

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

**Физический факультет**

**Квалификационная работа на соискание  
степени бакалавра**

**Кафедра физики плазмы**

**Соколова Евгения Олеговна**

**Название работы:**

**Измерение профиля ионного пучка в ускорителе-тандеме с вакуумной  
изоляцией**

**Научный руководитель:**

**Касатов Дмитрий Александрович**

**Новосибирск – 2016 год**

## **Оглавление**

Введение.....	3
Описание установки.....	6
Ионный источник.....	7
Низкоэнергетический тракт.....	9
Входная вакуумная камера ускорителя.....	10
Сканер (измеритель профиля пучка).....	12
Теоретическая часть.....	14
Ион-электронная эмиссия.....	14
Термоэлектронная эмиссия.....	17
Результаты.....	18
Диагностика с использованием профилометра.....	18
Диагностика с использованием гамма-детектора.....	21
Выводы.....	25
Литература.....	26

## Введение

Вскоре после открытия нейтрона Джейсом Чедвиком в 1932 году и описания реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ , сделанного Тейлором и Гольдхабером в 1935 г., была сформулирована идея использования нейтронозахватных реакций для лечения онкологических заболеваний. Бор-нейтронозахватная терапия уникальна использованием высокой вероятности нерадиоактивного нуклида бор-10 поглощать тепловые нейтроны в ходе вышеупомянутой реакции. Вероятность поглощения ядром теплового нейтрона характеризуется сечением реакции, для изотопа  $^{10}\text{B}$  величина сечения составляет 3835 б. В ходе реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  выделяется энергия, равная 2,79 МэВ. В 93,9% случаев продуктами реакции являются  $\alpha$ -частица и возбужденное ядро  $\text{Li}$ , которое испускает  $\gamma$ -квант с энергией 0,48 МэВ, в 6,1% случаев образуется только ядро  $\text{Li}$  и  $\alpha$ -частица (рис. 1).

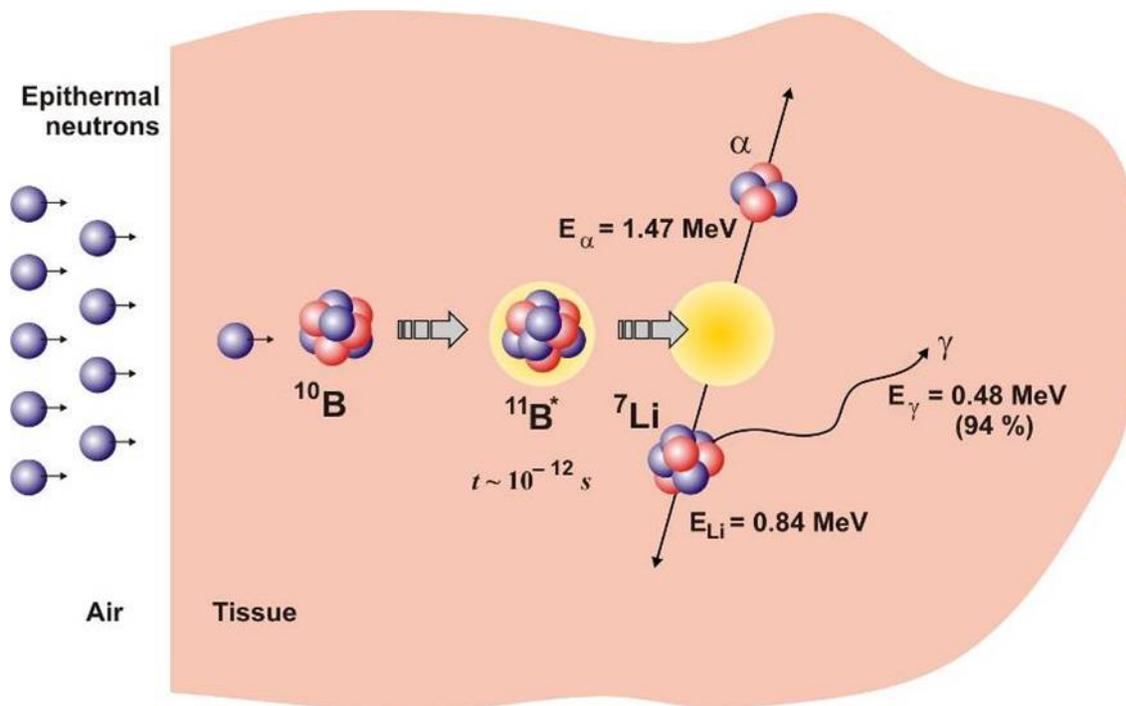


Рис. 1. Взаимодействие нейтрона с изотопом бора.

Одним из преимуществ использования бора в нейтронозахватной терапии является то, что продукты ядерной реакции:  $\text{Li}$  и  $\alpha$ -частица – быстро тормозятся, теряя свою энергию:  $150 \text{ кэВ} \cdot \mu\text{км}^{-1}$  и  $175 \text{ кэВ} \cdot \mu\text{км}^{-1}$  для ядра  $^7\text{Li}$  и  $\alpha$ -частицы соответственно [1]. Пробег этих частиц в воде

или тканях варьируется от 4,5 до 10 мкм, что сопоставимо с характерным размером клеток млекопитающих. Таким образом, избирательное накопление стабильного изотопа бора-10 в клетках опухоли и последующее облучение нейтронами позволят уничтожить больные клетки, избегая значительного поражения окружающих здоровых клеток.

До настоящего времени получение необходимого потока нейтронов было возможно только с использованием ядерных реакторов. По ряду причин реакторы являются нежелательными для применения в целях БНЗТ. Таким образом, на сегодняшний день возникает необходимость перехода к более компактному, безопасному и недорогому источнику тепловых нейтронов, которыми в перспективе являются ускорители.

После анализа результатов клинических испытаний данной методики были сформулированы основные требования к источникам нейтронов: мощность получаемой дозы должна быть не менее 1 Зв/мин, глубина воздействия не менее 8 см и терапевтическое отношение (отношение максимальной мощности доз в опухоли и в здоровых тканях) не менее 4[2].

В 1998 году в ИЯФ СО РАН был предложен проект уникального ускорительного источника тепловых нейтронов. В 2015 году на установке получен протонный ток 5 мА при энергии 2 МэВ в эксперименте, длившемся более часа [3], что практически удовлетворяет требованиям БНЗТ.

В силу ряда причин прохождение пучка на установке в большей или меньшей степени отличается от расчетного. Реальные условия делают необходимым непрерывный мониторинг параметров пучка, который позволит проводить коррекцию параметров ускорителя. Для оптимизации работы установки Тандем-БНЗТ следует контролировать пучок как в ходе его формирования, так и во время ускорения и сброса протонного пучка на литиевую мишень, поскольку выход нейтронов зависит от энергии и тока

протонного пучка. Величина протонного тока зависит от условий прохождения пучка через ускоритель, в особенности от начального этапа ускорения. Таким образом, одной из важнейших задач является измерение тока, профиля и положения ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя.

Для осуществления этих целей в измерениях в данной работе был использован специализированный вторично-эмиссионный сканер, позволяющий в реальном времени осуществлять мониторинг профиля ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя.

Также предложен и реализован способ измерения профиля протонного пучка по активации литиевой нейтроногенерирующей мишени.

## Описание установки

Принцип работы ускорительного источника эпитепловых нейтронов (рис. 2) заключается в следующем: стационарный пучок отрицательных ионов водорода, генерируемый ионным источником 1, инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. После перезарядки отрицательных ионов водорода в протоны в перезарядной газовой (аргоновой) мишени 2 на выходе из тандема формируется протонный пучок, ускоренный до энергии, соответствующей удвоенному потенциалу высоковольтного электрода 3. При сбросе ускоренного протонного пучка на литиевую мишень с охлаждаемой медной подложкой 4 в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  генерируется поток нейтронов.

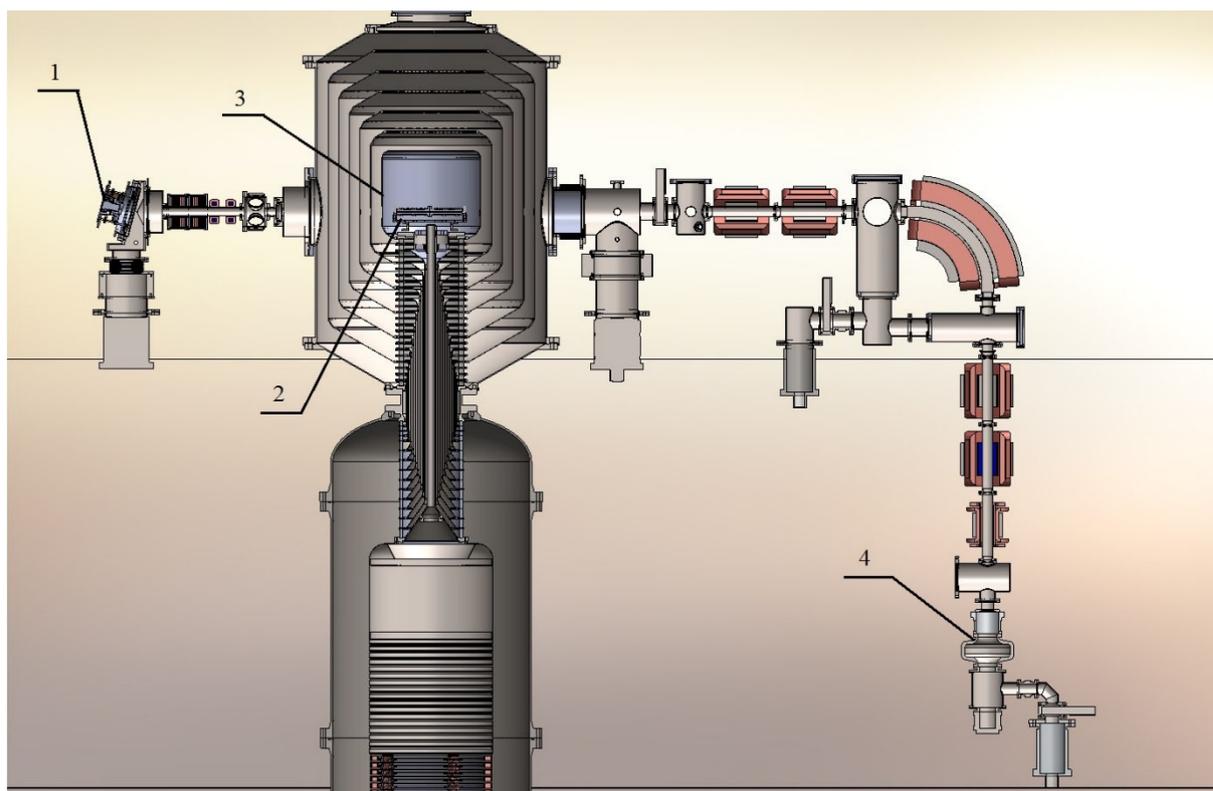


Рис. 2. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: 1 – ионный источник; 2 – газовая перезарядная мишень; 3 – высоковольтный электрод; 4 – нейтроногенерирующая мишень.

## Ионный источник

На установке для генерации пучка отрицательных ионов водорода используется ионный источник, позволяющий получать пучок с током до 6 мА и энергией 21 кэВ [4, 5]. Для получения ионов в источнике используется пеннинговский разряд, зажигаемый плазменной инжекцией с поверхности полого катода. Газоразрядная камера состоит из массивного цилиндрического анода, внутрь которого помещен катод. Пеннинговский разряд в водороде поддерживается электронными осцилляциями между выступами катода, направленными вдоль магнитного поля. Перпендикулярно магнитному полю объем пеннинговского разряда ограничен поверхностью анода. Расстояние между катодными выступами 8 мм, газоразрядная площадь в катоде, ограниченная анодным окном, 70 мм<sup>2</sup>, объем разряда около 0,5 см<sup>3</sup>.

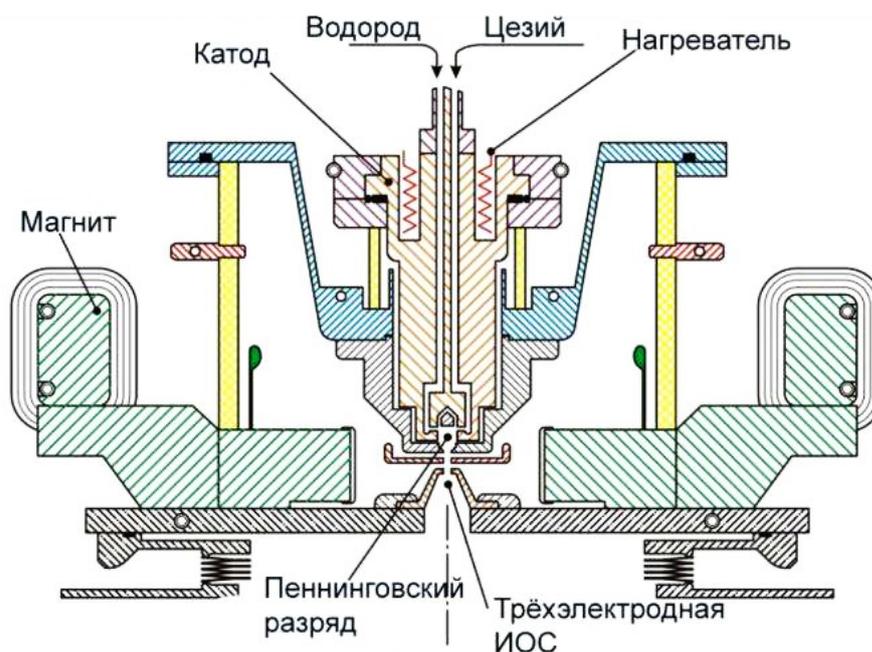


Рис. 3. Ионный источник.

Водород и цезий попадают в область пеннинговского разряда через плазму с поверхности полого катода. Цезий необходим для поддержания катодной дуги и для активации электродов пеннинговского разряда. Разряд при данной конфигурации катода происходит при меньшем давлении

водорода  $\sim 30$  мТорр и с менее значительными флуктуациями пучка в сравнении с классическим пеннинговским разрядом. Диафрагма катода сужает плазменный разряд в области, прилежащей к эмиссионной апертуре источника.

Отрицательные ионы, полученные с помощью поверхностно-плазменного механизма на разрядных электродах, вытягиваются через эмиссионную апертуру в центр анодного дна. Для вытягивания пучка используется ионно-оптическая система, с помощью которой впоследствии пучок ускоряется до энергии 21 кэВ. Анод имеет отрицательный заряд, в то время как конический ускоряющий электрод заземлен. Вытягивающее и ускоряющее напряжения соединены последовательно между анодом и ускоряющим электродом.

Магнитное поле в газоразрядной и вытягивающей области обеспечивается электромагнитом с током 15-18 А.

Приток водорода контролируется вручную и электромагнитным клапаном. Снабжение цезием осуществляется за счет нагревания внутри внешней печи, загруженной цезиевыми таблетками ( $\text{Cs}_2\text{CrO}_4+\text{Ti}$ ). Изменение мощности нагрева обеспечивает контроль притока цезия. Цезий и водород доставляются по каналам в катод, предварительно нагретый встроенным омическим нагревателем.

Для поддержания вакуума в ионном источнике и низкоэнергетическом тракте ускорителя используется дифференциальная система откачки, включающая турбомолекулярные насосы: Shimadzu tmp 3203 1м, Alcatel atp 900 – и форвакуумные насосы Edwards XDSi 35 (характеристики турбомолекулярных насосов приведены в табл. 1). Рабочее давление в источнике  $5 \cdot 10^{-3}$  Па.

Модель насоса	Alcatel atp 900	Shimadzu tmp 3203 lm
		
Скорость откачки (л/сек)		
Азот N <sub>2</sub>	900	3200
Водород H <sub>2</sub>	300	2400

Табл. 1. характеристики турбомолекулярных насосов.

### Низкоэнергетический тракт

На выходе из источника пучок поворачивается на 15° с помощью магнитного поля, создаваемого поворотным магнитом, далее фокусируется двумя магнитными линзами. Их преимущества в сравнении с альтернативными электростатическими линзами в том, что использование магнитных линз позволяет сохранить энергию пучка в процессе фокусировки, а так же обеспечивает полную компенсацию объемного заряда пучка за счет ионизации остаточного газа. Магнитные линзы более удобны в использовании, так как варьировать их положение можно без изменения конструкции канала. Каждая из линз формируется из 10 теплоотводящих алюминиевых дисков с 39 витками токовой обмотки сечением 2,8\*4 мм<sup>2</sup>. Линзы подключены к независимым источникам питания, что позволяет выставлять разный, в том числе и противоположный по знаку ток. Максимальное фокусирующее магнитное поле на оси линз достигает значения 2,1 кГс при токе 50 А. Дополнительно направление пучка поперек оси ускорителя регулируется магнитным корректором, состоящим из пары катушек, которые также подключены к разным источникам питания, что позволяет смещать пучок по горизонтали и вертикали. Угловое смещение, обеспечиваемое парой катушек, составляет 10 мрад/А.

## **Входная вакуумная камера ускорителя**

Так как в установке используется пучок отрицательно заряженных ионов водорода, в области формирования и инжекции пучка следует обеспечивать эффективную откачку молекулярного водорода, дабы избежать рекомбинации и сохранить качество пучка на должном уровне. Также из области перезарядки пучка во входную вакуумную камеру попадает аргон. Откачка из камеры осуществляется криосорбционным насосом On-Board 250F, скорость откачки которого по водороду составляет 3200 л/сек, по аргону 1800 л/сек.

Для ограничивания пучка и избавления от его гало в вакуумной камере располагается охлаждаемая диафрагма из нержавеющей стали с диаметром коллимационного отверстия 20 мм. Диафрагма также служит для разделения вакуумных объемов внутри камеры. Чтобы избежать паразитного тока, вызванного вторичной эмиссией и препятствующего корректному прохождению первоначального пучка, за диафрагмой установлена сетка под запирающим потенциалом.

Вакуумная камера примыкает к ускорительным электродам. Напряжение, подаваемое на электроды-экраны и высоковольтный электрод, задается с помощью каскадного генератора промышленного ускорителя серии ЭЛВ, созданного и выпускаемого в ИЯФ СО РАН [6]. Напряжение на электроды подается через проходной изолятор [7], достоинство которого заключается в том, что он удален от области ускорения и прохождения пучка, благодаря чему удается избежать попадания рассеянных заряженных частиц на поверхность изолятора и предотвратить пробой его вакуумной среды. Напряжение на высоковольтном электроде 1 МВ. Таким образом, ионный пучок ускоряется электромагнитным полем, создаваемым распределением потенциалов между диафрагмой и первым электродом. В области первого электрода создается мощная электростатическая линза (рис. 4), также

ускоряющее поле вываливается в коллиматор диафрагмы. Если вследствие этого эффекта пучок будет перефокусироваться таким образом, что станет сильно расходящимся, будет наблюдаться заметное увеличение эмиттанса. Но более неприятно, что значительную часть пучка мы просто потеряем, поскольку она не попадет в зазор промежуточных электродов ускорителя, осев на их поверхности, что в свою очередь приведет к перераспределению напряжения на электродах и, как следствие, к пробое.

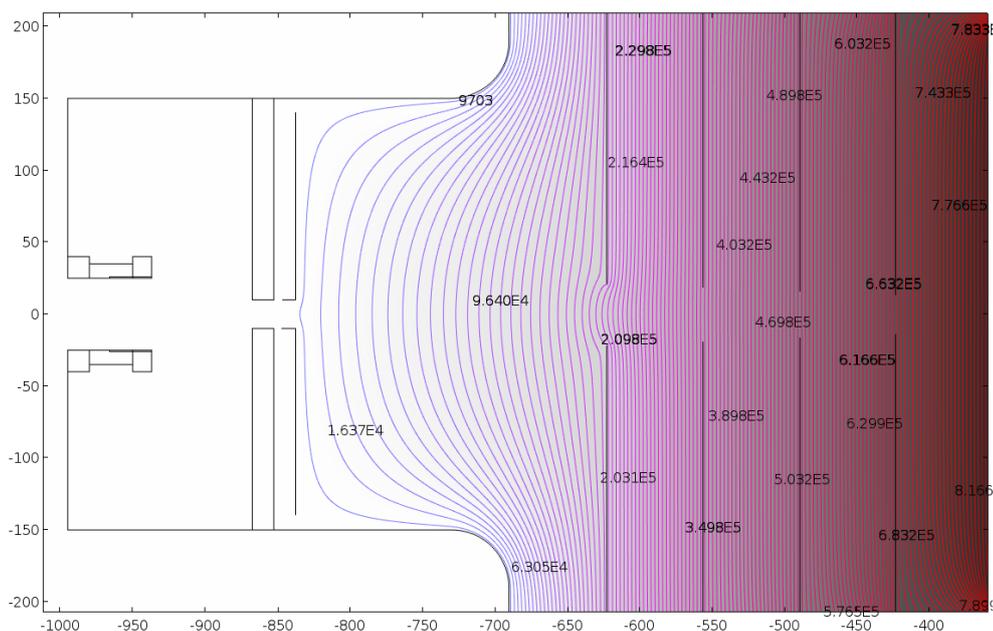


Рис. 4. Расчетное распределение полей внутри вакуумной камеры на входе в ускоритель.

Чтобы учесть вышеописанные эффекты, необходимо тщательно диагностировать профиль пучка, дабы провести его в ускорительный канал с наименьшими потерями. Для этих целей было предложено установить специализированный профилометр во входной вакуумной камере ускорителя, в области перед диафрагмой. Для этого в конструкцию камеры были внесены необходимые изменения, позволившие установить профилометр с возможностью юстировки его положения. Модернизированная камера с установленным в ней сканером изображена на рис. 5.

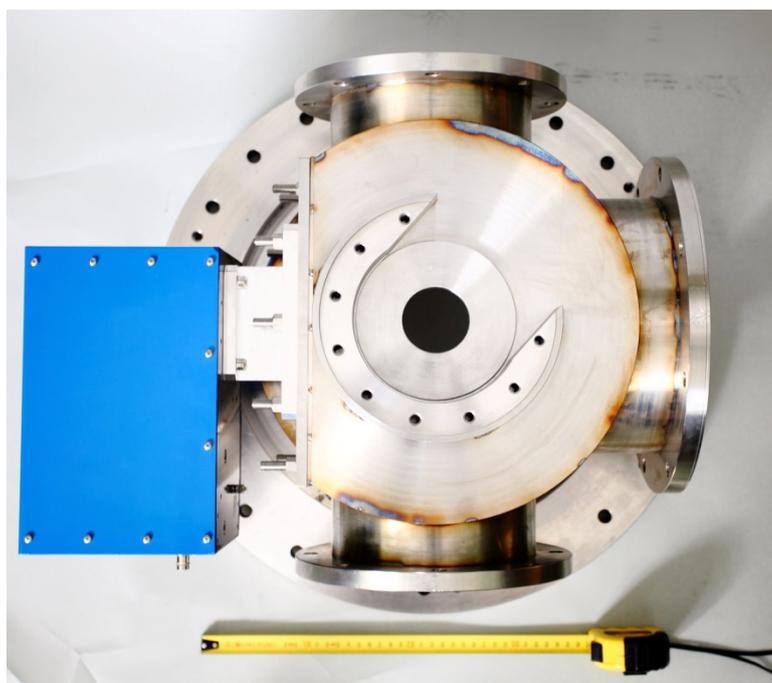


Рис. 5. Входная камера ускорителя.

### Сканер (измеритель профиля пучка)

Для измерения профиля ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя используется профилометр модели OWS-30 (по лицензии научной организации TRIUMF, Канада). В таблице 2 приведены основные характеристики профилометра, на рисунке 6 изображен его чертеж.

Максимальный диаметр пучка	30 мм
Максимальная интенсивность	1 Вт/мм <sup>2</sup>
Диапазон измерения тока	2 нА – 20 мА
Энергия пучка	< 1МэВ

Табл. 2. Характеристики профилометра.

Проволочный сканер предназначен для профилей низкоэнергетических (< 1 МэВ) пучков заряженных частиц с диаметром менее 30 мм.

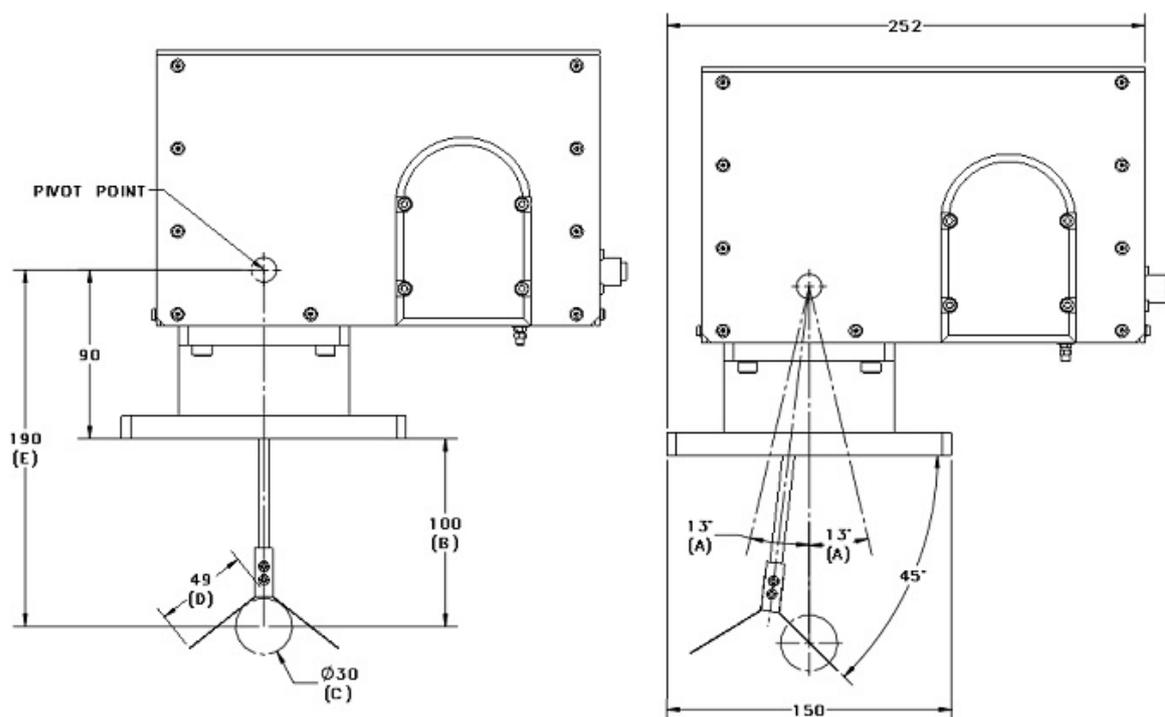


Рис. 6. Чертеж профилометра.

Стержень со съёмными вольфрамовыми проволочками диаметром 0,5 мм каждая осциллирует поперек пучка по дуге с угловым разбросом в  $\pm 13,5^\circ$ . Каждая проволочка проходит через центр пучка под углом в  $45^\circ$  по отношению к посадочному фланцу. Для измерения тока перехваченного пучка используется высокочувствительный амперметр, фиксирующий ток в настраиваемом диапазоне. Скорость сканирования устанавливается с помощью контроллера через управляющий ПК. Расположение профилометра регулируется линейным потенциометром.

С помощью программного обеспечения профилометра на экран компьютера в режиме реального времени выводится 2D распределение амплитуды тока, это позволяет настраивать и центрировать пучок. Один период осцилляции осуществляется за двойное прохождение стержней сквозь пучок. Сканер также может работать в непрерывном режиме.

## Теоретическая часть

Для корректного трактования показаний профилометра следует учитывать физические явления, лежащие в основе его измерений. Ниже описаны эффекты, возникающие при взаимодействии ионного пучка с проволочками профилометра.

### Ион-электронная эмиссия

Вторичная электронная эмиссия является следствием процессов, происходящих в твердом теле при его взаимодействии с первичными высокоэнергичными заряженными частицами. Частицы пучка передают часть своей энергии электронам бомбардируемого вещества, таким образом выбивая вторичные электроны, возбуждая плазменные колебания или осуществляя взаимодействия с кристаллической решеткой.

В зависимости от энергии вторичные электроны делятся на три группы [8]:

- Медленные электроны с энергией до 50 эВ, выбиваемые из валентной зоны или зоны проводимости.
- Быстрые электроны, выбиваемые из внутренних оболочек атомов. Вероятность выбивания этих электронов сравнительно мала.
- Оже-электроны с энергией до 10 эВ. Эффект Оже проходит в два этапа: сначала происходит выбивание электрона, затем образуется вакансия, которую электронная подсистема пытается компенсировать в том числе и путем выбивания еще одного электрона.

Основной характеристикой процесса является коэффициент вторичной эмиссии  $\delta$ , определенный как отношение числа  $N_2$  всех электронов, испускаемых за время  $t$  с поверхности бомбардируемого

вещества, к числу  $N_1$  первичных электронов, попадающих за то же время  $t$  на поверхность, или как отношение вторичного и первичного токов:

$$\delta = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Вторичная эмиссия достаточно сложный процесс, который требует адаптации с приемлемой точностью к реальной жизни, например для разработки датчиков пучка. Упрощенное описание базируется на следующих допущениях: количество вторичных электронов пропорционально потере энергии  $dE/dx$  первичной частицы на единицу длины пробега в веществе, характеристикой вторичных электронов является средняя длина пробега в веществе. Таким образом, коэффициент вторичной эмиссии записывается как:

$$\delta = \left( \frac{dE}{dx} \right) \frac{\Delta x}{\varepsilon \cos \theta},$$

где  $\varepsilon$  – энергия, необходимая для выбивания электрона;  $\Delta x$  – толщина поверхностного слоя, с которого происходит эмиссия;  $\theta$  – угол падения пучка первичных частиц. Энергия вторичных частиц крайне мала по сравнению с энергией первичных частиц, учитывая это, можно считать  $\varepsilon$  и  $\Delta x$  независимыми от  $E$ .

Удельная потеря энергии  $dE/dx$  описывается формулой Бете-Блоха, выведенной для тяжелых частиц (ионов и протонов):

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi E_e r_e^2 \frac{n_e Z_0^2}{\beta^2} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{2E_e \gamma^2 \beta^2 E_{max}}{I^2} - \beta^2 \right),$$

где  $E_e = m_e c^2 \approx 0,51$  МэВ – энергия покоя электрона;  $n_e = \rho N_A Z/A$  – плотность электронов в веществе ( $N_A$  – число Авогадро,  $Z$  – зарядовое число,  $A$  – атомная масса,  $\rho$  – плотность);  $Z_0$  – заряд частиц пучка;  $r_e = 2,818 \times 10^{-15}$  м – классический радиус электрона;  $I \approx 13,6 \cdot Z$  эВ –

средний потенциал ионизации;  $E_{max}$  – максимальная энергия, которую первичная частица может передать электрону вещества:

$$E_{max} = \frac{2E_e\beta^2 E^2}{E_0^2 + E_e^2 + 2E_e E'}$$

где  $E = \gamma E_0$  – полная энергия частиц пучка. Для тяжелых частиц (протонов и ионов)  $E_{max} = 2E_e\beta^2\gamma^2$ .

На рис. 7 приведена полученная экспериментально зависимость коэффициента вторичной эмиссии от зарядового числа для двух значений энергий первичных частиц [9].

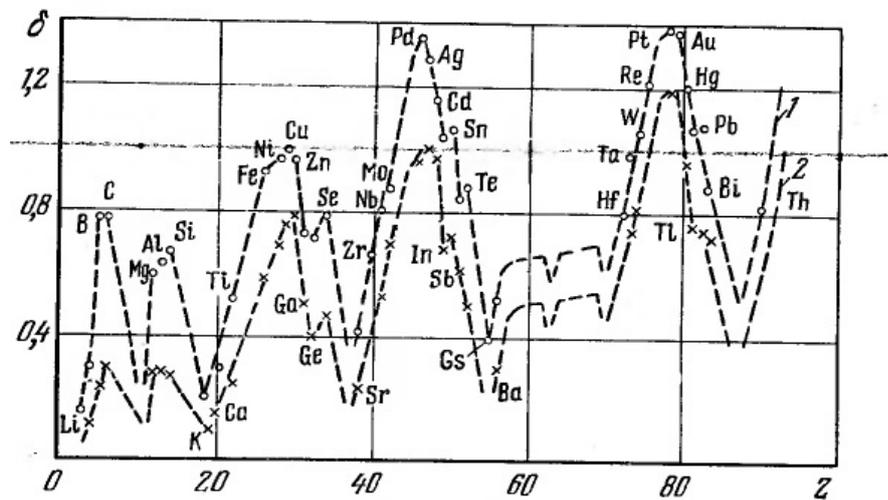


Рис. 7.  $\delta(Z)$  при энергии первичных частиц: 1 –  $E=0,5$  кэВ, 2 –  $E=2$  кэВ.

При очень низких энергиях частицы пучка практически полностью теряют свою энергию в поверхностном слое вещества, благодаря чему осуществление вторичной эмиссии наиболее вероятно. С ростом энергии первичные частицы глубже проникают в вещество, а коэффициент вторичной эмиссии падает пропорционально  $1/\beta^2$ . При дальнейшем увеличении энергии пучка в веществе происходят процессы многократного рассеяния, и  $\delta$  медленно растет.

Коэффициент вторичной эмиссии для ионного пучка с энергией 20 кэВ, взаимодействующего с вольфрамовыми проволочками, равен 0,015. Коэффициент оценен по вышеприведенной формуле.

### **Термоэлектронная эмиссия**

При нагревании проводящих тел с их поверхности происходит испускание электронов, это явление носит название термоэлектронной эмиссии.

В основе явления термоэмиссии лежит эффект попадания в вакуум электронов проводимости с энергией выше уровня вакуума. Для электронов проводимости твердое тело представляется в виде энергетической потенциальной ямы с потенциальным барьером на границе раздела сред (твердое тело – вакуум). При отличной от нуля температуре существуют электроны с энергией выше уровня вакуума, они способны преодолевать потенциальный барьер и попадать в вакуум.

Вероятность испускания электронов в вакуум характеризуется термоэлектронной работой выхода  $\varphi$ , являющейся разностью энергий уровня вакуума и уровня Ферми для электрона проводимости.

Для прямоугольного потенциального барьера максимальная плотность тока  $j$  (тока насыщения) термоэлектронной эмиссии описывается формулой Ричардсона – Дешмана:

$$j = A_0(1 - \bar{R})T^2 e^{-\frac{\varphi}{kT}},$$

где  $A_0 = 4\pi me^2/h^3 = 120,4 \text{ А/см}^2\text{К}^2$  – термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда;  $T$  – термодинамическая температура по шкале Кельвина (К);  $\bar{R}$  – усредненное по спектру термоэлектронов значение коэффициента отражения электронов от потенциального барьера;  $\varphi$  – работа выхода электронов;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$  –

постоянная Больцмана. На рис. 8 приведена зависимость тока термоэлектронной эмиссии от работы выхода и температуры.

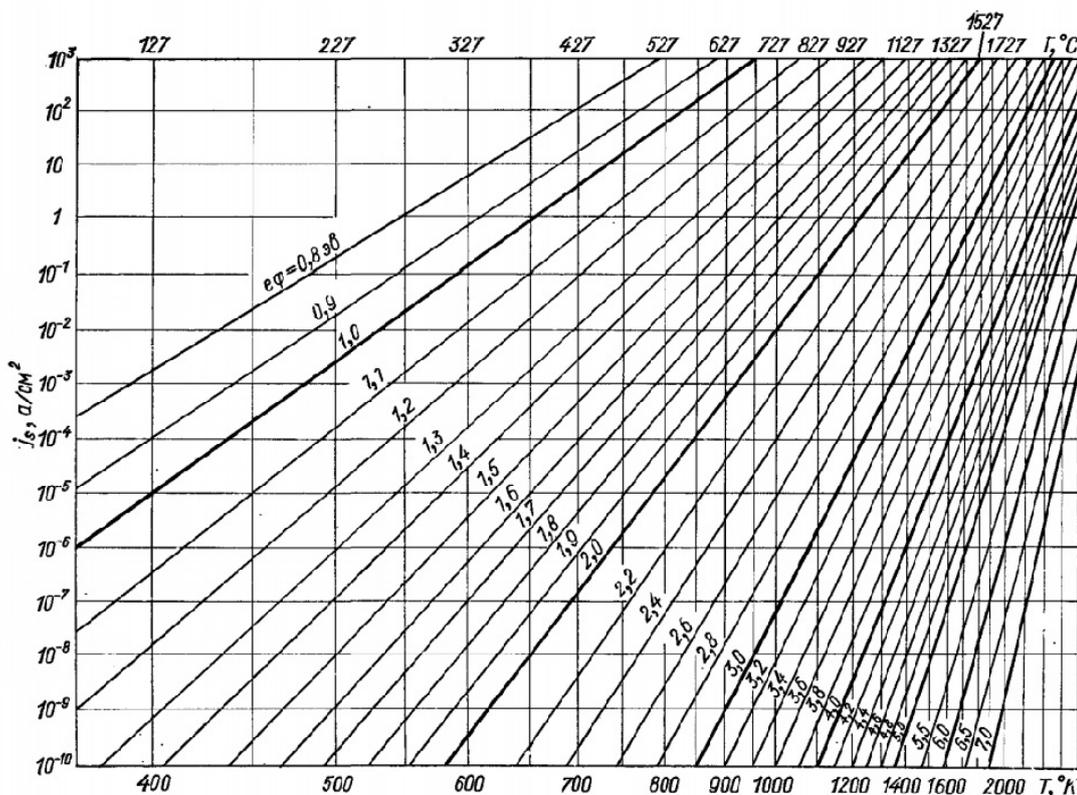


Рис. 8. Зависимость тока термоэмиссионной эмиссии.

Оценка максимальной температуры вольфрамовых проволочек при токе 5 мА дает величину порядка 1000 К. При такой температуре термоэмиссия весьма незначительна – порядка  $10^{-18}$  А.

## Результаты

### Диагностика с использованием профилометра

Были проведены эксперименты по измерению профиля ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя при различных режимах фокусировки и тока пучка.

В стандартном режиме фокусировки пучка на линзы подается ток 54 А, на корректор 2,4 А. Результаты экспериментов в режиме “малого” и “большого” токов приведены на рисунках 9, 10, где введены обозначения:

$U_{\text{выт}}$  – вытягивающее напряжение,  $U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение,  $I_{\text{маг}}$  – ток, подающийся на магнит, в условных единицах,  $I_{\text{лин}}$  – ток на линзах.

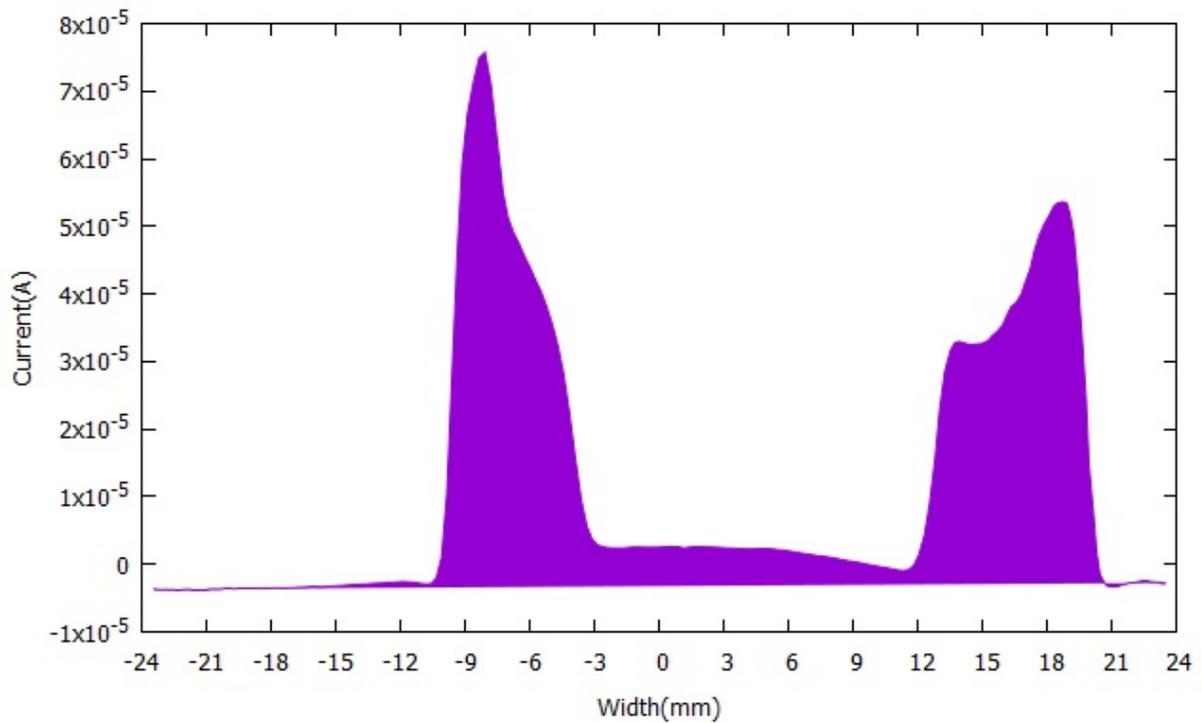


Рис. 9. Показания профилометра ( $U_{\text{выт}}=1\text{кВ}$ ,  $U_{\text{уск}}=20\text{кВ}$ ,  $I_{\text{маг}}=500$ ,  $I_{\text{лин}}=54\text{А}$ ).

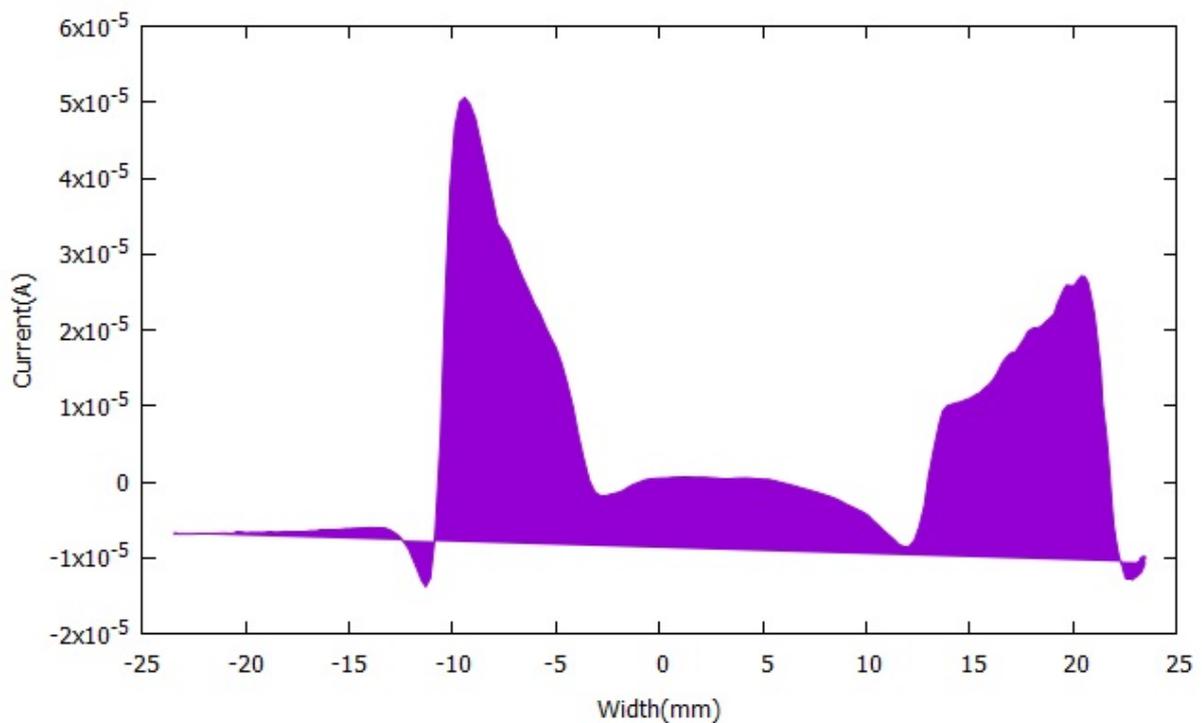


Рис. 10. Показания профилометра ( $U_{\text{выт}}=1,8\text{кВ}$ ,  $U_{\text{уск}}=20\text{кВ}$ ,  $I_{\text{маг}}=800$ ,  $I_{\text{лин}}=54\text{А}$ ).

Также были проведены эксперименты со внесением внешнего магнитного поля, обеспечиваемого сильным магнитом (рис.11). На верхней строке слева направо представлены результаты ввода поля  $H_x$ , отклоняющего пучок вниз и вверх относительно оси профилометра соответственно. На нижней строке – результаты экспериментов с полем  $H_y$ , отклоняющим пучок влево и вправо соответственно.

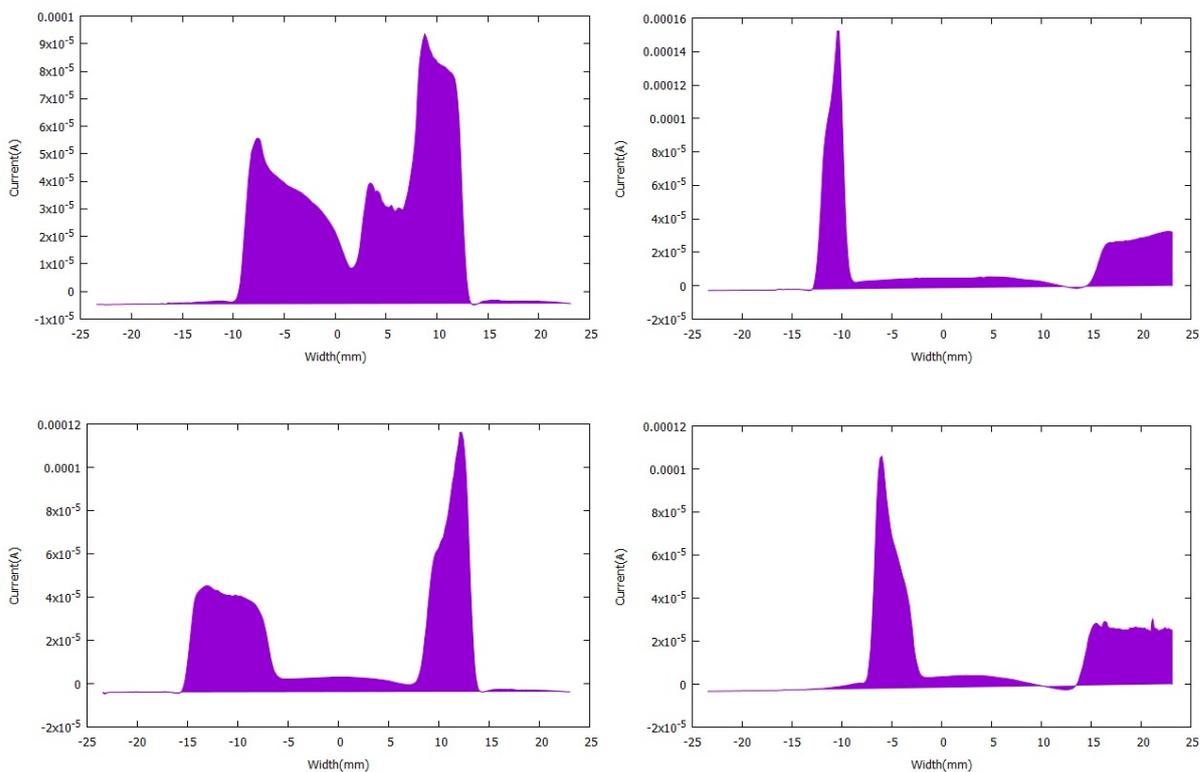


Рис. 11. Показания профилометра в присутствии внешнего магнитного поля.

С использованием полученных экспериментальных данных и допущением о нормальном распределении реального пучка был восстановлен приблизительный профиль, изображенный на рис. 12. Точка [0;0] на рисунке соответствует центральному положению сканирующих проволочек.

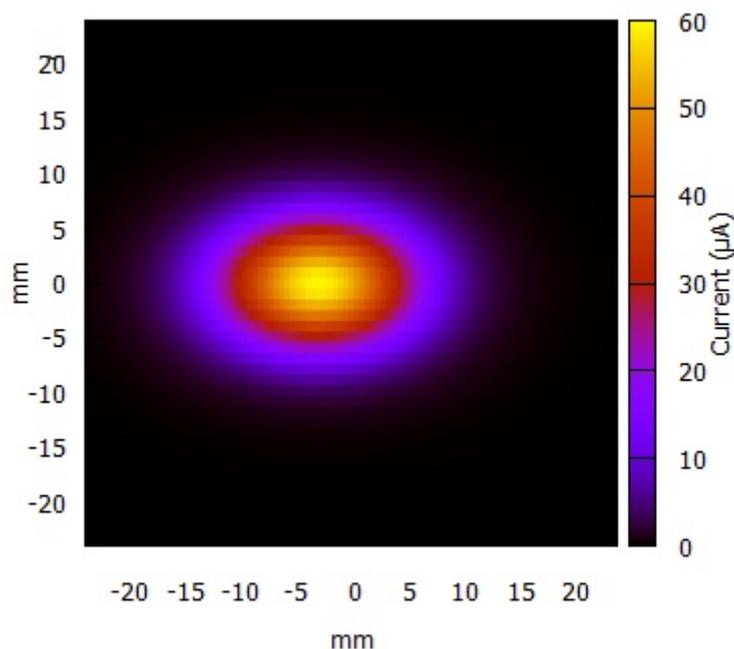


Рис. 12. Профиль ионного пучка ( $U_{\text{выт}}=1\text{кВ}$ ,  $U_{\text{уск}}=20\text{кВ}$ ,  $I_{\text{маг}}=500$ ,  $I_{\text{лин}}=54\text{А}$ ).

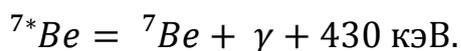
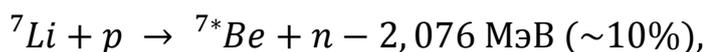
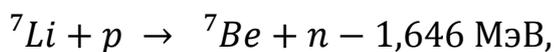
В ходе экспериментов было обнаружено, что пучок в низкоэнергетическом тракте имеет форму эллипса с длинами большой и малой оси 15 и 10 мм соответственно при стандартной фокусировке пучка ( $I_{\text{лин}}=54\text{А}$ ). Смещение относительно оси профилометра составило 3 мм.

### Диагностика с использованием гамма-детектора

Пространственное распределение ускоренного протонного пучка было также измерено непосредственно при попадании на литиевую нейтроногенерирующую мишень. Вследствие взаимодействия протонов и лития на мишени происходит накопление радиоактивного изотопа

бериллия. Отследив области накопления бериллия, удалось восстановить профиль пучка.

При неупругом рассеянии 2 МэВ пучка протонов на ядрах лития генерируются нейтроны согласно реакциям [10]:



Процесс неупругого рассеяния характеризуется резонансными энергиями 1,05; 2,05; 2,25 МэВ близкими к пороговой реакции генерации нейтронов 1,882 МэВ. Поток гамма-квантов с энергией 0,478 МэВ, рожденных в ходе реакции, сравним с потоком генерируемых нейтронов. Тонкий слой лития, нанесенный на медную подложку, позволяет снизить поток гамма-квантов. Толщина слоя лития определяется длиной пробега протона, на которой он тормозится до энергии 1,882 МэВ – пороговой энергии генерации нейтронов. С помощью специально разработанной системы происходит напыление литиевого слоя (толщиной порядка 50 мкм) на медную подложку. Развертка пучка по нейтроногенерирующей мишени осуществляется с помощью однородного магнитного поля с напряженностью до 500 Гс на длине ~ 20 см.

После проведения эксперимента в мишени накапливается радиоактивный изотоп  ${}^7\text{Be}$ , период полураспада которого составляет 53,6 суток. Отслеживание гамма-квантов с энергией 0,477 МэВ, испускаемых при распаде бериллия, может служить альтернативным способом измерения профиля протонного пучка в ускорительном тракте. Для осуществления такого рода диагностики использовался гамма-спектрометрический комплекс, состоящий из сцинтилляционного NaI-

детектора, предварительно откалиброванного по энергии, и свинцовой защиты с коллимационным отверстием 8 мм.

При проникновении ионизирующих частиц в сцинтилляторное вещество (монокристалл йодистого натрия, активированный таллием) возникает вспышка люминесценции, преобразуемая в импульс электрического тока фотоэлектронным умножителем и регистрируемая электронной системой.

Программное обеспечение детектора позволяет наблюдать за набором спектра в реальном времени. После выделения диапазона каналов, соответствующих линии полного поглощения бериллия (477 кэВ), проводился набор статистики в течение фиксированного времени (100 сек). Подложка литиевой нейтроногенерирующей мишени перемещалась непосредственно перед коллимационным отверстием от центра мишени (соответствует точки [0;0] на рисунке 13) с шагом 1 см, таким образом определялась скорость счета в линии полного поглощения. Распределение интенсивностей высвечивания на поверхности мишени, определенных как отношение количества фиксируемых событий ко времени набора статистики, представлено на рис. 13.

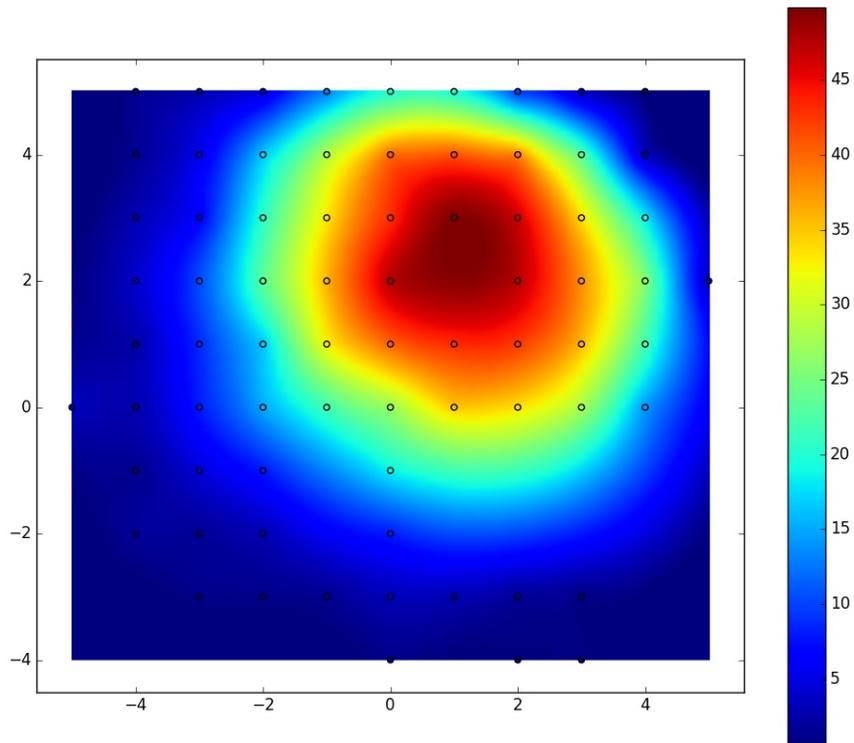


Рис. 13. Поперечный профиль пучка, регистрируемый на мишени.

Как следует из полученного распределения, протонный пучок на поверхности мишени имеет форму круга с диаметром 20 мм. Это результат хорошо согласуется с результатом численного расчета, в котором фокусирующим элементом является поворотный магнит в тракте транспортировки протонного пучка.

## **Выводы**

В Институте ядерной физики СО РАН для развития методики бор-нейтронозахватной терапии ведутся исследования по получению сильноточного протонного пучка в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.

Для осуществления диагностики ионного пучка в низкоэнергетическом тракте ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией был установлен вторично-эмиссионный датчик модели OWS-30. Для установки профилометра потребовалась модернизация входной вакуумной камеры ускорителя, необходимые изменения были успешно внедрены.

В ходе данной работы были исследованы явления, позволяющие регистрировать ток с помощью профилометра.

Эксперименты с профилометром были проведены при различных условиях фокусировки пучка и разном токе, таким образом, наглядно было обнаружено влияние магнитной оптической системы на пучок. Впервые было установлено, что пучок в низкоэнергетическом тракте имеет форму эллипса. Определены размеры пучка и его положение. С помощью полученных экспериментальных данных был восстановлен профиль ионного пучка.

Также в работе представлены результаты инновационной диагностики, выполненной на гамма-спектрометрическом комплексе. Пространственное распределение радиоактивного изотопа бериллий-7, наработанного в ходе нейтроногенерирующей реакции, в литиевом слое мишени определено гамма-детектором NaI путем сканирования. Результатом этой диагностики стало восстановление профиля пучка на мишени, определение его формы и характерного размера.

## Литература

1. Sauerwein, W.A.G., Wittig, A., Moss, R., Nakagawa, Y. Neutron Capture Therapy. Principles and Applications. – Springer, (2012).
2. Таскаев С. Ю. Ускорительный источник эпитепловых нейтронов. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.08. – Новосибирск, 2014.
3. I. Shchudlo<sup>†</sup>, S. Taskaev, D. Kasatov, V. Dokutovich, A. Makarov, I. Sorokin, Ya. Kolesnikov, E. Sokolova, A. Kuznetsov, Yu. Ostreinov, Budker Institute of Nuclear physics SB RAS, Novosibirsk, 2016.
4. Y. Belchenko, E. Grigoryev. Surface-plasma negative ion source for the medicine accelerator. Review of Scientific Instruments 73 (2002).
5. Yu. Belchenko, A. Sanin, I. Gusev, et al. Direct current H<sup>-</sup> source for boron neutron capture therapy tandem accelerator. Review of Scientific Instruments 79 (2008).
6. М.Е. Вейс, С.Н. Фадеев., Н.К. Куксанов, П.И. Немытов, В.В. Прудников, Р.А. Салимов, С.Ю. Таскаев, Стабилизация ускоряющего напряжения в высоковольтном ускорителе-тандеме для нейтронозахватной терапии. Препринт ИЯФ 2002-17. – Новосибирск. – 2002.
7. Сорокин И. Н. Высоковольтная прочность ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. Дис. ... к.т.н.: 01.04.01. – Новосибирск, 2014.
8. В.В. Смалюк. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Параллель, Новосибирск, 2009.
9. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторично-эмиссионные свойства металлов и полупроводников и периодическая система элементов. ФТТ 3, № 10.
10. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976.