

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**
Кафедра

Физика плазмы

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Аникеева Кристина Игоревна

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы

**ИСТОЧНИК ИОНОВ ГЕЛИЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ОБДИРОЧНОЙ ПЛЕНКИ АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ
ПЕРЕЗАРЯДКИ**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

Иванов А.А.

ученая степень, звание

д-р физ-мат наук

должность, место работы

зам. дир. ИЯФ СО РАН

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

«.....».....20...г.

Научный руководитель

Давыденко В.И.

ученая степень, звание

д-р физ-мат наук

должность, место работы

ведущий н. с. ИЯФ СО РАН

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

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2017

Содержание

1. Введение.....	5
2. Литературный обзор.....	7
3. Выбор источника ионов.....	9
4. Расположение на ITER.....	15
5. Ключевые составляющие источника.....	17
5.1. Необходимые требования и технические решения.....	18
6. Моделирование.....	22
7. Эксперименты.....	25
8. Траектория пучка и его отклонение. Макет источника до 15 кэВ.....	27
9. Заключение.....	29
10. Список литературы.....	30

Обозначения и сокращения

В дипломной работе применяются следующие определения, обозначения и сокращения:

ИТЭР – интернациональный термоядерный экспериментальный реактор;

БА – Баярда-Альперта

ИИГ –источник ионов гелия

1. Введение

Для контроля качества обдирочной пленки анализаторов атомов перезарядки на токамаке ИТЕР, разработан специализированный источник ионов гелия с энергией 15 кэВ, в последующем произойдет модернизация источника до 40кэВ. Достаточно высокая энергия ионов, качественные характеристики пучка, определенные условия размещения источника, невозможность вскрытия всего оборудования в течение длительного периода, конструкция ИИГ допускает использование материалов, разрешенных ИТЕР. Ко всем системам, находящимся в прямом вакуумном канале с ИТЭР, предъявлены особые требования по материалам и технологиям разработки для предотвращения вытекания, накопившегося за время работы радиоактивного трития. Все вышеперечисленное потребовало точного анализа и решения сложных задач при выполнении работ. Разработанный вариант источника является уникальным по ряду параметров.

В 2016 г. в ИЯФ СО РАН разработан, создан и испытан макет специализированного источника ионов гелия на основе лампы Байарда-Альперта [1] с энергией 40 кэВ, предназначенный для использования в комплексе контроля качества обдирочной пленки анализаторов атомов перезарядки. В настоящее время проведены экспериментальные исследования для определения оптимальной энергии ионов гелия и параметров работы источника, которые соответствуют этой энергии. В качестве оптимальной энергии ионов рассматривается минимальная энергия, при которой возможно надежное выделение сигнала ионов над фоном на амплитудном распределении сигналов с выхода детектора.

Выбор ключевого элемента – источника ионов, был основан на предыдущем источнике ионов водорода, который предназначался для калибровок анализаторов. Многие решения по разработке и изготовлению ИИГ были основаны на результатах моей бакалаврской дипломной работы[2].

Моделирование и прогноз хода пучка ионов имеет важное значение в данной работе, размещение и периода работоспособности ИИГ на ИТЭР напрямую связан с поведением пучка в установке и его конечным профилем.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе проектировал новую диагностическую систему для ИТЭР. Особые требования к материалам и конфигурациям источника вызваны наличием высокого нейтронного фона и гамма-излучения. Вся диагностическая система должна обладать высокой стойкостью к радиации с долговременным и стабильным коэффициентом работоспособности. Поэтому при дистанционной замене элементов системы необходимо вести контроль качества регистрирующих

элементов специальным оборудованием, встроенным в портплаг ИТЭР, такой как источник ионов гелия для контроля обдирочной пленки анализаторов.

Контроль качества пленки производится путем пропускания через нее пучка легких ионов, после прохождения, регистрируется энергетический спектр рассеянных ионов. [4]

Представленные технические решения сохраняют требование о цельности вакуумного канала для прохождения атомов изотопов водорода беспрепятственно в систему анализаторов, ИИГ выдерживает тепловую, радиационную и механическую нагрузку.

2. Литературный обзор

ИТЭР (ITER) – международный термоядерный экспериментальный реактор на основе дейтерий-тритиевого топлива. В институте им. А. Ф. Иоффе собирается диагностическая система анализаторов атомов перезарядки, которая предназначена за счет анализа потоков изотопов водорода, помочь оперативно подбирать необходимые концентрации DT топлива.

Low Energy Neutral Particle Analyzer (LENPA) и High Energy Neutral Particle Analyzer (HENPA) позволяет измерить концентрацию DT в центральной и периферийной зоне токамака.

Контроль изотопного соотношения является одним из главных рабочих моментов ИТЭР, та как на установке необходимо добиться оптимального режима горения в плазме. Анализ потока частиц. Пожалуй, на данный момент основной способ диагностики горячей плазмы[3]. Анализаторы должны быть всегда откалиброваны и сохранять качество ключевых элементов. Правильно подобранные отношения концентрации DT обеспечивают стабильность горения в плазме.

ИТЭР имеет импульс порядка 1000 с, что приводит к ядерному излучению, вблизи анализаторов присутствует высокое рассеянное магнитное поле, все это требует разработки специальных защитных боксов. Жесткие ограничения в портплеге ИТЭР потребовали поместить LENPA и HENPA вдруг за другом так, чтобы линия просмотра не заполнялась другими частями приборов.

Анализаторы представляют стандартную схему: поток частиц, проходящий через углеродную пленку (100 ангстрем), ионизируется, затем ионы распределяются в магнитных и электрических полях по массе и энергии. Системы анализаторов атомов перезарядки обладают механизмом смены пленок, качество, которых контролируется специальным источником ИИГ.

Разработка систем анализаторов ведется с исследованиями возможности работы совместно с режимом горения DT. Диагностика планируется использоваться как способ для изучения удержания альфа частиц, которые образуются в результате длительного рабочего импульса ИТЭР. Отработанных и специально предназначенных методов удержания и измерения функции распределения альфа-частиц, на данное время, не существует. В представлении идеально работающей установки, передача энергии удержанных альфа-частиц электронам и ионам должна обеспечить самоподдерживающийся разряд в УТС.

Также данные, полученные с анализаторов, призваны дать представление о дрейфе испаренного вещества в сторону большого радиуса при изучении инъекции макрочастиц, которые являются замороженной смесью DT.

Углеродная обдирочная мишень – это тонкая пленка толщиной 100 ангстрем, помещенная на мелкоструктурную медную сетку, мишень является необходимым элементом анализатора, и изменение толщины пленки приводит к ошибкам в крайне важных показателях. Следовательно, была реализована система контроля качества, которая засвечивает углеродную мишень пучком ионов гелия с высокой энергией и маленьким током, далее происходит регистрация энергетического спектра, прошедшего пучка, после чего принимается решения о смене на новую пленку.

3.Выбор источника ионов

Рабочий вариант источника ионов гелия - лампа Баярда-Альперта, в первую очередь потому, что все ее трудности в использовании были хорошо изучены на модели калибровочного протонного источника[3]. Вариант такого рода источника ионов гелия прост в эксплуатации и надежен в работе, все комплектующие лампы легко поддаются замене.



Рис.1. Лампа Баярда-Альперта, катод: иридий с окисью тора, заводской сборки.

Ниже представлены основные параметры и графики лампы в рабочем режиме:
Электронный ток порядка 10мА (максимальное значение в стационарном режиме)

- Катоды потребляют от 20 до 40 Вт (технические требования о производителя)
- Подаваемый газ гелий, водород решено было убрать, так как он взрывоопасен и не соответствует требованиям работы на ИТЕР
- Коллектор удален с целью создания потока ионов, который формируется мелкоструктурной ионно-оптической системой

Принцип работы: в центральную часть сетки лампы подается газ гелий, он ионизируется осцилляциями электронов, которые формирует катод, а подаваемое напряжение на анодную сетку затягивает поток электронов внутрь цилиндрической сетки.

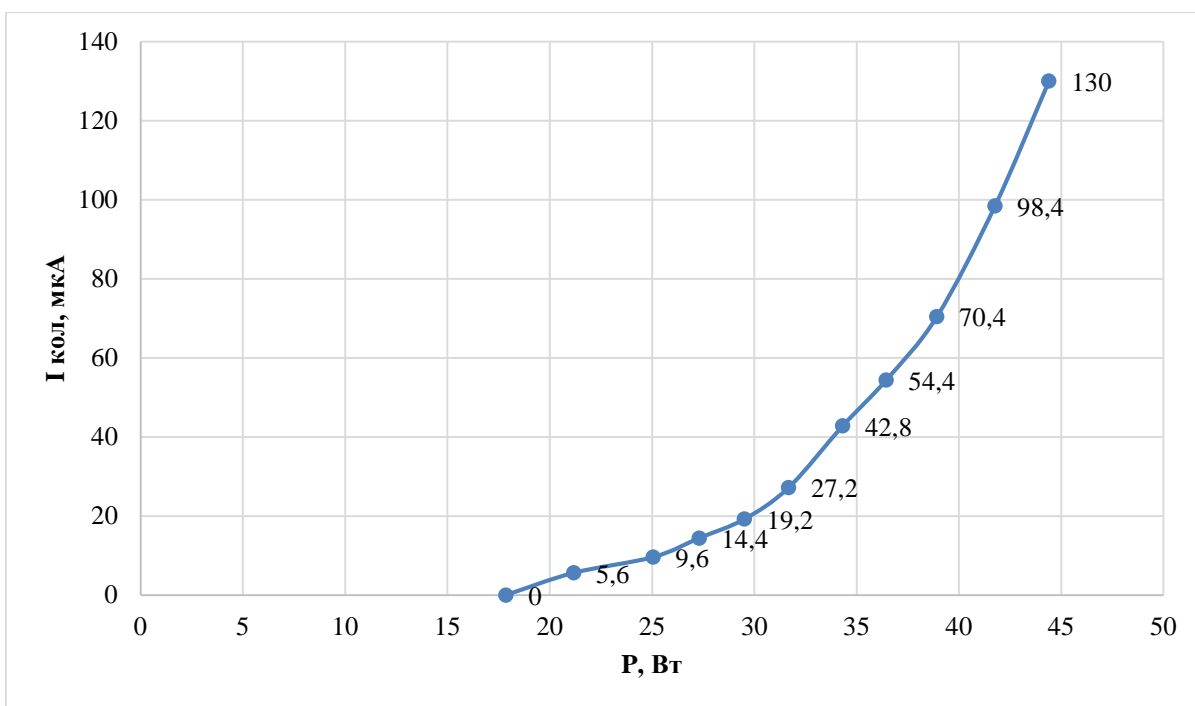


Рис.2. График зависимости тока на коллектор (заземленный), рабочие две нити иридия.

Ток растет экспоненциально при увеличении подаваемой мощности на анодную сетку.

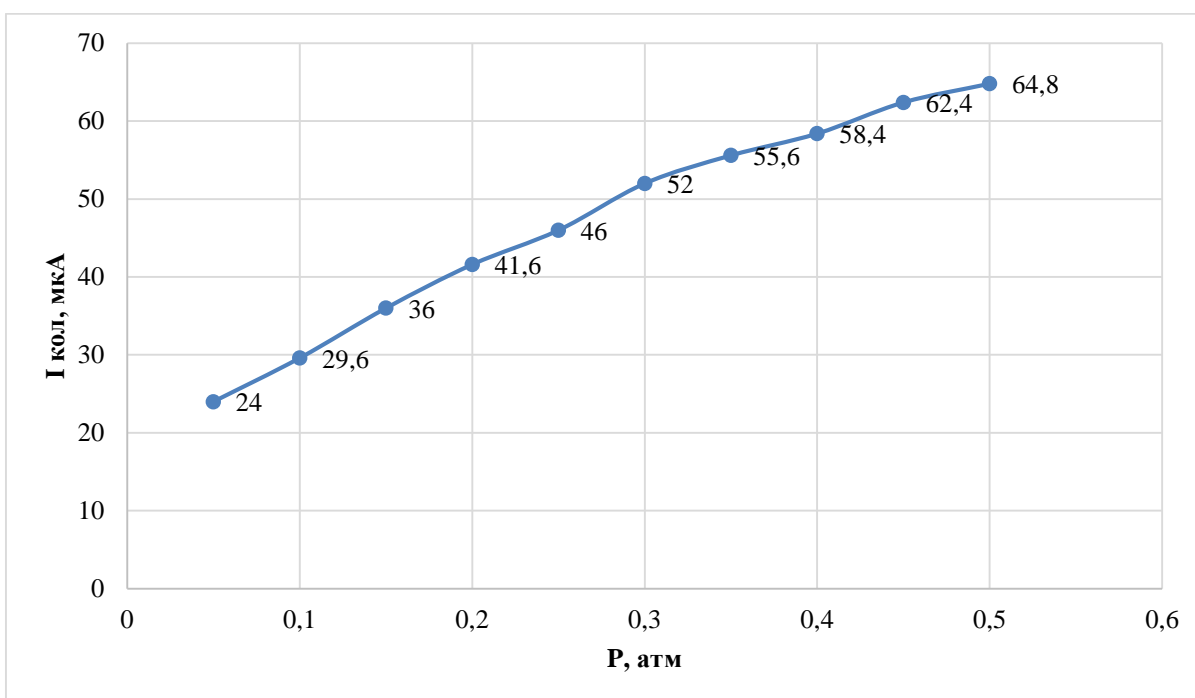


Рис.3. Линейная зависимость тока на коллектор от напуска газа

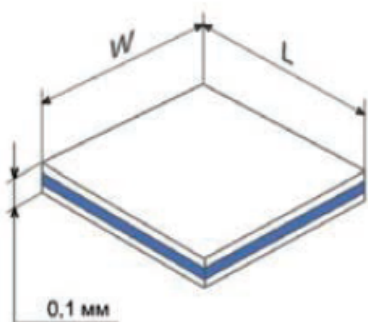
В ходе разработок рассматривались другие варианты источника ионов.

Первый вариант:

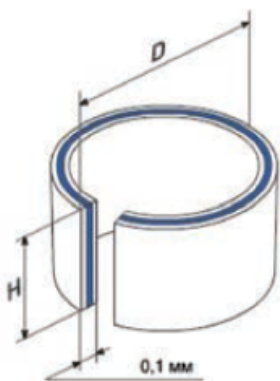
Один из самых первых, рассмотренных вариантов источника ионов гелия, был основан на источнике ионов ^{63}Ni источник бета-частиц 30x10мм.

Основное преимущество: исключена поломка источника бета-частиц, и как следствие работоспособность обеспечивается на 4 года.

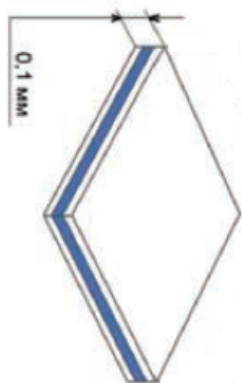
Плоскостные источники



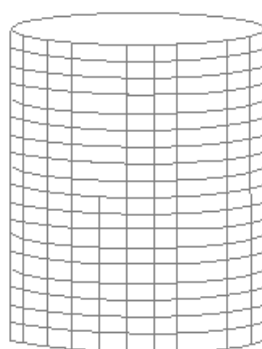
Цилиндрические источники



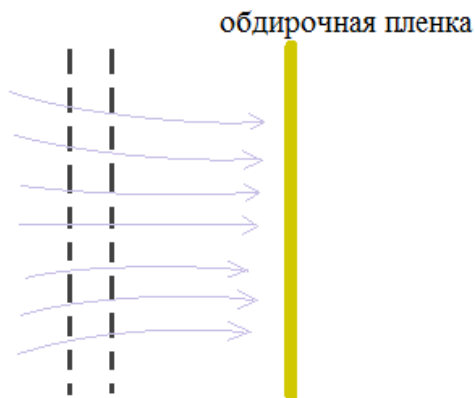
Код источника	Номинальная активность *		Минимальный ионизационный ток, нА	Габариты, LxW, мм
	мКи	МБк		
BNi3.S1	8	296	3	15x10
	10	370	5	
BNi3.S2	15	555	8	25x10
BNi3.S3	2,7	100	2	30x10
	10	377	5	
	20	740	9	
	24,3	900	10	
BNi3.S4	2,7	100	2	48x3
	10	370	5	
BNi3.S5	0,73	27	0,5	14,5x1,7
BNi3.S6	1,73	73	1,2	38,5x1,7
BNi3.C1	8	296	3	4,8x3
	10	370	5	
BNi3.C2	15	555	8	8x10
BNi3.C3	2,7	100	2	9,6x10
	10	370	5	
	20	740	9	
	24,3	900	10	



источник бета-частиц



сетка 3x2см



ионно-оптическая система

Рис.4. Конфигурация и параметры ^{63}Ni источник бета-частиц.

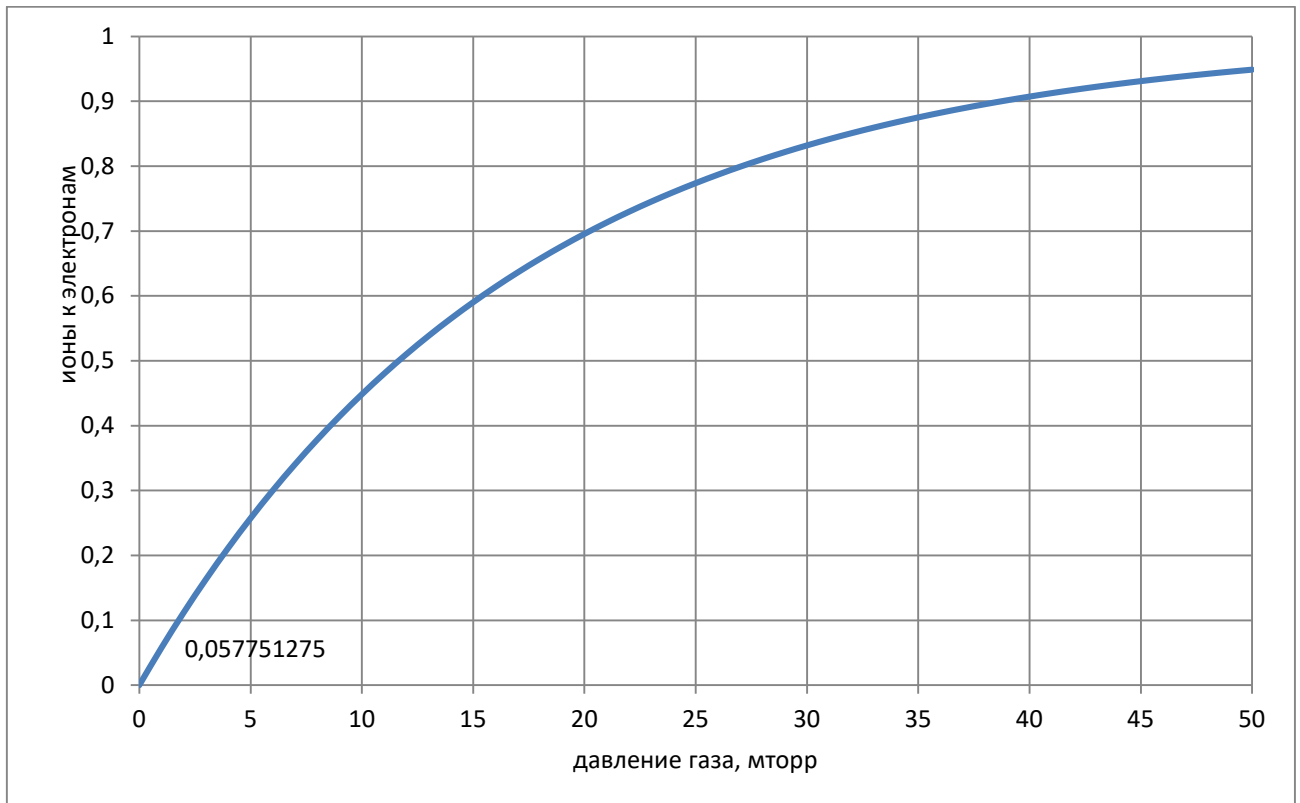
Источник бета-частиц испускает примерно $24,3 \text{ мКи} = 2 \text{ рентгена}$.

1 рентген дает $nV \text{ 1 см}^3$ воздуха при атм. давлении $2,8 \cdot 10^9$ ионов.

Давление газа в сетке 10^{-2} мТорр , объем сетки $18,18 \text{ см}^3$

Значит, на сетку направится $I_e \approx 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ А}$

$(1 - e^{-n\sigma_i l})$ – вероятность ионизации электроном



$P = 10^{-2} \text{ мТорр}$

$$(1 - e^{-n\sigma_i l}) \approx 0.00057$$

$$\Omega = \int_0^L 0.25 \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}}\right) dl - \text{общая доля частиц внутри телесного угла.}$$

Высота сетки ($L = 3 \text{ см}$), а радиус ионно-оптической системы ($r = 3 \text{ см}$).

$\Omega = 0.71$ - общая доля частиц внутри телесного угла 71%.

$$\text{Ток ионов } I_i = 1,3 \cdot 10^{-9} \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,71 = 5,2 \cdot 10^{-13} \text{ А}$$

Электроны высокоэнергетичны, необходимо учитывать, что один электрон способен ионизовать дважды, здесь это неучтено.

Второй вариант на основе фотокатода.

Фотокатод: (InGaAs), $A_{\text{выхода}}=1,1\text{эВ}$, квантовый выход фотоэлектронной эмиссии $\gamma=10^{-2}\text{эл/фотон}$.

Лазер: $P=10000\text{мВт}$, $\lambda=445\text{нм}$, в расчетах время работы $t=1\text{с}$.

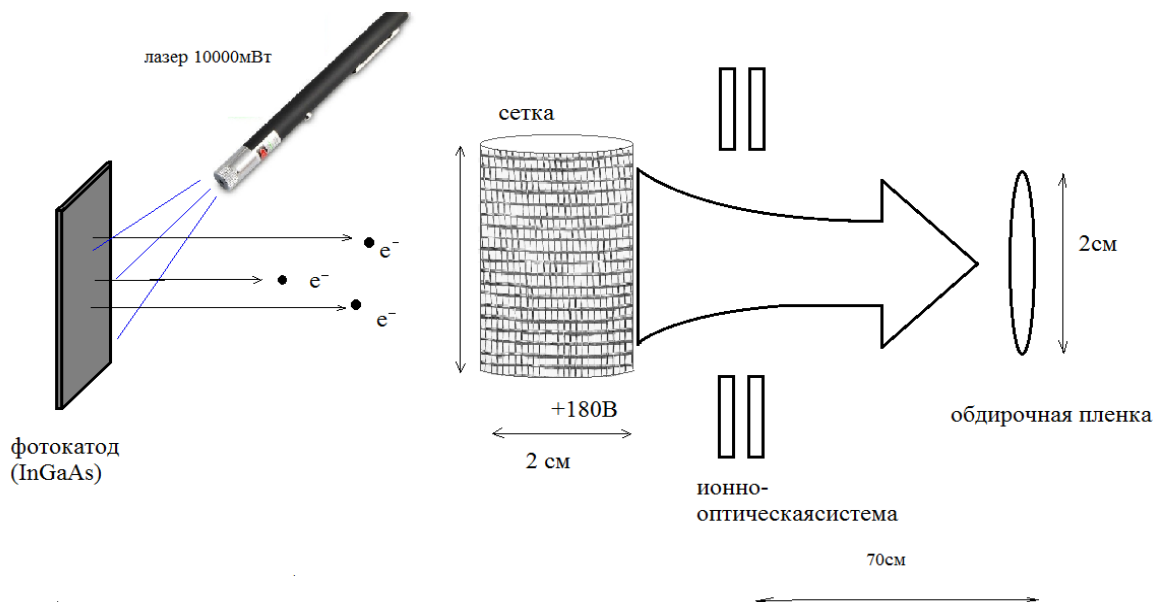


Рис.5. Схема на основе фотокатода **InGaAs**

Энергия фотонов $E_{\text{фотона}}=h*c/\lambda \approx 4,4 * 10^{-19}\text{Дж}$

Работа выхода $A_{\text{выхода}} \text{ электрона} = 1,76 * 10^{-19}\text{Дж}$,

Количество фотонов в секунду $N_{\text{фотонов}} \text{ за } 1\text{с} = P/E = P*\lambda/h*c \approx 2,3 * 10^{16} \text{ с}^{-1}$

$N_{\text{электронов}} = \gamma * N_{\text{фотонов}} \approx 2,3 * 10^{14} \text{ с}^{-1}$

Ток электронов $I_e = e * N_e \approx 43\text{мкА}$

Если на сетку подать +180В, то $E_e = e*\varphi \approx 62\text{эВ}$ (что вполне хватает на ионизацию гелия)



$$\sigma * L = 2 \text{ см} * 10^{-16} \text{ см}^3$$

$$I_p \approx I_e (1 - e^{-n\sigma_i l}) \Omega \alpha_p \quad \text{Ток протонов}$$

$(1 - e^{-n\sigma_i l})$ – вероятность ионизации электроном

Давление внутри сетки $P = 10^{-2}$ мторр

$$(1 - e^{-n\sigma_i l}) \approx 0.00057$$

$$\Omega = \int_0^L 0.25 \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}}\right) dl \text{ - общая доля частиц внутри телесного угла, высота}$$

($L = 3 \text{ см}$), радиус ионно-оптической системы ($r = 3 \text{ см}$).

$\Omega = 0.71$ - общая доля частиц внутри телесного угла 71%.

В результате:

$$I_i = 43 \text{ мкА} \cdot 0.00057 \cdot 0.71 = 174 * 10^{-10} \text{ А} \text{ - ток ионов.}$$

4. Расположение на ИТЭР

На Рис.6 представлен токамак ИТЭР, в нижнем углу система анализаторов в открытом вакуумном канале[6]. В верхнем правом схема на вход в анализатор.

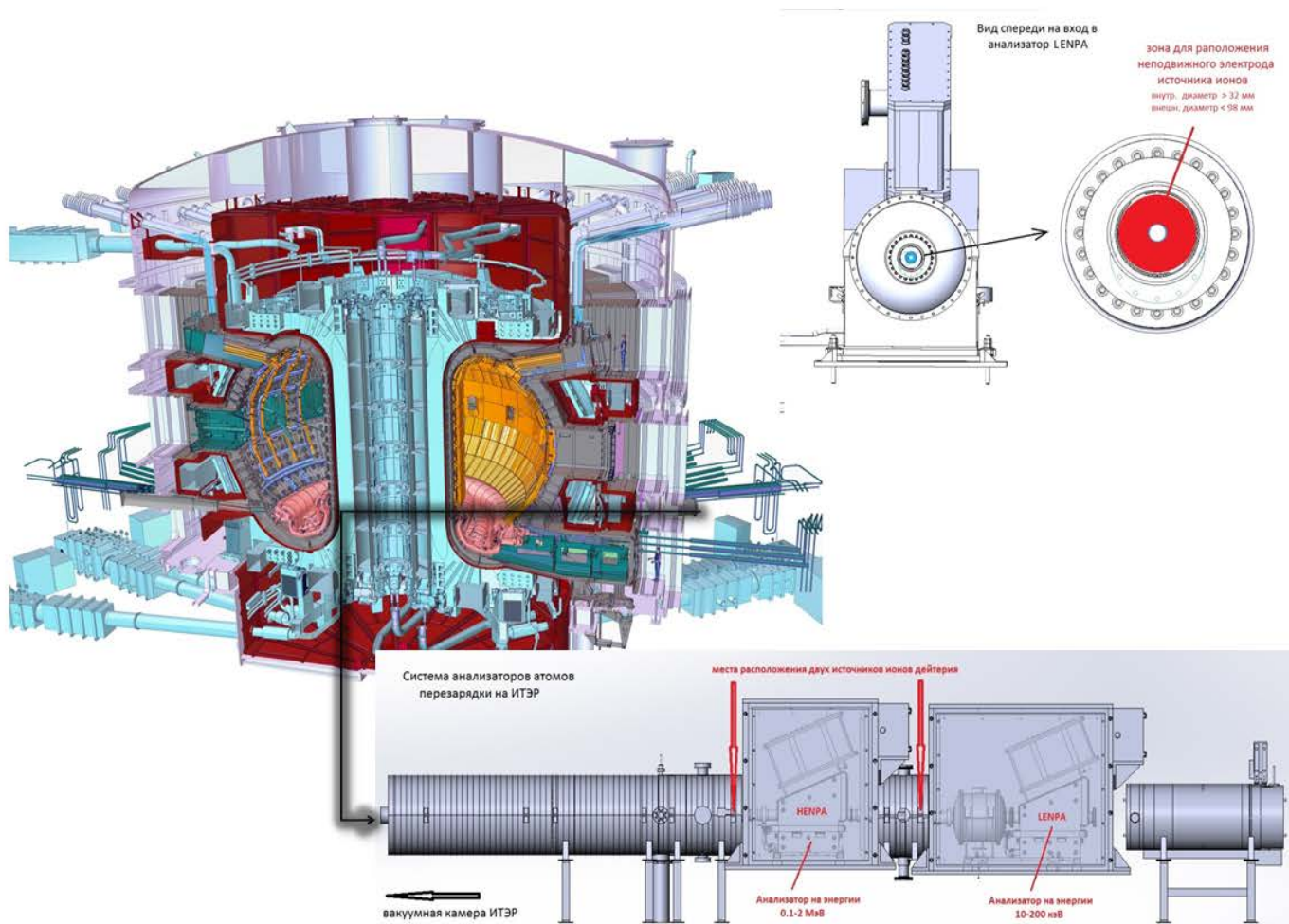


Рис.6. Расположение ИИГ. Указано красными стрелками

Источник ионов гелия для контроля пленки должен располагаться так, чтобы во время работы установки не перекрывать входы анализаторов, работа ИИГ происходит исключительно в период подготовки к включению токамака.

Был рассмотрен вариант расположить источник на подвижном механизме, тогда бы не было бы необходимости создавать сложные конструкции источника ионов гелия, но велик риск, если механизм заклинит, то анализаторы будут перекрыты ИИГ, что недопустимо, поэтому было решено расположить источник ионов гелия ниже уровня просмотра анализаторов, и направлять пучок под углом, так чтобы попасть во входное отверстие анализатора. Как показано на Рис.7.

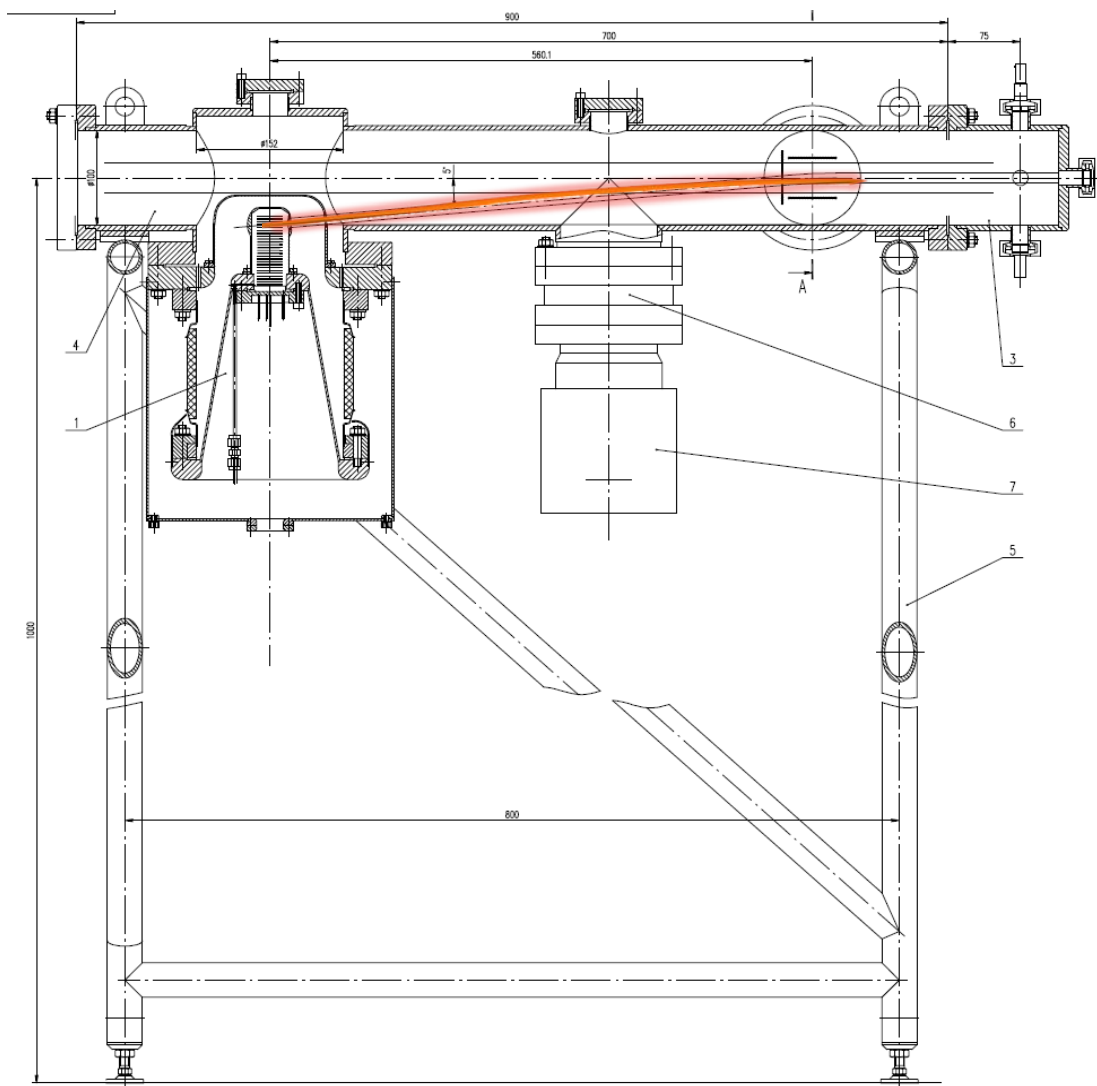


Рис.7. Схема экспериментального стенда, траектория пучка направлена под углом из источника ионов

5. Ключевые составляющие источника

Источник ионов гелия для контроля качества углеродной пленки анализаторов состоит из трех ключевых элементов:

1. Источник ионов на основе Байярда-Альперта;
2. Мелкоструктурная ионно-оптическая система;
3. Конденсатор для управления наклона пучка.

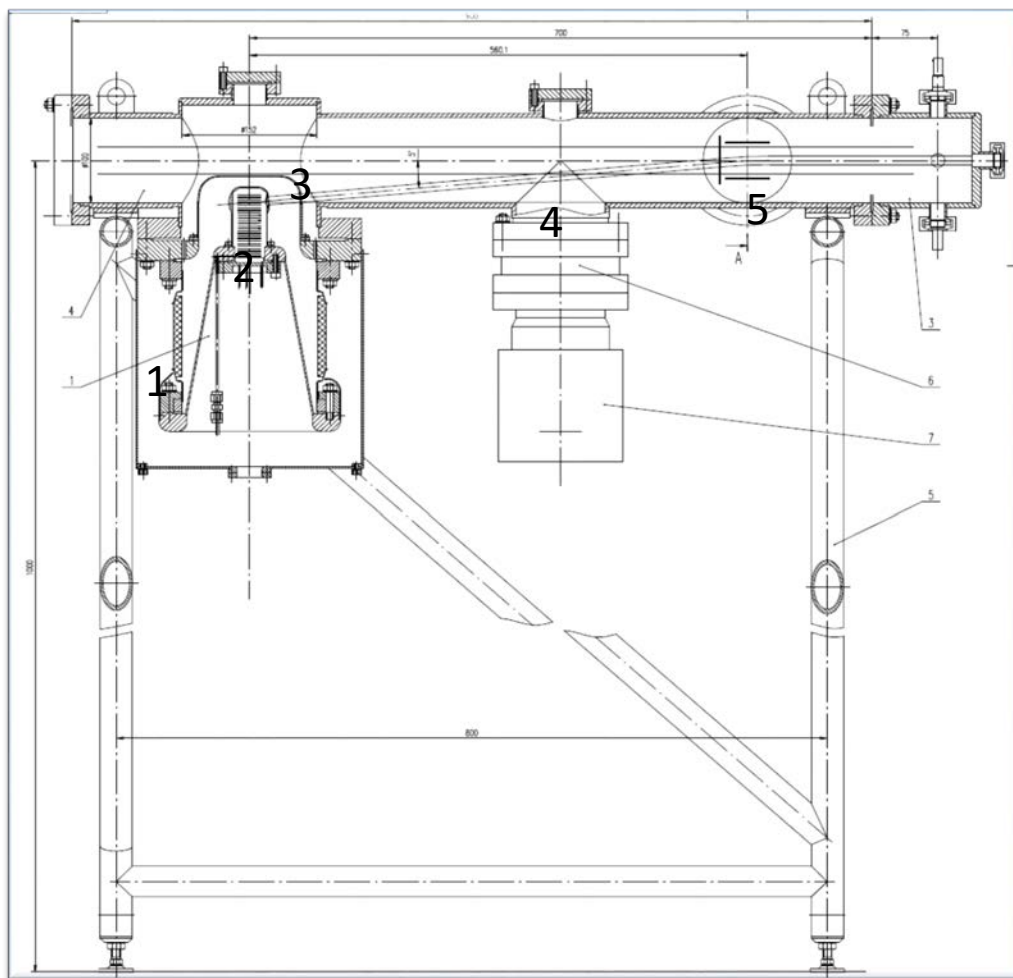


Рис.8. Вакуумный стенд для испытаний источника ионов. Слева - продольный разрез, справа - вид вдоль оси. 1. Подача газа с помощью mass-flow-контроллера MKS со скоростью $1,0 \text{ см}^3/\text{мин.}$, 2. Источник ионов, 3. Вытягивающие электроды, 4. Направляющий конденсатор, 5. Детектор.

Перечень использованного оборудования для измерений:

- Цифровой мультиметр “Agilent 34420A”, серийный номер MY442001600 (Свидетельство о поверке № 251214, действительно до 18.08.2017).
- Встроенный вольтметр высоковольтного источника питания Spellman STR150N6/200, серийный номер 101839791.

- Вакуумметр с датчиком “Pfeiffer PKR-251, D 35614, PTR 26000”, серийный номер № 44975978 и контроллер “Pfeiffer Dual Gauge TPG 362, PTG 28250”, серийный номер 44990184.
- Осциллограф цифровой Agilent Technologies DSO-X 2024A, серийный номер № 48998-12 (Свидетельство о поверке № 0041305, действительно до 29.03.2017).

5.1. Необходимые требования и технические решения

- Источник должен формировать пучок ионов дейтерия с энергией 40 кэВ.
- Пучок должен обеспечивать равномерную засветку (в пределах $\pm 20\%$) окружности диаметром 2 см.
- Полная интенсивность пучка $(0.1 - 1) \times 10^{-12}$ А.
- Стабильность энергии пучка не должна быть хуже $\pm 0.25\%$, а его интенсивность не должна меняться более чем $\pm 10\%$.
- Материалы должны быть радиационно-стойкими и выдерживать суммарную дозу облучения нейтронами и гамма квантами до 10^{15} см⁻².
- Источник ионов будет эксплуатироваться в условиях вакуумной среды при давлении $\leq 10^{-5}$ мм рт. ст. и температуре не выше 50 °С.
- Источник должен обеспечивать безаварийную работу в течение 4-х лет.
- 2.5см - такая ширина пучка является минимально возможной для удовлетворения требования по неоднородности ионного тока.
- Полный ток пучка при максимальной интенсивности составит $6 \cdot 10^{-12}$ А.

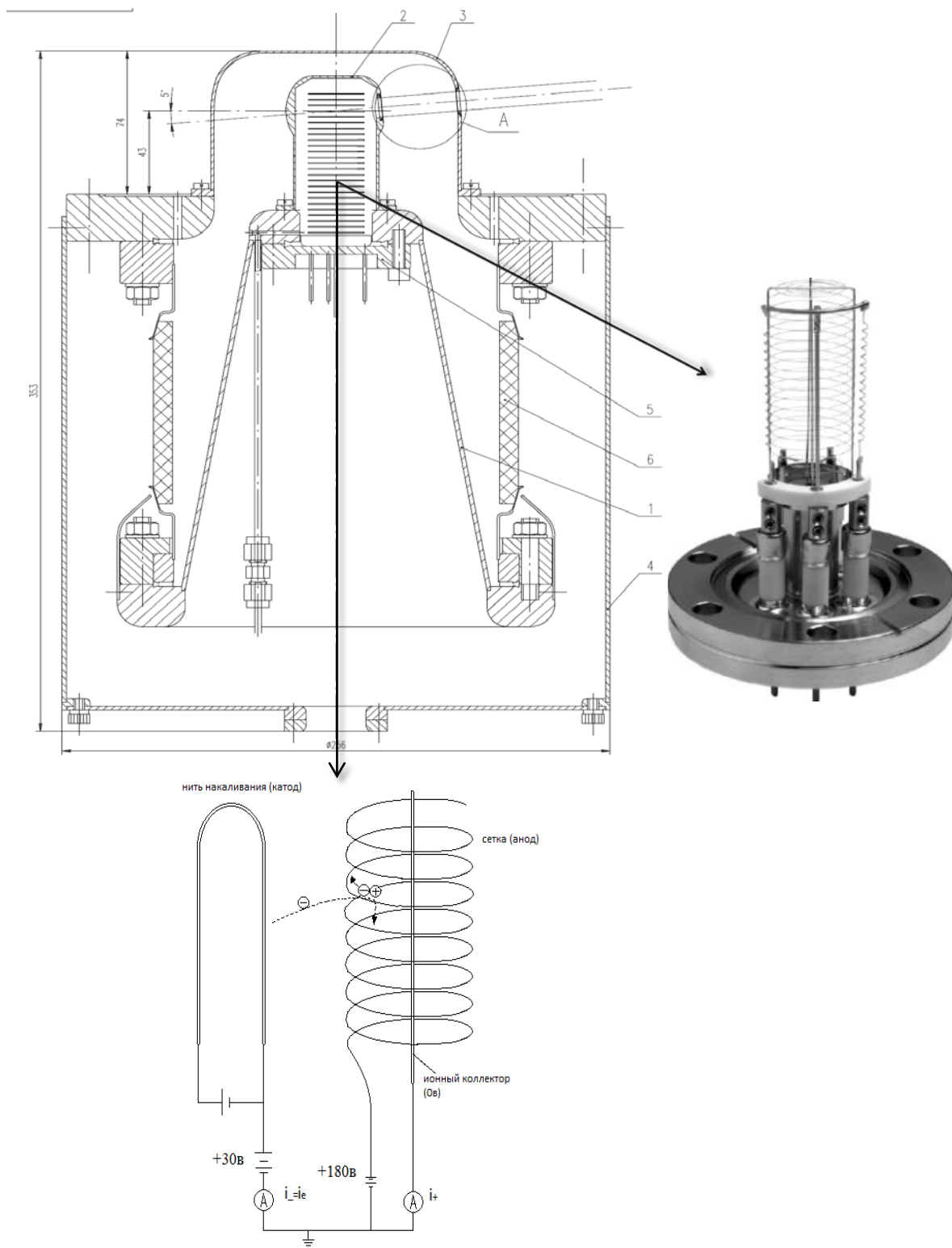


Рис.9. Ионный источник на основе ионизационной измерительной лампы Байярда-Альперта.

Для применения в источнике выбрана сверхвысоковакуумная лампа Байярда-Альперта, показанная на рисунке Рис.9.

Учтем, что плотность тока ионного пучка распределена по гауссу при пролете в анализатор с шириной на уровне $1/e$ равной 2.5 см, что удовлетворяет требования по неоднородности тока. Следовательно, полный ток пучка при максимальной интенсивности составит $6 \cdot 10^{-12}$ А.

Ионизационная лампа БА была изменена для получения ионов путем осцилляций электронов внутри цилиндрической сетки. Лампа БА является совершенно стандартным, широко используемым надежным устройством. В настоящее время шесть известных производителей (SRS, Granville-Philips, ETI, Duniway Stockroom, Kurt J. Lesker, Varian) изготавливают взаимозаменяемые лампы одинаковой конструкции. Оценим ток эмиссии электронов в лампе необходимый для получения тока пучка 10^{-11} А при давлении дейтерия в лампе 10^{-5} Тор. Полный ток ионов в лампе составляет $I_i \approx I_e n_o \sigma_i L$, где I_e – ток эмиссии электронов, n_o – плотность дейтерия, σ_i – сечение ионизации молекул дейтерия электронами, $L \approx 25$ см - длина пробега электронов до поглощения сеткой. В ионно-оптическую систему попадет доля этих ионов равная отношению эмиссионной площади к площади цилиндра из сетки, составляющему при эмиссионном диаметре пучка ионов дейтерия 1 см величину ≈ 0.01 . В результате, оцениваемый ток эмиссии электронов составляет 1.8 мкА. Это значение тока существенно меньше максимального тока эмиссии 10 мА для ламп БА.

Для формирования пучков с малым током подходящим является ионный источник на основе ионизационной измерительной лампы Байярда-Альперта, лампа хорошо изучена, как источник ионов в течении двух лет в Институте Ядерной Физики СО РАН [2].

В лампах Байярда-Альперта наиболее надежными являются эмиттеры из иридия, покрытого окисью тория (ThO_2Ir).

Для получения электронного тока эмиссии 10 мА требуется нагрев эмиттера до 1400°C , при токе эмиссии $\sim 10^{-6}$ А температура эмиттера снижается до 1100°C .

Для повышенной надежности эта лампа оборудована двумя независимыми эмитирующими спиралями. Источник работает на одной спирали, в случае ее выхода из строя подключается другая.

Формирование пучка в ионном источнике решено производить простой диодной системой. Апертуры для пучка в эмиссионном и вытягивающем электродах закрываются мелкоструктурной молибденовой сеткой. Малый шаг сетки обеспечивает быстрый спад поперечного электрического поля, являющегося основным фактором, определяющим угловую расходимость сформированного ионного пучка.

Расположение ИИГ на расстоянии 100 см от входа в анализатор с углом наклона пучка в 2 градуса позволит ионам попасть в зазор анализатора с использование отклоняющего конденсатора. Напряжение на обкладках конденсатора должно быть пропорционально энергии ионов.

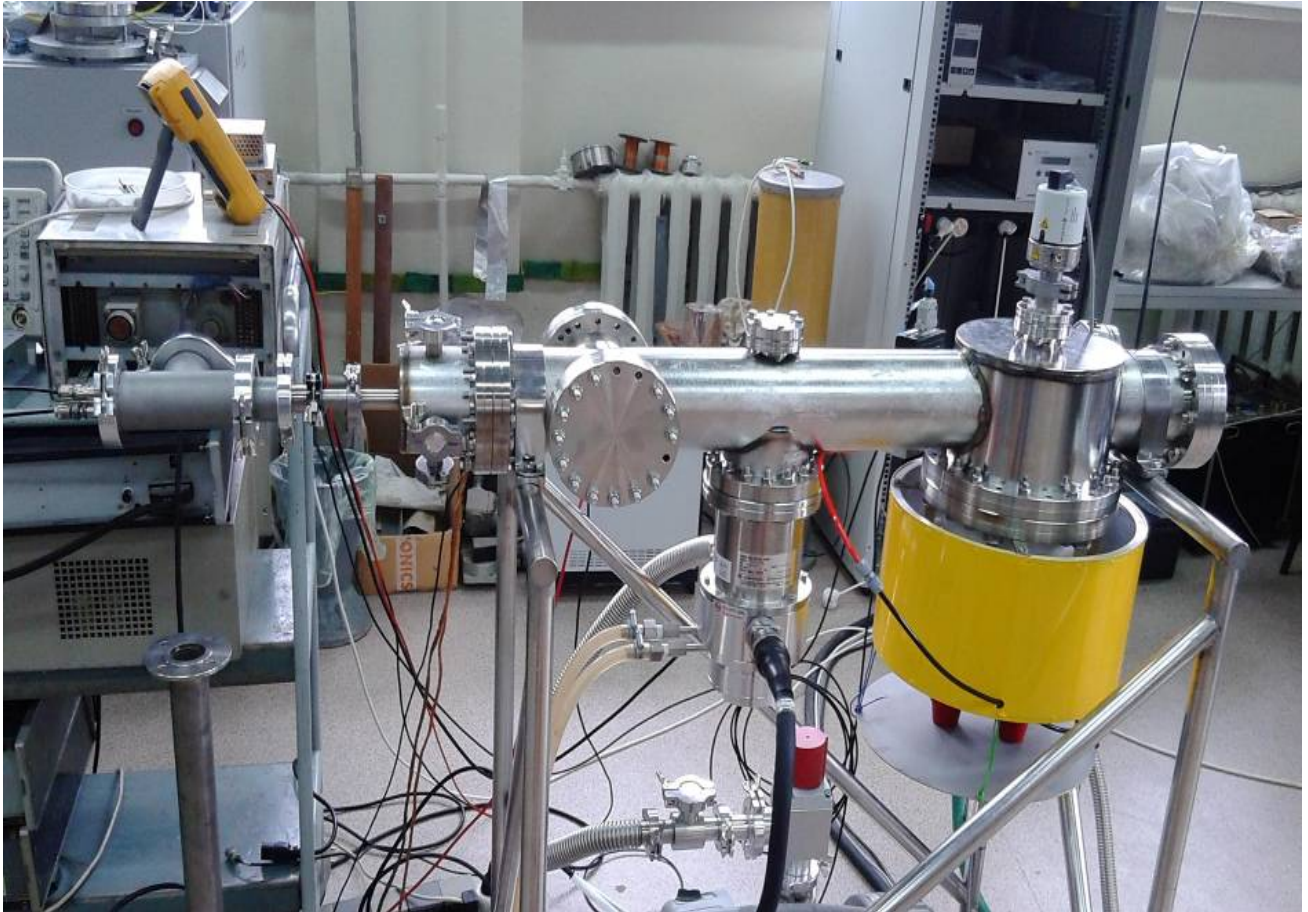


Рис.10. Источник ионов гелия. Экспериментальный стенд.

6. Моделирование

На рисунке 11 показано расчетное угловое распределение ускоренных частиц. Частицы имеют почти однородное распределение в диапазоне от -40 до 40 мрад.

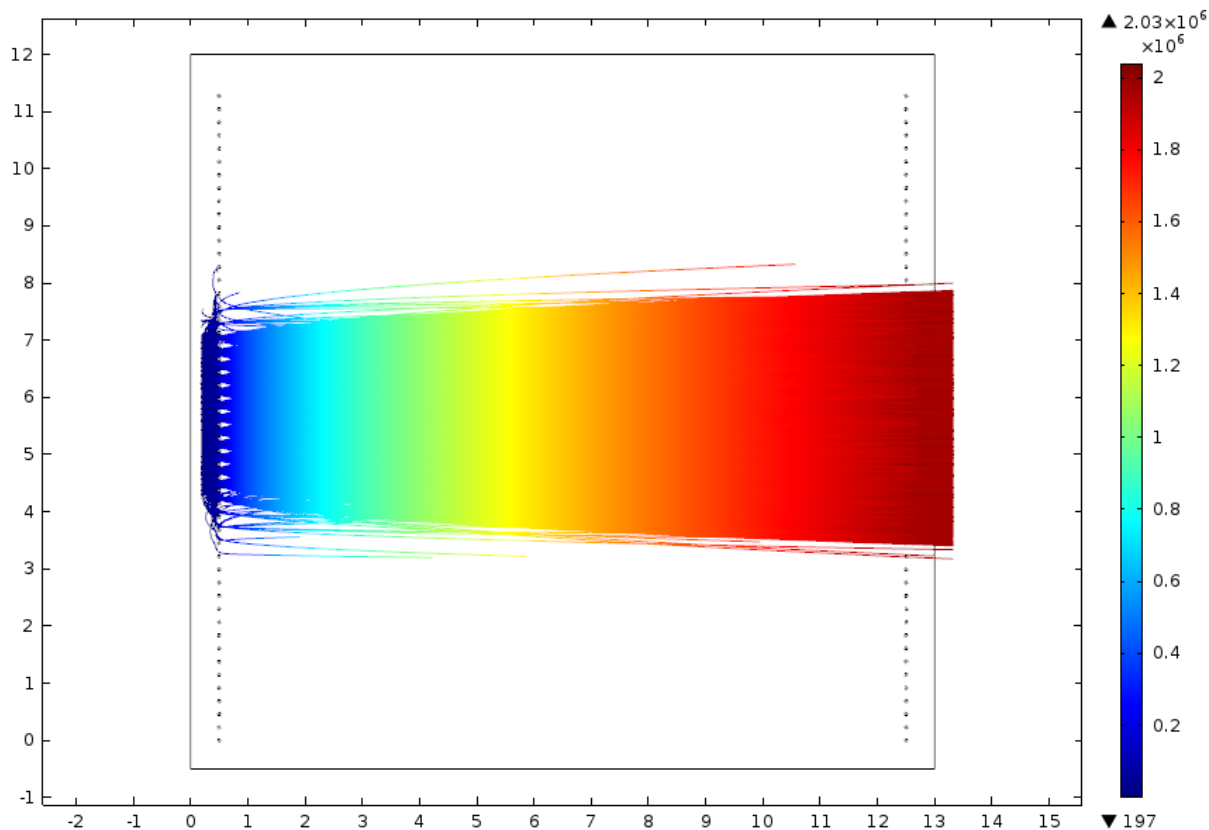


Рис.11. Траектории частиц в ускоряющем зазоре. Цветом показана скорость ионов.

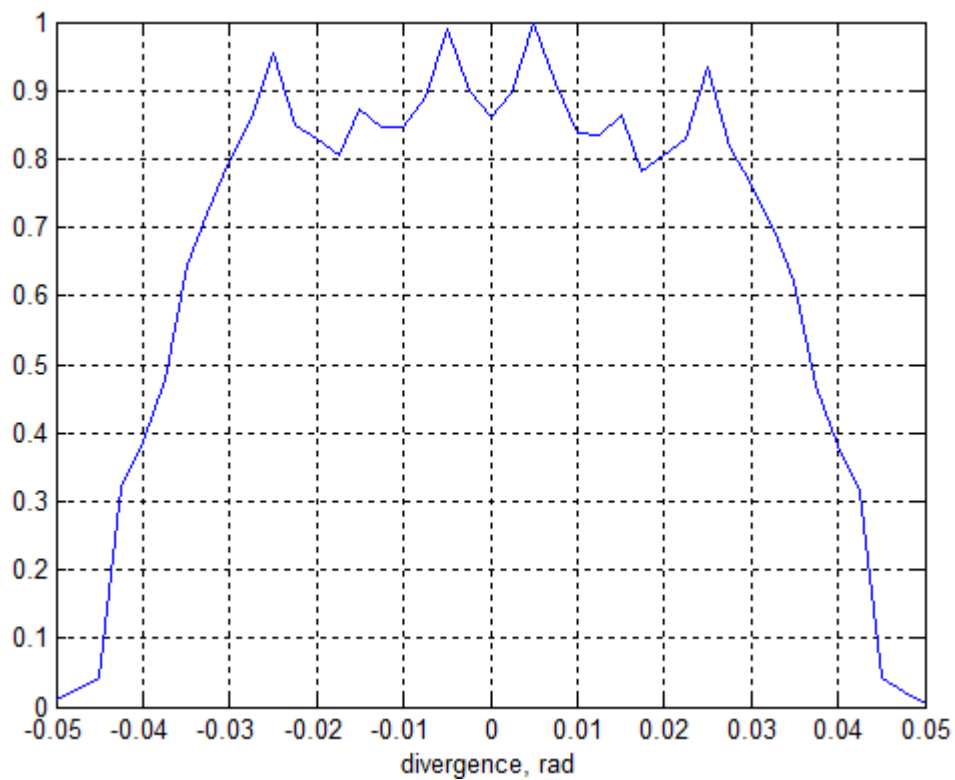


Рис.12. Угловое распределение ускоренных частиц.

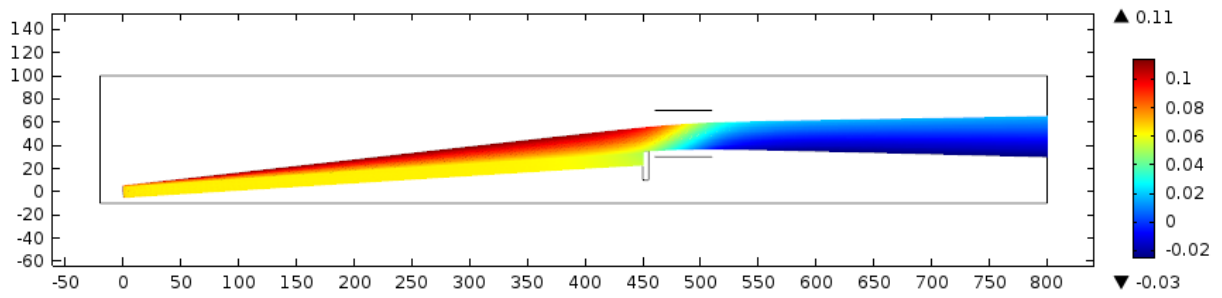


Рис.9. Расчетные траектории ионов пучка при отклонении пучка конденсатором. Цветом показано отношение поперечной компоненты скорости к продольной.

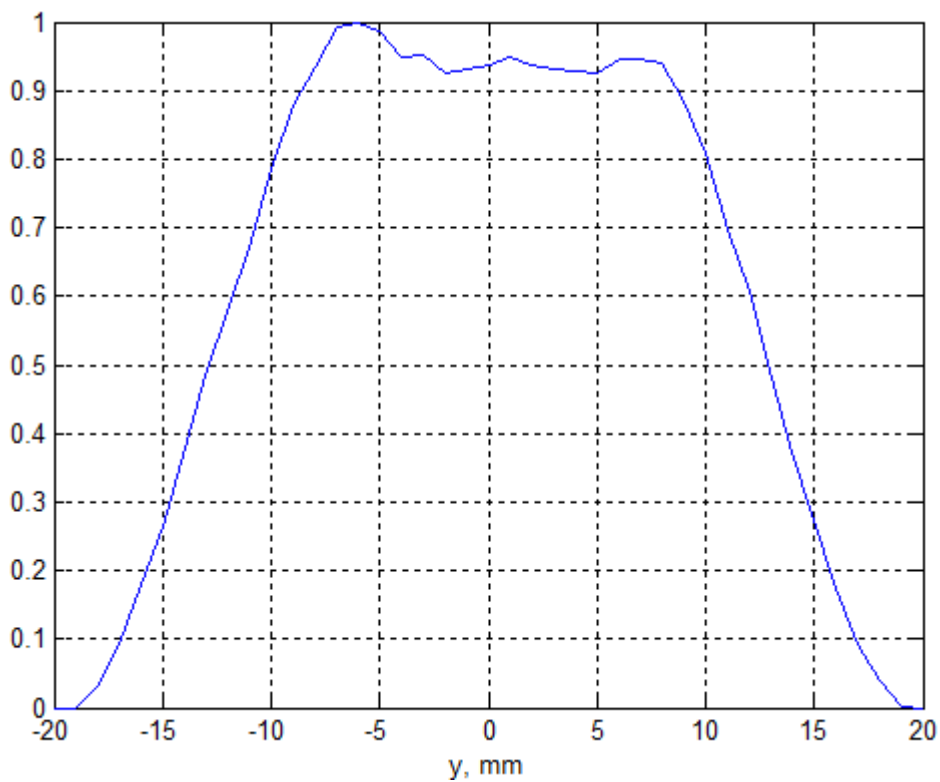


Рис.13. Расчетный вертикальный профиль плотности тока пучка ионов на входе в анализатор.

Расчетное распределение давления вдоль камеры на рисунке 14. Давление внутри лампы принято составляет 10^{-5} торр, начало отчета расстояния соответствует центру лампы БА

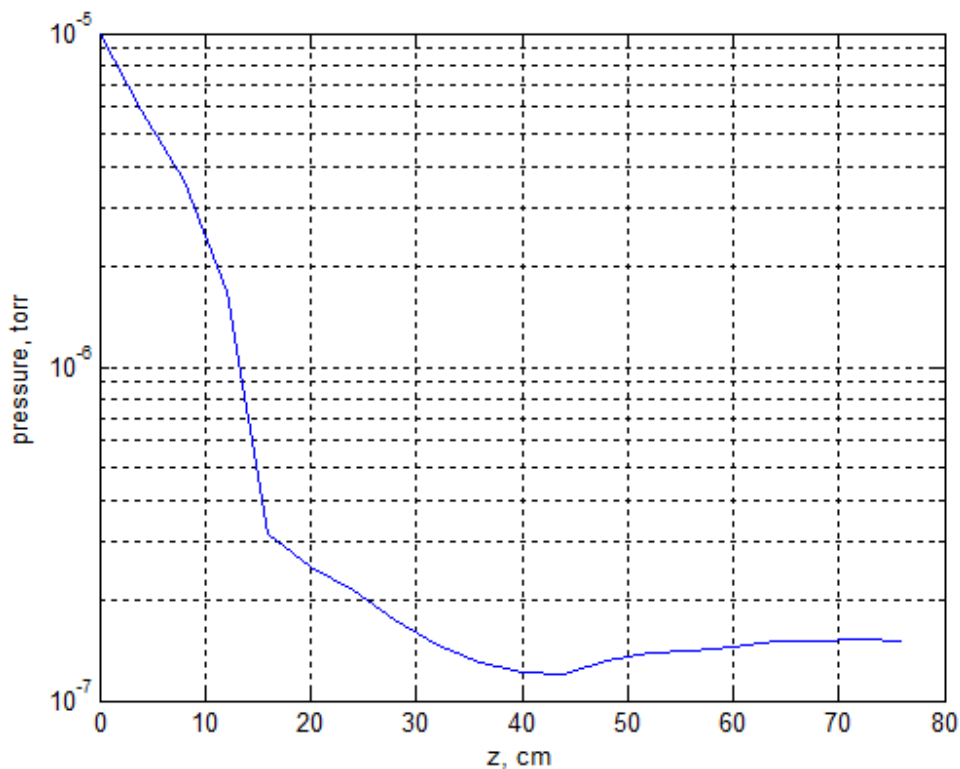


Рис.14. Распределение давления дейтерия вдоль камеры.

Выполненное моделирование показывает, что установление стационарного потока дейтерия в установке происходит за 500мс. Обычно для управляемых контроллеров массового расхода газа это время больше, поэтому можно считать, что время определяется контроллером. Для поддержания давления на уровне 10^{-5} торр необходим поток газа в лампу $2.5 \cdot 10^{-4}$ л·торр/сек (0.02 sccm).

Вакуумная камера имеет внутренний диаметр 100 мм, соответствующий каналу анализаторного тракта и длину 1000 мм. С одной стороны камеры устанавливается макет источника ионов, пучок из которого наклонен к оси на 5 градусов. На расстоянии 560 мм от источника установлен отклоняющий конденсатор. Предусмотрена отдельная выходная секция для контроля пучка. Эта секция оборудована вводом движения для измерения профиля интенсивности пучка вторично-эмиссионным умножителем, высоковольтный ввод для питания умножителя, низковольтные вводы для сигнала с умножителя. Вакуумная камера откачивается турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 100 л/с и без масляным форвакуумным насосом. Для определения газовых условий в установке во время работы проведено численное моделирование методом Монте-Карло. Моделирование проводилось с помощью программы CreatVac, разработанной в ИЯФ СО РАН.

7. Эксперименты

При исследованиях источника на эмиттер лампы подавалось напряжение +30В, на цилиндрическую сетку +180 В. Ток накала эмиттера составлял 4,45 А. Подача гелиевого газа в лампу производилась с помощью масс-флоу-контроллера MKS со скоростью 1,0 см³/мин, при этом в давление в камере составляло $3,1 \cdot 10^{-5}$ Тор.

Измеренные макетом детектора CS-I (ИТЭР работает с тритием, поэтому перед ФЭУ ставился сцинтиллятор цезий-йод – барьер для бета-активных частиц), измерения проводились специальными спектрометрическими детекторами, такие детекторы малочувствительны к фоновому излучению. Уже упоминалось, что работа предстоит на ИТЭР с тритием, что приводит к наличию гамма-излучению и нейтронного фона. Амплитудные спектры ионов гелия для различных энергий ионного пучка представлены на рисунке 15.

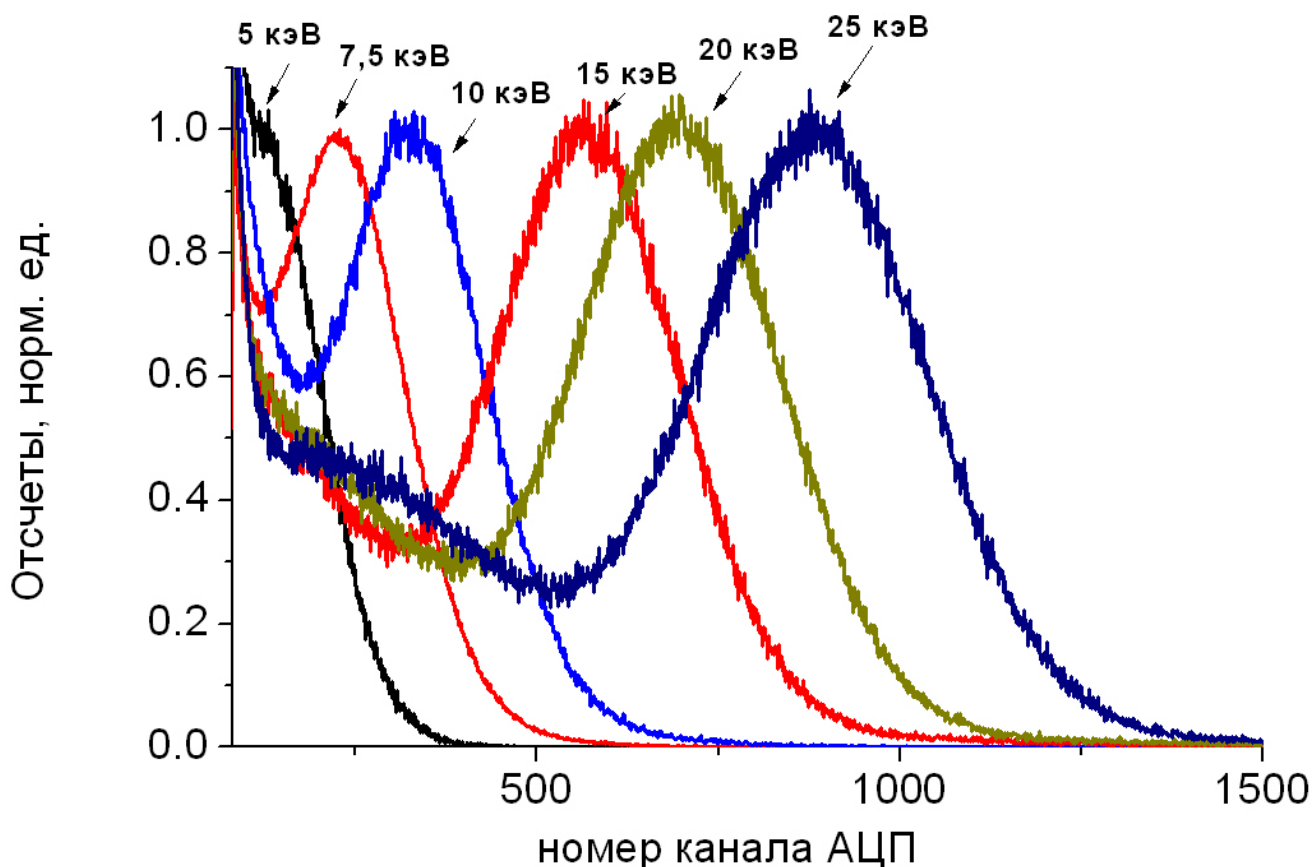


Рис.15. Амплитудные спектры сигналов ионов гелия, измеренные на выходе детектирующего узла для различных энергий ионного пучка.

Спектр энергии равной 10 кэВ удовлетворяет оптимальной энергии источника, для которой отношение интенсивностей в локальном минимуме и максимуме на

амплитудном спектре сигналов с детектора составляет величину 33 %. Результаты измерения параметров работы источника при оптимальной энергии представлены в Таблице 1.

Дата и время начала исследований	28.03.2017, 11:30
Напряжение на макете источника ионов гелия, кВ	5; 7,5; 10; 15; 20; 25
Ток накала катода, А	4,45
Напряжение на отклоняющем конденсаторе, В	300; 450; 600; 900; 1200; 1500
Давление в камере источника ионов без напуска газа, Тор	$5 \cdot 10^{-6}$
Поток газа гелия в источник ионов, см ³ /мин	1.0
Давление в камере источника ионов с напуском газа, Тор	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Отношение интенсивностей в локальном минимуме и максимуме на амплитудном спектре сигналов с детектора, %	33

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований макета источника ионов гелия для комплекса контроля качества обдирочной пленки анализаторов.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальная энергия пучка ионов гелия равна 15 кэВ. Снижение энергии ионов приводит к уменьшенным габаритным размерам и нагрузочным характеристикам.

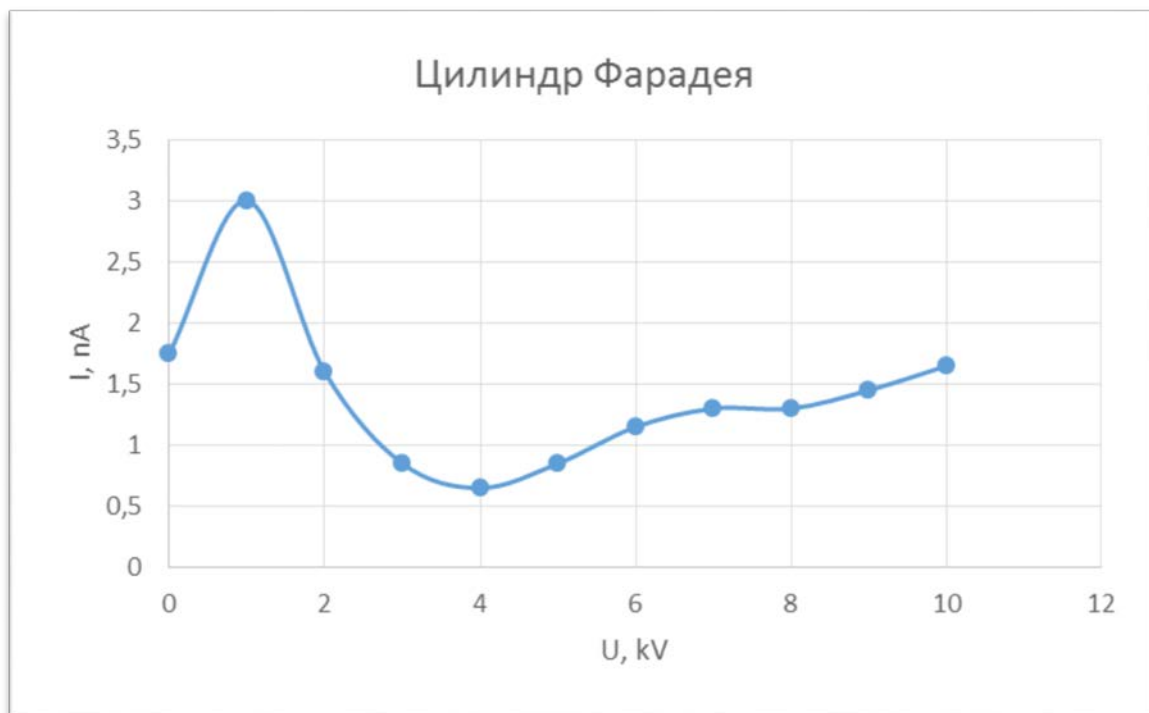


Рис.16. Ток ионов на цилиндр Фарадея до прохождения конденсатора.

8.Траектория пучка и его отклонение. Макет источника до 15 кэВ.

Модернизированный макет источника до 15 кэВ сконструирован подобно предыдущему (до 40 кэВ). Основное отличие нового стенда состоит в том, что источник с энергией ионов 40 кэВ присоединялся через специальную камеру диаметром 160мм, а модернизированный источник присоединяется через патрубок с внутренним диаметром 100 мм. Вакуумная камера имеет внутренний диаметр 100 мм, соответствующий каналу анализаторного тракта и длину 1000 мм. С одной стороны камеры расположен макет источника ионов, пучок из которого наклонен к оси на 5 градусов. На расстоянии 454 мм от источника установлен отклоняющий конденсатор, который является одним из важнейших элементов. При подаче на обкладки конденсатора напряжения пропорционально энергии ионов, пучок ионов гелия отклоняется в параллель вакуумного канала для анализаторов. Предусмотрена отдельная выходная секция для контроля пучка.

На рисунке 17 гистограмма отклонения пучка, присутствует дополнительное отклонение от нужного значения в 5 градусов при формировании за счет искривления

силовых линий в ускоряющем промежутке вследствие полу сферичности эмитирующего электрода. Для исправления наклона силовых линий на эмитирующем электроде может быть установлено корректирующее кольцо.

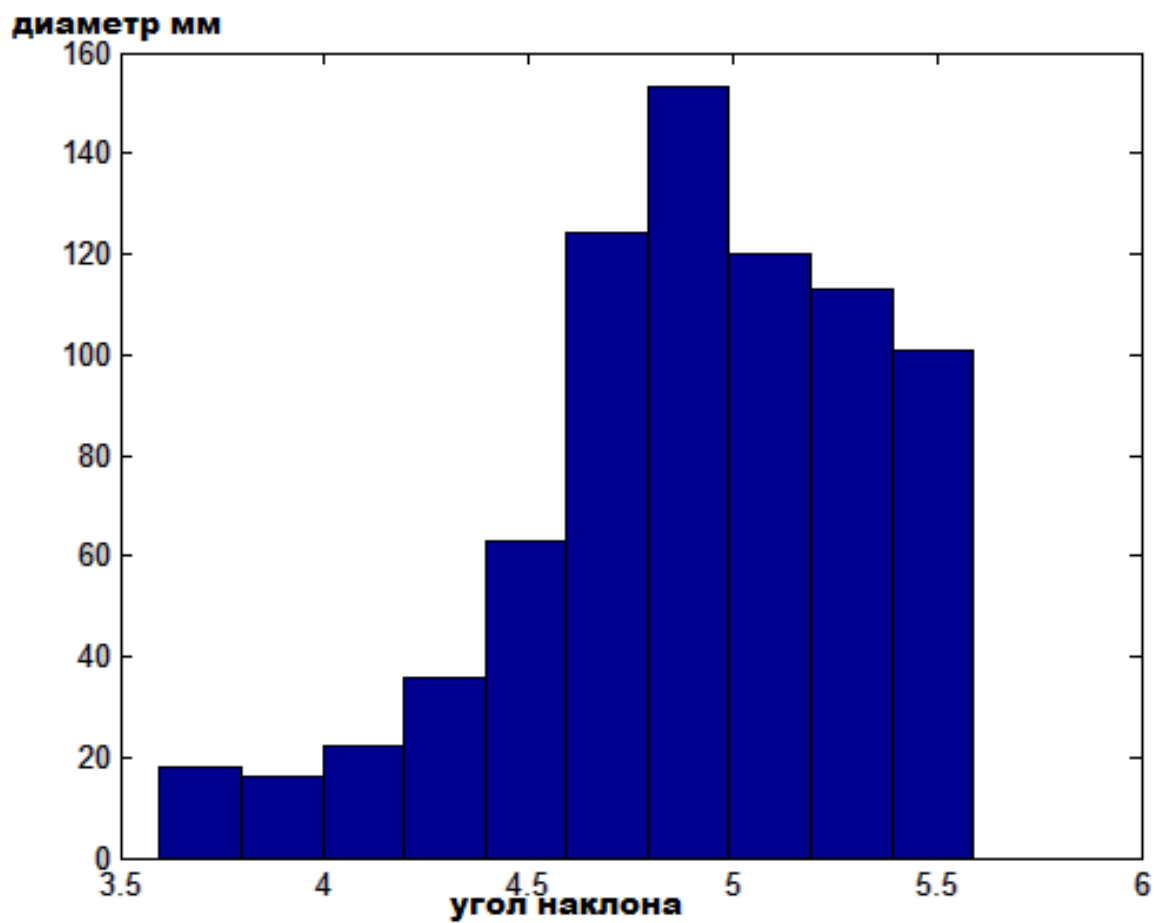


Рис.17. Гистограмма отклонения пучка.

Пучок от центра оси отклоняется к верхней стенке камеры.

9. Заключение

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования эффективности макета источника ионов гелия для комплекса контроля качества обдирочной пленки до 40 кэВ, выбрана оптимальная энергия модернизированного источника ионов гелия, и доработан макет источника с энергией до 15 кэВ.

Все задачи выполнены в соответствии с требованиями технического задания, удобная геометрия источника, надежные составляющие, простота работы.

Полученные результаты с экспериментальных стендов удовлетворяют потребностям и ожиданиям.

Разрабатываемый ионный источник может быть использован для контроля анализаторов атомов перезарядки больших экспериментальных термоядерных установок с магнитным удержанием.

Результаты работ находятся на высоком научно-техническом уровне и способствуют решению сложной научно-технической задачи – обеспечению работоспособности диагностики ИТЭР - анализаторы атомов перезарядки в течение длительного периода времени.

Список литературы

1. R.T.Bayard, D.Alpert, Rev. Sci. Instr.21, 571.
2. Юшкова К.И. Калибровочный протонный источник. 2015г. Квалификационная бакалаврская работа
3. Несеневич В.Г. Исследование особенностей применения диагностики по потокам атомов из плазмы в термоядерном реакторе ИТЭР. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург. 2016г.
4. У.Ланге. Манометры для измерения сверхвысокого вакуума. Phys. Today 26(8), 40(1972), стр.158.
5. Гасанов И.С. Плазменная и пучковая технология. Баку: Элм, 2007.
- 6.ITER Procurement Quality Requirements (ITER_D_22MFG4), URL:<https://user.iter.org/?uid=22MFG4>.
7. Физика и технология источников ионов.// Под ред. Я.Брауна: Пер с англ. –М.: Мир,1998, -496 с.
8. J.E.Boers, Proceeding of the IEEE Particle Accelerator Conference (American Physical Society, New York, 1995), p 2312.
9. H. Tawara, Y. Itikawa. Cross section and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions.