической диагностики, и определение её рабочих параметров;
2. Исследования влияния различных диагностических газов на работу диагностики;
3. Измерение углового и энергетического разброса частиц пучка по доплеровскому уширению линии H_{α} .

Для достижения поставленных целей решались следующие *задачи*:

- Проектирование оптической диагностики;
- Калибровка оптической системы;
- Испытание диагностики и получение экспериментальных результатов;
- Обработка и анализ экспериментальных данных.

1. Теоретическая часть

1.1. Модель уширения спектральной линии Na

Прежде чем приступить к рассмотрению экспериментальной части необходимо получить формулы для расчёта углового и энергетического разброса частиц пучка по эффекту Доплера:

$$\omega = \gamma(\omega_0 + \mathbf{kV}) \quad (1)$$

, где γ – Лоренц-фактор; ω_0 – частота источника излучения; \mathbf{k} – волновой вектор; \mathbf{V} – скорость частицы.

Для получения углового разброса частицы пучка проварируем выражение (1) для эффекта Доплера (см. Рис. 1). В результате получим формулу:

$$\Delta\omega = \gamma(\delta\omega + \mathbf{V}\Delta\mathbf{k} + \mathbf{k}\Delta\mathbf{V})$$

, где, $\delta\omega$ – естественная ширина спектральной линии, $\Delta\mathbf{k}$ – разброс волновых векторов в следствие конечной угловой апертуры системы сбора света.

В случае поперечного наблюдения формула преобразуется следующим образом:

$$\Delta\omega_{\perp} = \gamma(\delta\omega + V_{\parallel}\Delta k_{\perp} + k_{\perp}\Delta V_{\perp})$$

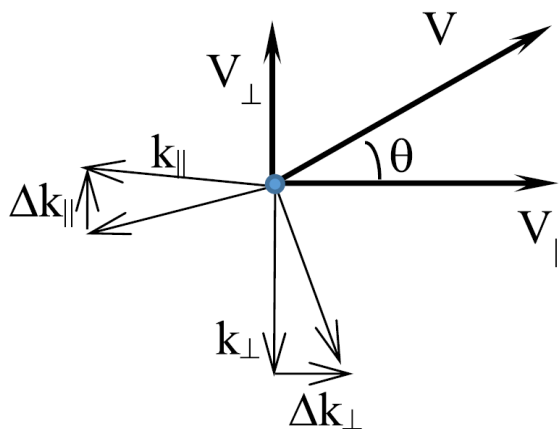


Рис. 1. Схематичное изображение углового разброса частиц.

В наших экспериментальных условиях оценка естественной ширины спектральной линии излучения составила $\sim 5.1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, в то время как оценки второго и третьего слагаемых составляют $\sim 4,99 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ и $\sim 4,63 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Кроме этого Лоренц – фактор мало отличается от единицы ($\gamma \approx 1,000036$).

На основе этого в дальнейших выкладках мы пренебрежём влиянием γ – фактора и естественной ширины.

Подставляя в указанную выше формулу тривиальные связи волнового вектора с длиной волны, частоты с длиной волны и разделив результат на V_{\parallel} , получаем:

$$\frac{\Delta V_{\perp}}{V_{\parallel}} = \operatorname{tg}(\Delta\theta) \approx \Delta\theta = \frac{\Delta\omega_{\perp}}{k_{\perp}V_{\parallel}} - \frac{\Delta k_{\perp}}{k_{\perp}}$$

В итоге, получаем выражение для дисперсии, связанной с угловым разбросом частиц пучка при поперечном наблюдении:

$$\sigma_{\Delta\theta} \approx \sqrt{\left\langle \left(\frac{c}{V} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2 \right\rangle - \frac{\langle \Delta k_{\perp}^2 \rangle}{k_{\perp}^2}} = \frac{c}{V} \frac{\sqrt{\sigma_{\perp}^2 - \sigma_0^2 - \sigma_1^2 - \sigma_2^2}}{\lambda} \quad (2)$$

, где σ_{\perp}^2 – дисперсия уширенной спектральной линии; σ_0^2 – аппаратная функция спектрометра; σ_1^2 – уширение вследствие конечной ширины щели диафрагмы, расположенной перед приёмником излучения; σ_2^2 – уширение вследствие конечного диаметра оптического волокна. Последние два члена связаны с конечным Δk_{\perp} . По сути это дисперсия, связанная с распределенной освещенностью по входной щели и торцу световода.

В предположении равномерных распределений суммарный вклад параметров σ_1 и σ_2 может быть оценён следующим образом:

$$\sigma^2 = \lambda^2 \left(\frac{V}{c} \right)^2 \left(\frac{l^2}{12D^2} + \frac{d^2}{16F^2} \right)$$

, где l – ширина щели (в эксперименте 5 мм); D – расстояние между частицей и источником излучения (в эксперименте около 400 мм); d – диаметр оптического волокна; F – фокальное расстояние.

В условиях эксперимента суммарный вклад величин σ_1 и σ_2 составил $\sim 0.23 \text{ \AA}$, что сопоставимо по сравнению с экспериментально полученными значениями аппаратной функции и ширины спектральной линии: $\sim 0.4 \text{ \AA}$ и $\sim 1.4 \text{ \AA}$ соответственно.

При наблюдении вдоль движения (см. Рис. 2) пучка вариация (1) выглядит следующим образом:

$$\Delta\omega_{\parallel} \approx V_{\perp} \Delta k_{\parallel} + k_{\parallel} \Delta V_{\perp}$$

Вследствие большей оптической базы при продольном наблюдении (~ 150 см, в то время как при поперечном наблюдении она составляла ~ 40 см), мы пренебрегаем первым слагаемым в данном выражении (оно оказывается в ~ 4 раза меньше, чем при поперечном наблюдении) и получаем:

$$\Delta\omega_{\parallel} \approx k_{\parallel}\Delta V_{\perp} = k_{\parallel} \cos \Delta\theta \Delta V + k_{\parallel}V\Delta(\cos \Delta\theta) \approx k\Delta V + Vk\frac{(\Delta\theta)^2}{2}$$

Оценка первого слагаемого даёт величину $\sim 4.63 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, а оценка второго $\sim 1.36 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. На основе полученных оценок, для простоты, пренебрежём вторым слагаемым. Далее, после простых преобразований получаем формулу для разброса энергий частиц пучка:

$$\delta E = \sqrt{2Emc^2} \frac{\sqrt{\sigma_{\parallel}^2 - \sigma_0^2}}{\lambda} \quad (3)$$

, где σ_{\parallel}^2 – дисперсия уширенной спектральной линии.

Таким образом для получения в ходе эксперимента параметров пучка по формулам (2) и (3) необходимо измерить аппаратную функцию спектрального прибора и дисперсию уширенной спектральной линии при продольном и поперечном наблюдении.

1.2. Механизм компенсации пространственного заряда пучка

Наличие пространственного заряда пучка затрудняет процесс транспортировки пучка, так как приводит к увеличению радиальных скоростей частиц пучка, а, следовательно, к расхождению или дефокусировке пучка. Одним из процессов, помогающим минимизировать влияние пространственного заряда на дефокусировку пучка является процесс компенсации пространственного заряда.

Кратко рассмотрим процесс компенсации пространственного заряда пучка. При прохождении пучка заряженных частиц через нейтральный газ происходит ионизация газа, при этом ионизованные частицы того же знака, что и частицы пучка, эффективно выталкиваются из объёма пучка, в то время как частицы противоположного знака задерживаются в потенциальной яме

пучка. Таким образом происходит накопление частиц противоположного знака в области пучка, приводящее к компенсации объёмного заряда пучка.

Стоит отметить, что процесс компенсации пространственного заряда для случая пучков положительных и отрицательных частиц имеет свои особенности из-за сильного различия в массе компенсирующих частиц.

В случае пучка положительных ионов компенсирующими частицами являются электроны, обладающие относительно малой массой. Вследствие этого пучок положительных частиц всегда недокомпенсирован, так как существует достаточное количество электронов, способных покинуть потенциальную яму пучка.

Для пучка отрицательных ионов возможна перекомпенсация пространственного заряда, поскольку компенсирующими частицами являются относительно тяжёлые, а значит более инертные, положительные ионы. Из-за большей инертности положительных ионов формируется квазистационарное распределение, при котором происходит накопление положительного пространственного заряда, вплоть до перекомпенсации пространственного заряда пучка. При этом формируется потенциальная яма для вновь образующихся электронов, для преодоления которой электронам необходимо либо обладать необходимой энергией, либо накопить через процесс кулоновских взаимодействий с частицами пучка. [4, 5]

Качественно опишем процесс компенсации пространственного заряда пучка отрицательных ионов. Процесс компенсации объёмного заряда характеризуется радиальным перепадом электрического потенциала $\Delta\varphi = \varphi(r = 0) - \varphi(r = r_0)$, где r_0 – радиус пучка.

Согласно вышесказанному, процесс компенсации пространственного заряда имеет две стадии: $\Delta\varphi < 0$, когда электроны свободно покидают объём пучка и происходит компенсация заряда; $\Delta\varphi > 0$, после превышения некоторой критической концентрации частиц происходит перекомпенсация заряда.

Критическую концентрацию, при которой $\Delta\varphi = 0$, можно оценить из системы уравнения баланса частиц и уравнения квазинейтральности:

$$n_- V_- n_a \sigma_i \pi r_0^2 = n_i V_i 2\pi r_0$$

$$n_- V_- n_a \sigma_e \pi r_0^2 = n_e V_e 2\pi r_0$$

$$n_- + n_e = n_i$$

, где n_- , n_a , n_i , n_e – концентрации частиц пучка, атомов нейтрального газа, положительных ионов, электронов; σ_i и σ_e – сечения образования положительных ионов и электронов; V_i и V_e средние радиальные скорости частиц; V_- – скорость частиц пучка.

Принимая во внимание тот факт, что $V_i \ll V_e$ и $n_e \ll n_i$, получаем оценочное выражение для критической концентрации частиц фонового газа:

$$n_{a,cr} = \frac{2V_i}{V_- r_0 \sigma_i (1 - \frac{V_i \sigma_e}{V_e \sigma_i})} \approx \frac{2V_i}{V_- r_0 \sigma_i}$$

Выражение для $\Delta\varphi$ в режиме перекомпенсации можно найти из уравнения баланса энергии компенсирующих электронов, которое учитывает накопление энергии электронами посредством кулоновских взаимодействий с частицами пучка и их последующий уход из потенциальной ямы:

$$\int_r^{r_0} 2\pi r dr \int_0^{e\varphi} (e\varphi - \varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon = \alpha \frac{n_- n_e e^4 \pi r_0^2}{V_- m_e}$$

, где $\alpha = 4\pi \ln \frac{V_-^3 m_e^{1.5}}{1.78 n_e^{0.5} \pi^{0.5} e^3}$; $f(\varepsilon)$ – функция распределения электронов.

Сделаем упрощающие предположения:

$$\varphi = \Delta\varphi (1 - \frac{r^2}{r_0^2})$$

$$f(\varepsilon) = \frac{e\varphi_i}{(\varepsilon + e\varphi_i)^2}$$

, где φ_i – потенциал ионизации газа.

Таким образом, с помощью данных предположений из уравнения баланса энергии и условия квазинейтральности можно получить выражение для $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi \approx e \sqrt{3\alpha \frac{M\varphi_i n_-}{m n_a \sigma_e U_0} \left(1 - \frac{n_{a,cr}}{n_a}\right)}$$

, где U_0 – энергия ионов пучка; M – масса иона. [4,5]

Аналогичное можно вывести выражения для случая положительных ионов. Данные выражения согласуются с экспериментальными и численными данными [4].

2. Экспериментальное оборудование

2.1. Экспериментальный стенд

Эксперименты были проведены на тестовом стенде. Схема тестового стенда изображена на Рис. 2. Он состоит из источника отрицательных ионов, камеры поворотного магнита и транспортной камеры. [6, 7, 8].

Источник генерирует непрерывный пучок отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и плотностью тока до 150 мА/см².

Поворот пучка на 90° осуществляется магнитным полем источника (поворот на 15°) и поворотным магнитом (поворот на 75°). Дополнительно к повороту пучка, магнит осуществляет его фокусировку [6, 7, 8].

На пересечении камеры поворотного магнита и транспортной камеры установлена диафрагма с диаметром 30 мм, выполняющая функцию повышения эффективности дифференциальной откачки. Вблизи краев диафрагмы установлено 4 термистора и 4 сенсора вторичной эмиссии для контроля положения пучка.

Транспортная камера снабжена оптической диагностикой для контроля положения и размера пучка, а также цилиндром Фарадея для измерения значения тока пучка.

Для обеспечения работы источника и диагностики в транспортной камере и камере поворотного магнита установлены газовые натекатели. Необходимые значения давления в магнитной и транспортной камерах достигается турбомолекулярными насосами с производительностями 2000 л/с и 200 л/с

соответственно. Для измерения давления в вакуумных камерах установлены вакуумметры, откалиброванные при помощи ионизационного вакуумметра [6, 7, 8].

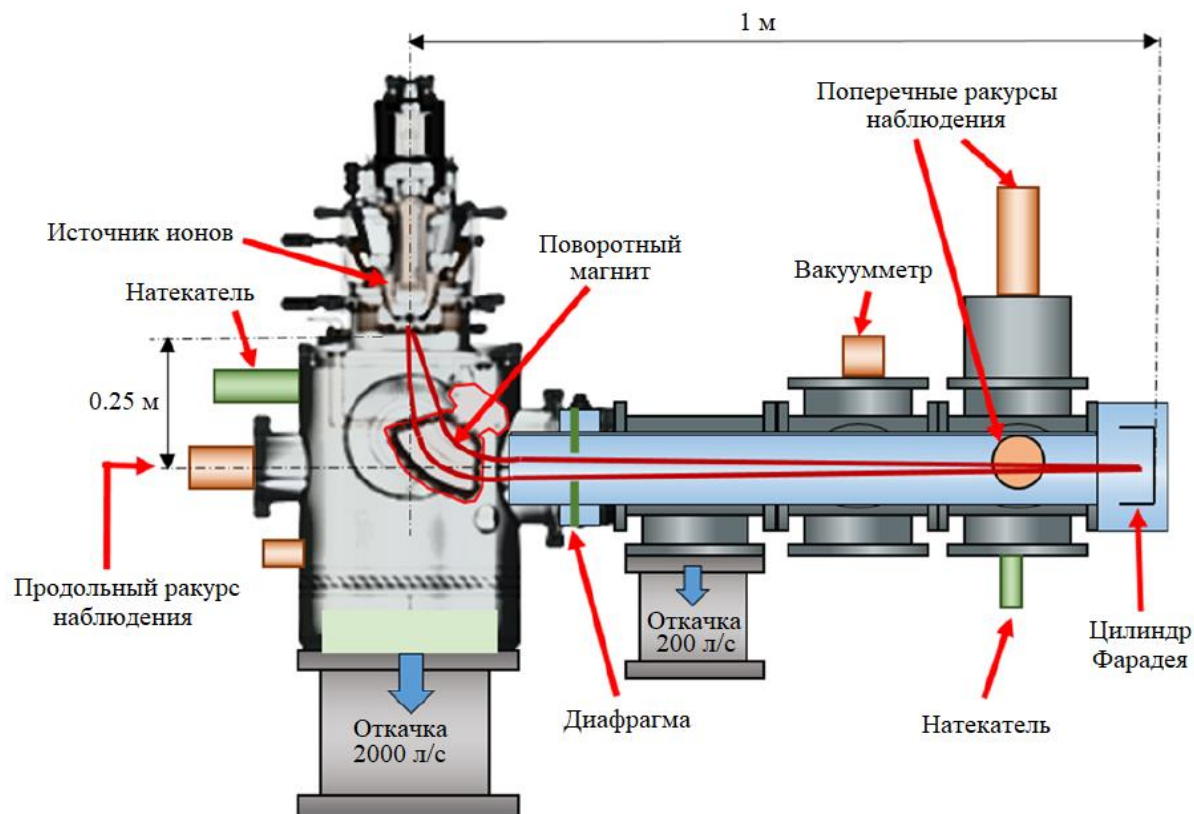


Рис. 2. Схема тестового стенда.

2.2. Общий обзор существующих методов диагностики пучка.

На сегодняшний день существует множество методов диагностики положений и профилей пучков заряженных частиц.

Наиболее распространёнными являются диагностики, основанные на электромагнитном взаимодействии пучка с элементами вакуумной камеры установки. К таким диагностикам относятся диагностики, использующие пикап-электроды или резистивные датчики.

В общем случае пикап-электрод состоит из двух проводников, один из которых заземлён через вакуумную камеру, а второй принимает сигнал, возникающий при движении заряженных частиц пучка. Используя несколько таких датчиков можно определить положение пучка.

В диагностике, основанной на резистивных датчиках, используется волновод, с зазором, заполненным резистивным слоем. При прохождении пучка частиц через подобный волновод возникает ток изображения. Измеряя азимутальное распределение напряжения на резистивном слое можно определить ток пучка и его поперечное смещение от оси. [9]

Для получения поперечного профиля пучка существуют датчики, основанные на ионизации остаточного газа. Ионизационный измеритель профиля измеряет распределение электронов, появившихся в результате ионизации остаточного газа пучком заряженных частиц. Электроны отклоняются от оси вакуумной камеры поперечным электрическим полем, затем ускоряются микроканальной пластиной и регистрируются. [9, 10]

С развитием чувствительности КМОП-матриц упростилось создание слабо разрушающей оптической диагностики положения и профиля пучка частиц, основанной на регистрации излучения, возникающего при взаимодействии частиц пучка и частиц остаточного газа. Излучение происходит в результате возбуждения оптических переходов в атомах газа и частицах пучка. [11]

2.3. Схема эксперимента по исследованию пучка ионов водорода

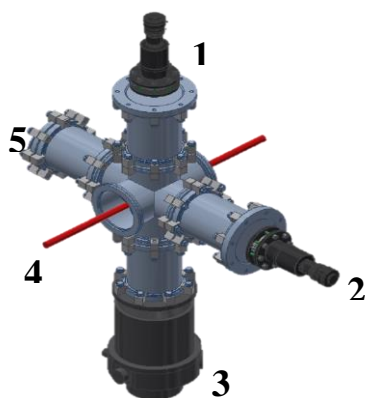


Рис. 4. Схема эксперимента по исследованию пучка ионов водорода на установке БНЗТ, где 1 и 2 – два ракурса наблюдения; 3 – дифференциальная откачка; 4 - пучок заряженных частиц; 5 – порт для напуска газа.

В силу своей простоты была выбрана оптическая слабо разрушающая диагностика.

На Рис. 3 изображена схема диагностики. Основными элементами данной диагностики являются:

1. Вертикальный ракурс наблюдения;
2. Горизонтальный ракурс наблюдения
3. Дифференциальная откачка;
4. Пучок заряженных частиц;
5. Порт для напуска газа.

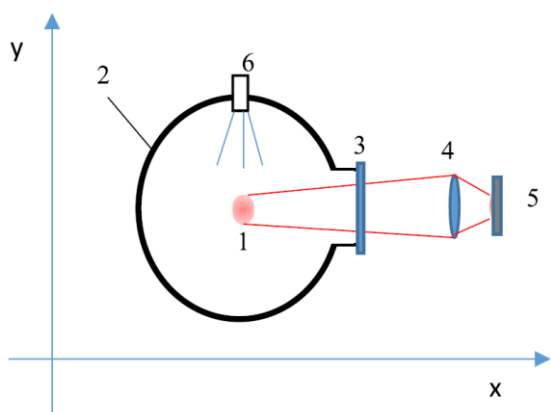


Рис. 4. Схема визуализации профиля пучка, где 1 – поперечное сечение пучка; 2 – транспортная камера; 3 – оптическое окно; 4 – система линз; 5 – приёмник излучения; 6 – система напуска газа.

В данной конструкции патрубки служат объёмом, в котором инжектируемый газ приходит к некоторому равновесному давлению.

Свет эмитируемый из области пучка регистрируется при помощи КМОП камер, установленных на вертикальном и горизонтальном ракурсах наблюдения (см. Рис. 3,4). Для увеличения светимости области пучка через порт напуска газа добавляется газ. Каждый канал КМОП матрицы регистрирует

излучение вдоль соответствующих хорд наблюдения, пересекающих пучок. Пусть координата Y соответствует вертикальному ракурсу наблюдения, а координата X – горизонтальному. Тогда интенсивность излучения, зарегистрированная, например, вдоль оси Y пропорциональна интегралу от концентрации частиц остаточного газа по координате Y :

$$J \approx A \int n(x, y) dy$$

Использование двух ракурсов наблюдения позволяет определить профиль пучка и его положение относительно канала транспортировки. Помимо этого, существует возможность реализовать томографию пучка и восстановить распределение плотности по полученным изображениям. Для реализации качественной томографии пучка требуется увеличение количества ракурсов наблюдения [12].

В данной схеме были использованы видеокамеры Basler AC1300NIR с разрешением 1.3 Мп и квантовой эффективностью в рабочей области частот ~59%. Настройка фокуса видеокамер осуществляется объективами Basler Lens C23-2518-2M-S с фокусным расстоянием 25 мм, установленными на вертикальном и горизонтальном ракурсах наблюдения (см. Рис. 3,4).

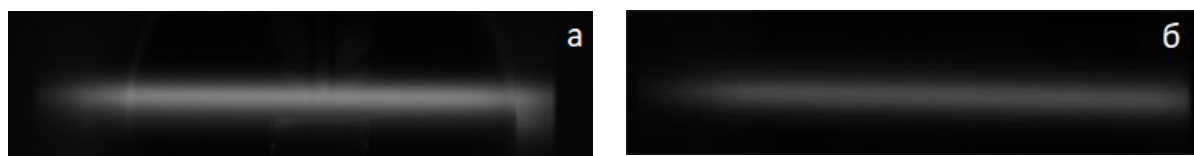


Рис. 5. Характерные изображения пучка до (а) и после (б) установки светопоглощающих экранов.

Для уменьшения паразитного переотражения лучей в объёме системы были установлены почернённые, светопоглощающие экраны. На Рис. 5 приведены характерные изображения пучка до и после добавления светопоглощающих экранов. Расстояние от пучка до собирающей линзы составляет около 400 мм. Дифференциальная откачка обеспечивает локальность повышения концентрации частиц газа.

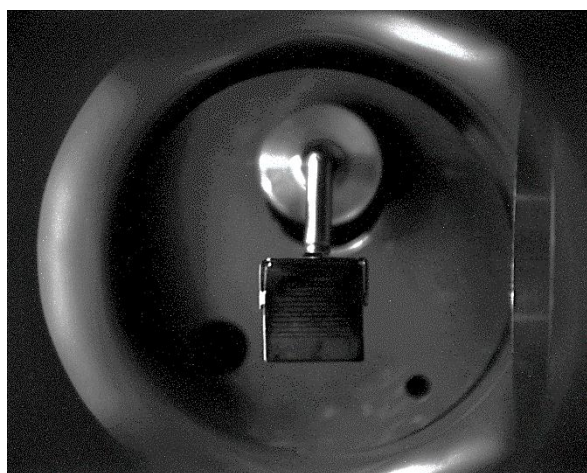


Рис. 6. Изображение калибровочного флага.

В целях настройки резкости изображений в системе предусмотрено наличие тестового объекта – выдвижного флага. При подготовке эксперимента с помощью флага, помещенного вблизи оси канала транспортировки (см. Рис. 6.), производится настройка объективов на резкость и ориентирование камер на ось канала, а также калибровка

пространственного разрешения видеокамер.

2.4. Схема эксперимента для измерения углового и энергетического разброса частиц пучка

Для измерения углового и энергетического разброса частиц пучка в экспериментах в качестве спектрального прибора использовался монохроматор МДР – 23.

Оптическая схема диагностики частиц пучка по доплеровскому уширению линии H_{α} приведена на Рис. 7. За основу взята система сбора света, изображённая на Рис. 3, но вместо того, чтобы регистрировать излучения

напрямую при помощи камер оно было доставлено при помощи оптического волокна на спектрометр, разложено в спектр и зарегистрировано при помощи CCD камеры SDU 285cold.

Для разделения спектральных линий излучения фонового газа и смещённой линии система поперечного сбора света дополнена оптическим клином. Отметим, что отклонение от нормали на угол β практически не влияет на обоснованность применения формул (2) и (3).

В целях уменьшения влияния конечной угловой апертуры системы сбора света на результат формулы (2) входной зрачок объектива был уменьшен в направлении вдоль движения частиц пучка, путём установки щелевой диафрагмы.

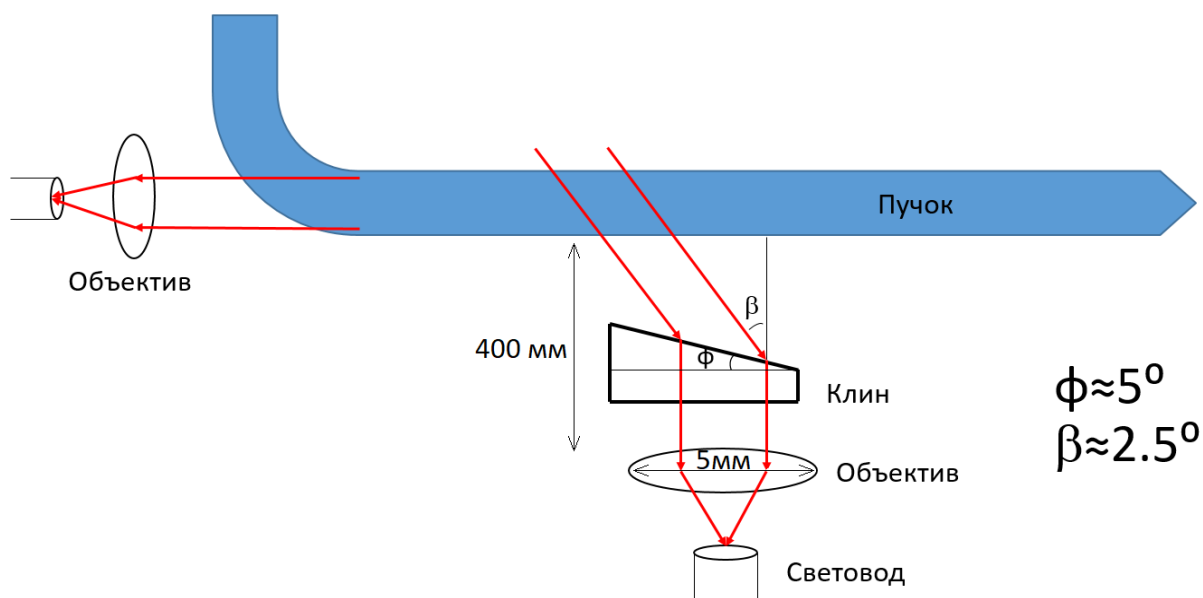


Рис. 7. Оптическая схема диагностики частиц пучка по доплеровскому уширению линии H_{α} .

3. Экспериментальная часть

3.1. Измерение геометрических параметров пучка и выбор газа для диагностических приложений

В рамках данной работы были проведено несколько серий экспериментов с использованием разных диагностических газов: Ar, Xe, H₂. Результатом данных экспериментов является получение изображений пучка при различных давлениях диагностических газов в транспортной камере.

Для извлечения координат центра и границ пучка из полученных изображений необходимо программно произвести усреднение некоторой области изображения вдоль координаты Y следующим образом:

$$\langle Y \rangle = \frac{\int yJ(y)dy}{\int J(y)dy}$$

За положение границ пучка примем координаты границ распределения на полувысоте. Путём вычитания значений координат границ пучка на полувысоте вычисляется значение ширины пучка на полувысоте (FWHM).

Стоит отметить, что добавление светопоглощающих экранов позволяет анализировать изображение пучка по всей его длине (см. Рис. 5.).

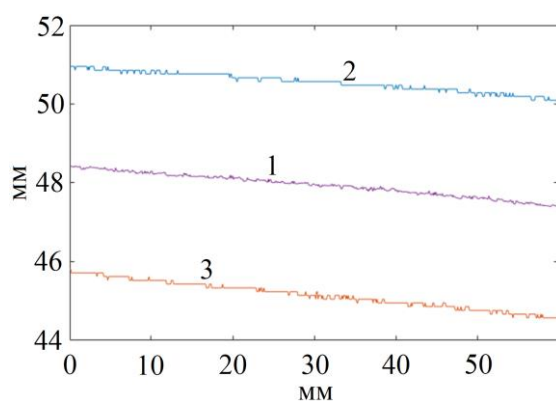


Рис. 8а. Зависимость положения центра пучка (1) и его границ (2, 3) на полувысоте как функция продольной координаты.

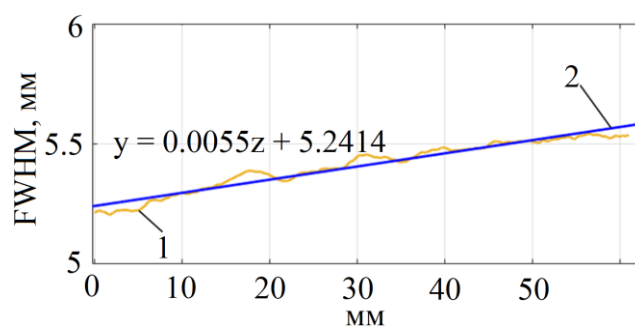


Рис. 8б. Зависимость FWHM (2) от продольной координаты и её линейная аппроксимация (2).

На Рис. 8 изображены значения положений центра и границ пучка, а также его ширины на полувысоте, в зависимости от продольной координаты. Данные

получены при добавлении Хе до давлений $1.7 \cdot 10^{-5}$ Торр. Ток отрицательных ионов водорода, приходящих на коллектор составлял 4 мА, при этом изначальный ток ионов, без добавления Хе, составлял 13 мА. Энергия пучка составляла 34.45 кэВ.

Из Рис. 8б видно, что пучок уширяется с ростом продольной координаты, таким образом в данном случае пучок дефокусируется. Коэффициент при z линейной аппроксимации, в силу малости величины, можно интерпретировать как угол дефокусировки. Погрешность определения положения пучка около 0.1 мм и определяется неоднородностями зависимостей, изображённых на Рис. 8а. Погрешность определения угла дефокусировки около 1 мрад и также является следствием данных неоднородностей.

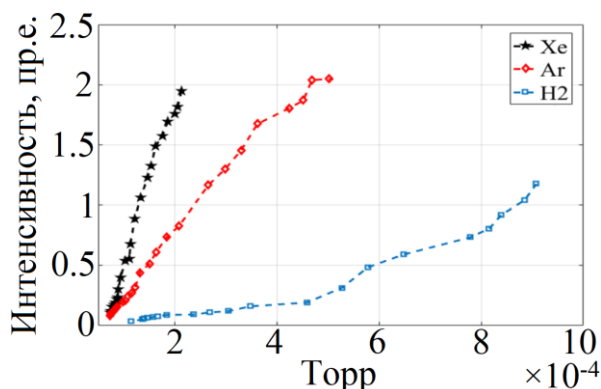


Рис. 9а. Зависимости интенсивности излучения пучка от давления при добавлении различных газов.

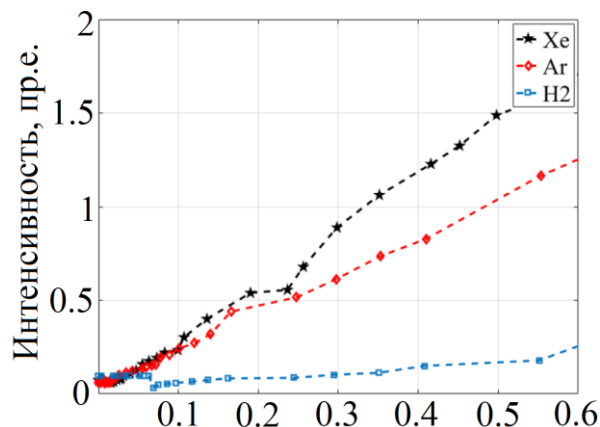


Рис. 9б. Зависимости интенсивности излучения пучка от потерь тока пучка при добавлении различных газов.

Для определения угла наклона пучка относительно канала транспортировки можно либо произвести поворотное преобразование изображения пучка, либо получить зависимость центра масс пучка от продольной координаты и аппроксимировать её линейной функцией – коэффициент наклона интерпретируется как угол наклона пучка. Необходимо отметить, что для точного определения наклона пучка относительно канала транспортировки, нужно производить точную юстировку всей диагностической системы. Погрешность определения угла наклона пучка, как и в случае определения

угла дефокусировки, около 1 мрад и не превышает погрешности юстировки диагностической системы.

Также, путём интегрирования изображения по координате Y , были получены зависимости интенсивности излучения пучка при добавлении различных газов, а также зависимости интенсивности излучения пучка от потерь тока пучка (см. Рис.9). Из Рис. 9а видно, что интенсивность излучения в случае добавления Хе намного больше, при одинаковом изменении давления. Данный факт объясняется большим количеством оптических переходов у Хе, по сравнению с Ar, H_2 и Н. Из Рис. 9б следует, что с точки зрения потерь пучка особой разницы между Ar и Хе не наблюдается, что нельзя сказать о H_2 .

В дополнение ко всему были построены зависимости ширины пучка (см. Рис. 10а) и значения тока на коллекторе (см. Рис. 10б) от давления при добавлении различных газов. На Рис. 10а сплошные линии соответствуют горизонтальному значению FWHM, пунктирные линии соответствуют вертикальному значению FWHM.

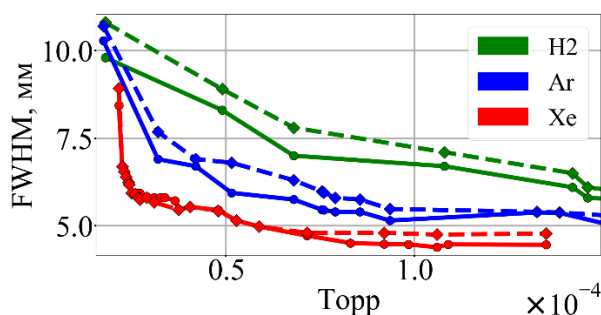


Рис. 10а. Зависимость FWHM пучка от давления при добавлении различных газов. Сплошные линии - горизонтальные значения FWHM; пунктирные линии – вертикальные значения FWHM.

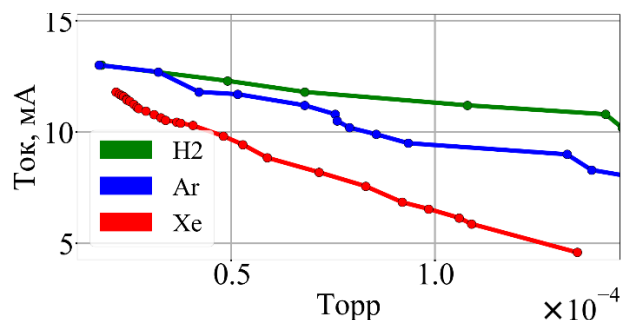


Рис. 10б. Зависимость тока пучка на коллекторе от давления при добавлении различных газов.

Из данных графиков следует, что с увеличением давления ширина пучка уменьшается, при этом интенсивность этого уменьшения сильно зависит от добавляемого газа. Для Хе зарегистрировано наиболее сильное падение ширины пучка с 9 до 6 мм ($\sim 33\%$) при малом добавлении газа $\Delta P_{Хе} \sim 3 \cdot 10^{-6}$

Торр (с $2.2 \cdot 10^{-5}$ до $2.5 \cdot 10^{-5}$ Торр). При дальнейшем добавлении Хе ($\Delta P_{\text{Хе}} \sim 3 \times 10^{-5}$) ширина пучка падает до 4.5 мм, т.е. составляет 50% от изначального значения. Для Ar и H₂ падение ширины пучка на 30% достигается при увеличении давления на $\Delta P_{\text{Ar}} \sim 3 \cdot 10^{-5}$ Торр и $\Delta P_{\text{H}_2} \sim 1.3 \cdot 10^{-4}$ Торр соответственно, что в ~ 10 и ~ 40 раз больше чем в случае с Хе.

Добавление газа также влияет на ток пучка. В случае Хе при увеличении давления на $\Delta P_{\text{Хе}} \sim 3 \cdot 10^{-6}$ ток падает на $\sim 5\%$, а при увеличении давления на $\Delta P_{\text{Хе}} \sim 3 \cdot 10^{-5}$ ток падает на $\sim 20\%$. Стоит отметить, что на коллектор приходят не только частицы H⁻, но и некоторое количество частиц H⁰ и H⁺, которые появляются в результате процесса обдирки пучка отрицательных ионов водорода при взаимодействии частиц пучка и частиц газа. Данный факт приводит к некоторому занижению зарегистрированных показателей тока H⁻ на коллекторе. Экспериментальные данные для изученных газов по сужению пучка на 33% и соответствующие потери тока пучка H⁻ приведены в Таблице 1 [8].

Таблица 1. Изменение давления при добавлении различных газов, приводящее к сужению пучка на $\sim 33\%$ и соответствующие потери пучка.

$\Delta P, 10^{-5}$ Торр		Изменение FWHM пучка на 33% (мм)	Потери пучка H ⁻ (%)
$\Delta \text{Хе}$	0.3	9 → 6	5
ΔAr	2	10.5 → 7	9
ΔH_2	7	10.5 → 7	12

Сужение пучка объясняется процессом компенсации пространственного заряда. Механизм процесса описан в пункте 1.2. В целях верификации такого механизма компенсации пространственного заряда в будущем можно провести численное моделирование и аналитические оценки, и сравнить с экспериментальными данными оптической диагностики.

Таким образом, на основе проведённых экспериментов получена оценка параметров изображающей диагностики:

- Минимальный ток пучка, при котором достигается пороговый уровень интенсивности изображения пучка менее 1 мА;
- Минимальное давление напускаемого газа в диагностической камере для определения параметров пучка $\approx 10^{-5}$ torr;
- Точность определения центра пучка в сечении – 0.2 мм;
- Точность определения угла наклона пучка главным образом определяется точностью юстировки диагностической системы;
- Точность измерения углов фокусировки около 1 мрад;
- Минимальная экспозиция 10 мс и зависит от необходимых данных и их точности;
- Оптимальный диагностический газ – Хе, с точки зрения уменьшения ширины пучка, интенсивности излучения и воздействия на ток пучка.

3.2. Измерение углового и энергетического разброса частиц пучка по доплеровскому уширению линии H_{α}

Как указывалось ранее в пункте 1.1 для определения углового и энергетического разброса при помощи выражений (2) и (3) из эксперимента необходимо извлечь значение аппаратной функции, а также ширины спектральных линий при продольном и поперечном ракурсах наблюдения.

Аппаратная функция спектрометра измерена при помощи дейтериевой лампы (см. Рис. 11а) и её ширина составляет ~ 0.4 Å.

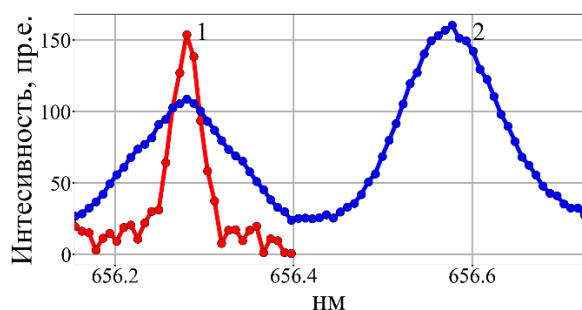


Рис. 11а. Аппаратная функция (1) и спектр излучения при поперечном наблюдении

(2).

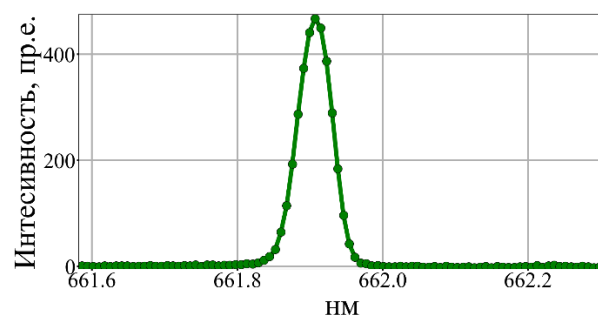


Рис. 11б. Спектр излучения при продольном наблюдении.

По данным, полученным со спектрометра при поперечном и продольном наблюдении (см. Рис. 11) дисперсии уширенных линий составляют 1.4 \AA и 0.59 \AA соответственно. Следовательно, по формулам (2) и (3) вычисляем дисперсии, связанной с угловым разбросом, и разброс энергии: $\sigma_{\Delta\theta} = 23 \pm 3 \text{ мрад}$ и $\delta E = 374 \pm 100 \text{ eV}$.

В измерениях углового разброса главный вклад в погрешность измерения вносят шумы измеренного спектра. В то время как, при определении энергетического разброса главный вклад в погрешность вносит точность измерения дисперсии аппаратной функции и дисперсии уширенной линии, так как эти величины близки.

Заключение

Таким образом, в ходе экспериментов, были исследованы возможности оптической диагностики пучка отрицательных ионов водорода. Изображающая диагностика позволяет измерять положение и угловые параметры пучка, вести настройку узлов генератора пучка для его оптимальной транспортировки в канале БНЗТ с точностью около 0.2 мм и 1 мрад при временном разрешении от 10 мс .

Кроме этого было проведено исследование влияния различных диагностических газов на транспортировку и оптическую диагностику пучка. Из экспериментов установлено, что при добавлении Хе интенсивность излучения пучка в ~ 2.5 раз выше, чем в случае добавления Аг, и в ~ 40 выше, чем в случае добавления H_2 . С точки зрения потерь пучка особой разницы между Хе и Аг не наблюдается, но в случае добавления H_2 при достижении оптимальной интенсивности пучка теряется значительная часть тока пучка. Помимо этого, на выбор газа может влиять его способность компенсировать пространственный заряд пучка, так как наличие пространственного заряда приводит к дефокусировке пучка. В наших экспериментах наблюдались следующие данные: при добавлении Хе наблюдаемое сужение пучка на $\sim 33\%$, вследствие процесса компенсации пространственного заряда, достигается

быстрее, чем при добавлении Ar или H₂. Таким образом, Xe или Ar являются наиболее предпочтительными диагностическими газами из исследованных в данных экспериментах.

В будущем возможны дополнительные численные, аналитические и экспериментальные исследования процесса компенсации объёмного заряда в целях верификации и уточнения, существующих на сегодня, теоретических описаний механизмов компенсации пространственного заряда.

В дополнении к этому была произведено измерение углового и энергетического разбросов частиц пучка по доплеровскому уширению спектральной линии Na.

Список литературы

1. Таскаев С. Ю. Ускорительный источник эпитепловых нейтронов //Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2015. – Т. 46. – №. 6.
2. Kreiner A. J. Accelerator-based BNCT //Neutron Capture Therapy. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – С. 41-54.
3. Kreiner A. J. et al. Present status of accelerator-based BNCT //Reports of Practical Oncology & Radiotherapy. – 2016. – Т. 21. – №. 2. – С. 95-101.
4. Горшков В. Н., Завалов А. М., Солошенко И. А. Исследование процесса компенсации объёмного заряда пучка отрицательных ионов в газе. //Физика плазмы. – 2007. – Т. 33. – №. 12. – С. 1127-1133.
5. Winklehner D., Leitner D. A space charge compensation model for positive DC ion beams //Journal of Instrumentation. – 2015. – Т. 10. – №. 10. – С. T10006.
6. Belchenko Y., Sanin A., Ivanov A. A 15 mA CW H-Source for Accelerators //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2009. – Т. 1097. – №. 1. – С. 214-222.
7. Sanin A. et al. Development of continuous wave high voltage negative ion beam injector for tandem accelerator //Review of Scientific Instruments. – 2019. – Т. 90. – №. 12. – С. 123314.

8. Sanin A. et al. Study of continuous wave 33 keV H⁻ beam transport through the low energy beam transport section //Review of Scientific Instruments. – 2019. – Т. 90. – №. 11. – С. 113323.
9. Логачев П. В. и др. Методы неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц в ускорителях //Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2016. – Т. 47. – №. 2.
10. Durand J., Braun H. H. Wall current monitors for CTF3. – 2000. – №. CTF3-Tech-Note-2000-014.
11. Fraser J. S. Developments in non-destructive beam diagnostics //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1981. – Т. 28. – №. 3. – С. 2137-2141.
12. Cottrell G. A. Tomography of neutral beams //Review of scientific instruments. – 1984. – Т. 55. – №. 9. – С. 1401-1409.