

МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное агентство  
по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

физический факультет

Квалификационная работа на соискание  
степени бакалавра  
Кафедра физики плазмы

Попова Наталья Евгеньевна

Название работы  
Экспериментальное моделирование взаимодействия 1МэВ пучка  $H^+$  с обдирочной мишенью

Научный руководитель:  
А.С.Кривенко

Новосибирск – 2006 год

## Оглавление

Аннотация

### 1. Введение

1.1. Ускоритель протонов для БНЗТ

1.2. Обдирочная мишень

1.3. Мишень с рециркуляцией

1.3. Взаимодействие ионного пучка с молекулами газа обдирочной мишени

1.4. Возможность моделирования обдирочной мишени на стенде

### 2. Описание эксперимента

2.1. Испытательный стенд

2.1.1. Вакуумная камера с вакуумметрами

2.1.2. Система вакуумной откачки

2.1.3. Газовая система

2.2. Источник электронов

2.2.1. Оценка параметров и расчет расходимости пучка

2.2.2. Конструирование источника электронов

### 3. Экспериментальная часть

3.1. Моделирование дифференциальной откачки обдирочной мишени

3.2. Измерение параметров плазмы

### 4. Заключение

Список использованной литературы

## Аннотация

Для лечения некоторых видов опухолей можно эффективно использовать нейтронные пучки. Одним из наиболее перспективных методов является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ).

В настоящий момент институт ядерной физики им. Г.И.Будкера разрабатывает электростатический ускоритель-тандем для получения направленного пучка тепловых нейтронов. Важной частью ускорителя является обдирочная мишень, преобразующая пучок отрицательных ионов водорода в пучок протонов. В результате ионизации обдирочного газа частицами пучка в мишени образуется плазма. Заряженные частицы и ультрафиолет из обдирочной трубки попадают в высоковольтные зазоры ускорителя и оседают на изоляторы, что уменьшает электрическую стойкость и может привести к пробое. Необходимо минимизировать поток вторичных заряженных частиц и ультрафиолета из обдирочной трубки для сохранения электрической прочности вакуумных зазоров и изоляторов. Для понижения давления в высоковольтных зазорах была предусмотрена система с рециркуляцией и дифференциальной откачкой.

Одной из задач данной работы является проведение экспериментов по оптимизации газовых условий в обдирочной мишени. Так как результатом обдирки Н<sup>-</sup> на атомах мишенного газа является появление двух электронов и протона, то необходимо рассмотреть взаимодействие этих частиц с обдирочной мишенью. Для этого на стенде будет изучено взаимодействие электронного пучка с газом мишени.

В работе представлены результаты моделирования дифференциальной откачки на стенде с использованием трубок-сопротивлений различной длины. Получено существенное улучшение вакуума в основном объеме стенда с включенной дифференциальной откачкой.

Для моделирования взаимодействия частиц с мишенными атомами, был создан источник электронов с током пучка до 40 мА и энергией 500 эВ. Произведен расчет расходимости пучка электронов, для выбранной анодной сетки.

Сделаны предварительные оценки параметров плазмы, получаемой в обдирочной трубке на стенде. Разработана схема с двойным ленгмюровским зондом для измерения распределения плотности плазмы мишени в присутствии электронного пучка.

# 1. Введение

## 1.1. Ускоритель протонов для БНЗТ

В настоящий момент для лечения злокачественных опухолей применяются химио- и лучевая терапия. Терапевтический эффект достигается за счет того, что клетки опухоли менее устойчивы к выбранному воздействию.

Для лечения некоторых видов опухолей наиболее эффективно использование нейтронных пучков. Одним из наиболее перспективных методов является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ).

Перед облучением пациент принимает препарат, содержащий изотоп бора  $^{10}\text{B}$ , который накапливается в опухолевых клетках в 3-5 раза эффективнее, чем в здоровых. Так как бор имеет наибольшее сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами, большая часть потока поглощается внутри опухолевых клеток.

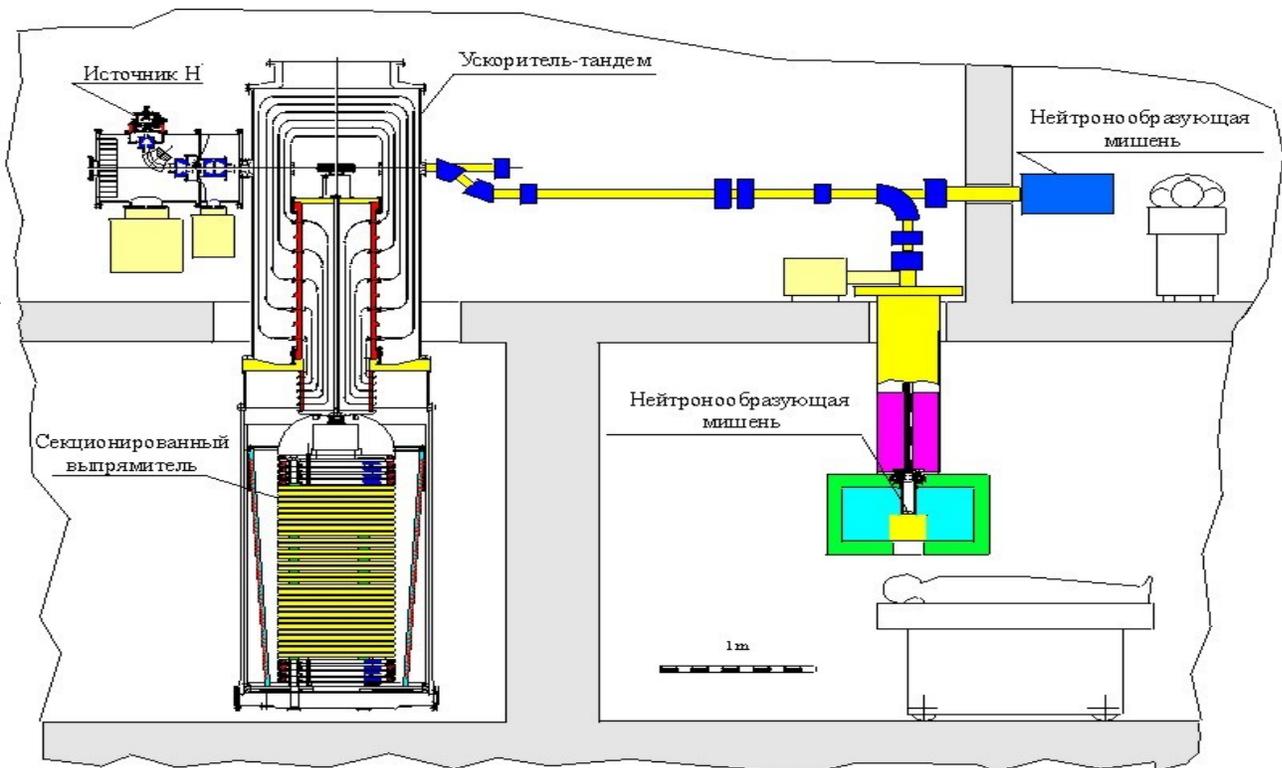


Рис.1 Схема ускорителя протонов БНЗТ

В реакции захвата нейтрона выделяются альфа-частица  $\text{He}^{2+}$  и ион  $^7\text{Li}^+$ , суммарная энергия которых составляет 2.3 МэВ. Торможение продуктов реакции внутри клетки вызывает ее гибель [1].

В настоящий момент институт ядерной физики им. Г.И. Будкера разрабатывает электростатический ускоритель-тандем для получения направленного пучка тепловых нейтронов (Рис.1).

Пучок ионов  $\text{H}^+$  инжектируется в канал ускорителя. Напряжением порядка 1 МВ, распределенным на блок электродов, частицы разгоняются до половины необходимой

энергии взаимодействия. Далее, в полости внутреннего электрода пучок проходит сквозь обдирочную мишень. В объеме обдирочной мишени происходит взаимодействие пучка с нейтральными атомами, в результате чего ионы  $H^-$  обдираются до ионов  $H^+$ .

Полученный пучок протонов разгоняется симметричными высоковольтными зазорами до энергии порядка 2 МэВ и сбрасывается на литиевую мишень (рис.1). В результате пороговой реакции образуется направленный вперед нейтронный пучок со средней энергией 25 кэВ, используемый в терапии.

## **1.2. Обдирочная мишень**

Мишень должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Обеспечить 98 – 99 % перезарядку пучка отрицательных ионов водорода энергией от 0,96 до 1,25 МэВ в протоны.

2. Ухудшение вакуума в ускоряющем промежутке, вызванное потоком газа из обдирочной мишени не должно превышать  $10^{-2}$  Па, для предотвращения пробоев по газу. Дополнительное снижение давления также снизит долю отрицательных ионов обдираемых в ускоряющем промежутке.

3. Вылетающие из обдирочной трубки вторичные заряженные частицы и ультрафиолет не должны приводить к падению электрической прочности вакуумных зазоров и изоляторов.

3. Мишень не должна привести к уширению энергетического спектра протонов более чем на 2 КэВ.

4. Численные расчеты транспортировки пучка отрицательных ионов водорода показывают, что использование магнитных и электростатических тормозящих линз перед входом в тандем позволяет в области перезарядной мишени на длине 400 мм проводить 10 мА пучок диаметром 10 мм с малой температурой ионов. Поэтому апертура перезарядной мишени должна быть порядка 10 мм.

В ходе начального проектирования установки БНЗТ были рассмотрены различные типы обдирочных мишеней [2], основными из которых являлись:

- твердотельные
- жидкометаллические
- газовые

В качестве твердотельной мишени предлагалось использование графитовых пластин. Однако, при прохождении высокоэнергетичного пучка сквозь графит происходил бы быстрый нагрев и разрушение мишени. Срок непрерывной службы установки сокращался до 100-180 часов, после чего возникала бы необходимость ее разборки.

В качестве основы жидкометаллической мишени рассматривался литий. Преимущество схемы заключалось в том, что низкое давление насыщенных паров лития позволяло получить более глубокий вакуум, что способствовало лучшему прохождению пучка. Однако литий, истекший из мишени, мог бы оседать на электродах и изоляторах, что увеличивало опасность пробоя зазора между ними.

В результате основным типом мишени была выбрана газовая.

В данной схеме в трубку диаметром порядка ширины ионного пучка напускается газ. Длина трубки и давление в ее центре подбираются таким образом, чтобы минимизировать утечки газа при максимальной эффективности обдирки.

Также параметры мишени зависят от рода используемого газа.

Основными вариантами были  $SF_6$  и  $Ag$  [2]. Первый более привлекателен из-за большего сечения взаимодействия с ионом. Однако использование сложного газа в

мишени было признано нежелательным, т.к. возникает вероятность распада молекулы на составные элементы и осаждение компонент на поверхностях ускорителя.

Для перезарядки 99 % пучка требуется линейная толщина аргоновой мишени  $nL = 3,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Итоговая схема обдирочной мишени такова:

В центр трубки диаметром 10 мм и длиной 44 см напускается Ag под средним давлением 3,07 Па ( $2.3 \times 10^{-2}$  торр).

Для данной длины обдирочной мишени в трубке реализуется промежуточный режим течения. Запишем выражение для расхода газа :

$$Q = 3 \times 10^{-18} nL \frac{D^3 T^{1.5}}{L^2 \sqrt{M}} \left( 4,8 \times 10^{-16} nL \frac{D}{L} + 0,82 \right) ,$$

где расход  $Q$  выражен в л Торр/с, все размеры берутся в сантиметрах, температура  $T$  в градусах Кельвина,  $M$  – молекулярная масса.

Оцененный расход газа при молекулярном течении из трубки диаметром 10 мм, длиной 440 мм  $Q = 6,13 \times 10^{-3} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  (46 мТорр л/с). Реализация промежуточного режима течения увеличивает расход газа на 20 % и составляет величину  $Q = 7,3 \times 10^{-3} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  (55 мТорр л/с), что соответствует потоку частиц  $1,8 \times 10^{18} \text{ с}^{-1}$ .

Необходимо минимизировать поток вторичных заряженных частиц и УФ из обдирочной трубки для сохранения электрической прочности вакуумных зазоров и изоляторов.

### 1.3. Мишень с рециркуляцией

Для понижения давления в высоковольтных зазорах была предусмотрена система с рециркуляцией и дифференциальной откачкой (Рис.2). Внутри высоковольтного электрода помещена дополнительная камера с двумя отверстиями малого диаметра для ввода пучка. Насос, расположенный во внутреннем объеме при умеренной скорости откачки работает эффективнее за счет большего давления на входе. Благодаря дифференциальной откачке поток газа в межэлектродное пространство минимизируется. Выпуск насоса подключается к перезарядной мишени, таким образом, осуществляется рециркуляция, без необходимости проводить откаченный газ через высокое напряжение.

Также для уменьшения потока газа мишени в ускоряющий промежуток, в отверстия внутреннего объема для ввода пучка

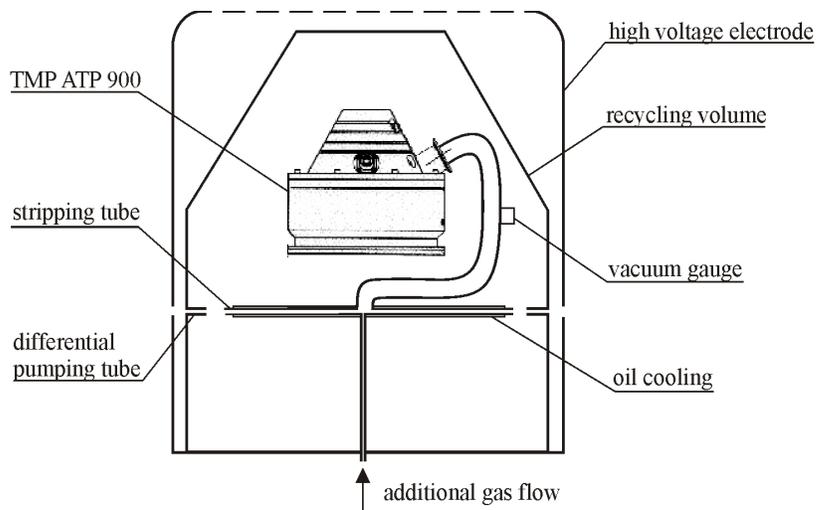


Рис.2 Схема мишени с рециркуляцией

будут установлены вакуумные сопротивления (газовые трубки-сопротивления). Вакуумные сопротивления являются трубками, продолжающими обдирочную мишень, но отстоящих от последней на расстоянии порядка 2 - 4 диаметров, в зависимости от длины трубок-сопротивлений. Газ, попадая в трубки, в результате многократных соударений со стенками частично возвращается во внутренний объем. Чем длиннее трубка-сопротивление, тем меньшее количество газа, попадающего в трубку под углом к ее оси, вылетает в высоковольтные зазоры ускорителя. Но при увеличении длины трубок все большее количество частиц, вылетающих под малыми углами из мишени, попадают в газовые сопротивления. Диаметр трубок по возможности должен быть минимизирован, но трубки-сопротивления не должны мешать вводу пучка в обдирочную мишень. Поэтому необходимо оптимизировать параметры обдирочных трубок.

Проводимость такого сопротивления существенно меньше проводимости разрыва. В вакуумное сопротивление попадет около 10% потока непосредственно из перезарядной трубки. Это позволит большую часть газа скачивать насосом и с выхода насоса направлять обратно в перезарядную мишень.

Дифференциальная откачка замкнутого объема в высоковольтном электроде по оценкам должна снизить поток газа из мишени в ускоритель в  $\sim 10$  раз [6].

#### ***1.4. Взаимодействие ионного пучка с молекулами газа обдирочной мишени***

Атомы аргона интенсивно ионизируются 1 МэВ пучком отрицательных ионов водорода, что приводит к образованию плазмы в обдирочной трубке. Водород теряет энергию  $\sim 600$  эВ в мишени и ионизует  $\sim 8$  атомов аргона. Перезарядка отрицательного иона водорода в протон сопровождается появлением 2 электронов со скоростями, равными скорости быстрого иона, которые ионизируют  $\sim 10$  атомов аргона. Таким образом, полное число ионизаций в обдирочной мишени, производимых одним отрицательным ионом водорода  $\sim 18$  атомов аргона [6].

Мощность электронов с энергией 500 эВ составляет 40 Вт. Потери в результате резерфордского рассеяния составляют величину порядка десятка ватт.

Таким образом, суммарная мощность потерь энергии при перезарядке в мишени имеет величину порядка 60 Вт и в основном переносится на стенку перезарядной трубки, которая охлаждается маслом.

Ускорение ионов  $H^-$  и  $H^+$  в тандеме также сопровождается образованием быстрых атомов, электронов и положительных ионов в результате обдирки ионов  $H^-$  и ионизации остаточного газа. Это ведет к потере интенсивности пучка ускоренных отрицательных ионов и дополнительной токовой и тепловой нагрузке на электроды от вторичных частиц. Очевидно, что эти потери зависят от величины и характера распределения плотности газа в ускорительном тракте.

Вследствие возможной перекомпенсации пространственного заряда пучка в обдирочной мишени образующиеся в промежутке между перезарядной трубкой и отверстием в высоковольтном электроде положительные ионы газа мишени будут эффективно дрейфовать к ускоряющему зазору и затем ускоряться. Оценки тока таких положительных ионов дают 0,4 мА и 1,2 мА, соответственно, для трактов ускорения отрицательных ионов и протонов, соответствующие им мощности – 400 и 1200 Вт. Для подавления этого нежелательного эффекта следует внутри высоковольтного электрода

отклонить от оси основного пучка эти вторичные заряженные частицы, обладающие малой энергией [6].

### 1.5. Возможность моделирования обдирочной мишени на стенде

Для изучения процессов, сопровождающих перезарядку отрицательных ионов водорода в протоны, необходимо промоделировать обдирочную мишень. Для снижения потока газа в высоковольтные зазоры планируется провести оптимизацию размеров газовых сопротивлений и оценить улучшение вакуума в ускорителе с включенной дифференциальной откачкой. На следующем этапе необходимо промоделировать взаимодействие электронного пучка с газовой мишенью. Ток отрицательных ионов водорода равен 10 мА, поэтому полный ток электронов составит 20 мА. Для моделирования взаимодействия электронов с мишенным газом источник электронов должен обеспечить ток пучка  $\sim 20$  мА. Учитывая, что два электрона, получившихся в результате перезарядки отрицательного иона, проходя через мишень, ионизуют 10 атомов Ag, а ион ионизует 8 атомов Ag, то увеличив ток пучка электронов на стенде до 40 мА в обдирочной трубке мы получим плазму, близкую по плотности и температуре к плазме, получаемой в ускорителе. Планируется исследовать параметры этой плазмы. Поэтому источник электронов должен обеспечить энергию электронов  $\sim 500$  эВ и ток в диапазоне 1-40 мА.

Были произведены оценки параметров плазмы, получающейся, в результате взаимодействия пучка электронов с газом в обдирочной трубке на стенде. По оценкам скорость ионов  $Ag^+ V_i = 5 \times 10^5$  см/с [6]. Равновесная плотность плазмы  $n_i \approx AI_b / \pi a L V_i \approx 2 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, где  $A=5$  число ионизаций производимых электроном,  $I_b$  – ток  $H^-$ , а – радиус и  $L$  - длина обдирочной трубки. Предполагая, что температура электронов в плазме  $T_e \approx 5$  эВ [6], был получен радиус Дебая  $r_D = 743 \times (T_e / \pi n_{pl})^{1/2} = 1,2 \times 10^{-2}$  см. Однако, плазма в обдирочной трубке распределена неравномерно, максимальная плотность плазмы достигается в центре трубки и уменьшается к краям трубки, возможно на порядок, что приведет к увеличению радиуса Дебая на краях мишени до значений порядка миллиметров. Плотность электронов в пучке  $n_b \approx I_b / \pi a^2 e V_b \approx 6 \times 10^6$  см<sup>-3</sup>, где  $V_b = 1,3 \times 10^7$  м/с - это скорость электронов в пучке. Для подтверждения оценок и изучения эффектов распространения плазмы в обдирочной трубке, необходимо произвести измерения параметров плазмы.

## 2. Описание эксперимента

### 2.1. Испытательный стенд

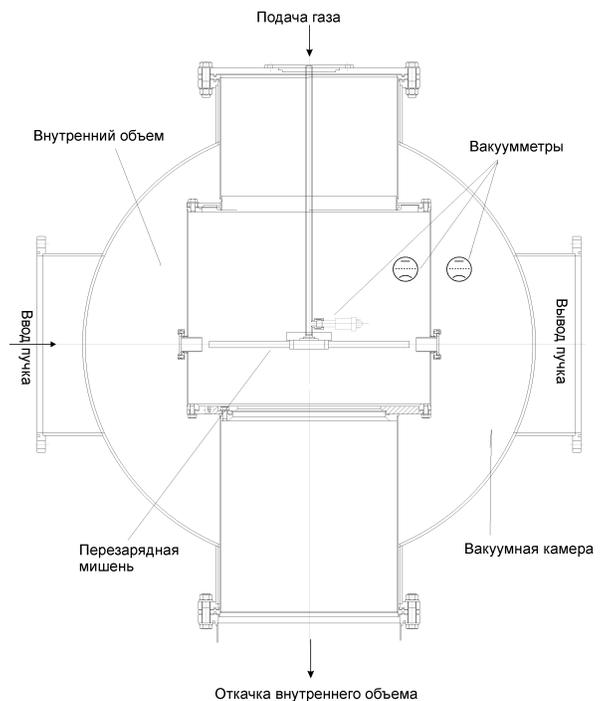


Рис.3 Схема испытательного стенда

Испытания перезарядной мишени проводились на стенде № 9-16, состоящем из:

- Вакуумной камеры с испытываемой моделью и детекторами,
- Системы вакуумной откачки,
- Системы напуска газа

### 2.1.1. Вакуумная камера с вакуумметрами

Рабочий объем представляет собой вакуумную камеру 1 м в диаметре и ~2 м в длину (рис.3). Для моделирования электродов внутрь объема помещен полый стальной цилиндр (внутренний объем) диаметром 560мм с двумя отверстиями для прохождения электронного пучка, в которые устанавливаются съемные трубки-сопротивления. Обдирочная трубка расположена соосно отверстиям во внутреннем объеме. Крепление модели мишени, подвод к ней газа, ввод питания на детекторы и съем показаний осуществляется через один фланец, расположенный вверху камеры.

Вакуумметры магнитоэлектрического типа (ВМБ-1/8-001 (ПММ-46)) были установлены возле турбомолекулярных насосов. На верхнем фланце внутреннего объема и на основной вакуумной камере установлены магнитоэлектрические вакуумметры PKR251 фирмы Pfeiffer.

### 2.1.2. Система вакуумной откачки

Вакуумная система показана на рисунке 4.

Для изучения дифференциальной откачки на испытательном стенде внутренний объем откачивается турбомолекулярным насосом 01-АБ-1500 со скоростью откачки 0,72 м<sup>3</sup>/с.

Внешний объем откачивается турбомолекулярным насосом НВТ-1000 со скоростью откачки 1 м<sup>3</sup>/с.

Оба насоса присоединены к объему через шиберы ЗПТ-250.

Форвакуумный агрегат АВР-50 через клапан подключен к азотной ловушке. За ловушкой установлено разветвление на байпасную линию и линию выходов турбомолекулярных насосов. Байпасная линия через клапан ВЭП-50 производит откачку рабочего объема до давлений порядка 10<sup>-2</sup>торр.

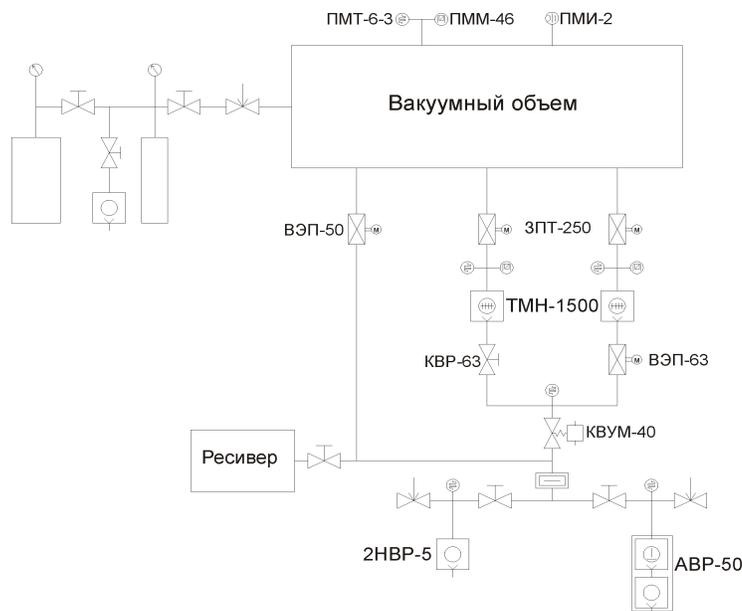


Рис.4 Схема газовой системы и системы вакуумной откачки.

Выход турбомолекулярных насосов защищен соленоидальным быстрозакрывающимся клапаном КВУМ-40, одна из линий контролируется механическим клапаном КВР-63, а другая – электромеханическим ВЭП-63.

### ***2.1.3. Газовая система***

Газовая система состоит из баллона с газом, дополнительного объема (0,8 л), клапанов, манометров и масс-флоу контроллера (mass flow controller). Газовая система показана на рис.4 слева.

Газ из основного баллона подается в дополнительный объем. Затем баллон с газом отсекается клапаном. За изменением давления позволяют следить манометры. Газ из дополнительного объема через натекатель подается в обдирочную мишень. Такая система позволяет использовать механический натекатель и достаточно точно контролировать подачу газа. В данной работе расход газа задавался масс-флоу контроллером F-201C-AGB-33-V фирмы Bronkhorst.

## ***2.2. Источник электронов***

На ускорителе планируется получить пучок ускоренных протонов до 2,5 МэВ с током до 10 мА. Прежде чем попасть в обдирочную мишень пучок ионов H<sup>+</sup> ускоряется до энергии 1 МэВ, поэтому электроны, полученные в результате обдирки, будут иметь энергию порядка 500 эВ. Из этого следует, что источник электронов должен обеспечить энергию электронов ~500 эВ и ток в диапазоне 1- 40 мА. Также необходимо чтобы источник создавал пучок электронов с малой расходимостью, проходящий через обдирочную мишень длиной ~400 мм и внутренним диаметром ~10 мм. Для этого необходимо произвести расчет расходимости пучка на расстоянии порядка 500мм с учетом области пространственной компенсации заряда.

### ***2.2.1. Оценка параметров и расчет расходимости пучка***

Планируется проведение эксперимента с токами пучка 1мА, 10мА и 40 мА. При фиксированной энергии ток пучка можно менять двумя способами:

1. менять температуру накала катода
2. варьировать катод - анодное расстояние

Как основной, был выбран второй способ.

Для конструирования источника электронов необходимо рассчитать расстояние между катодом и анодом и оценить расходимость пучка и на основе этих данных подобрать анодную сетку.

Анодная сетка должна удовлетворять следующим условиям:

- должна быть изготовлена из достаточно тугоплавкого материала
- обладать прозрачностью более 50%
- обеспечить низкую расходимость пучка

Расходимость пучка считалась на расстоянии 50 см, т.к. длина обдирочной трубки – 40 см и источник электронов планируется разместить на расстоянии ~10 см от мишени.

Расходимость пучка, возникающая при прохождении электронов через анодную сетку, рассчитывалась по формуле:

$$r = \frac{h}{6 \cdot d}.$$

Где  $d$  – расстояние между катодом и анодом,  $h$  – шаг анодной сетки, то есть минимальное расстояние между центрами соседних отверстий сетки. Так как рассматриваемые сетки обладают большой прозрачностью,  $h$  приблизительно равно эффективному диаметру отверстий в них.

Расходимость пучка электронов была рассчитана для трех имеющихся сеток.

Расстояние между катодом и анодом рассчитывалось по закону трех- вторых:

$$I = 2.3 \cdot 10^{-6} \cdot U^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{S}{d^2}.$$

Расчеты расстояния между катодом и анодом и расходимости пучка для трех сеток проводились для энергий пучка 500 В и 600 В с током 1 мА, 10 мА и 100 мА. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

V(B)	I(A)	d(мм)	Сетка 1 h1=170*10 <sup>-3</sup> (мм) r(мм)	Сетка 2 h2=136*10 <sup>-3</sup> (мм) r(мм)	Сетка 3 h3=285*10 <sup>-3</sup> (мм) r(мм)
500	10 <sup>-3</sup>	36	0.4	0.3	0.7
	10 <sup>-2</sup>	11.4	1.6	1.3	2.7
	10 <sup>-1</sup>	3.6	4	3.2	6.6
600	10 <sup>-3</sup>	41.2	0.3	0.3	0.6
	10 <sup>-2</sup>	13	1.1	0.9	1.8
	10 <sup>-1</sup>	4.1	3.4	2.8	5.8

Таблица 1. Где  $r$  – расходимость пучка на расстоянии 50 см, т.е. характерное расстояние между отклоненной и не отклоненной траекториями электрона.

Из полученных данных (табл. 1) следует, что для сетки 1 при энергии электронов 500эВ и токе 10мА на расстояние 50 см диаметр пучка составит 11.2 мм. Из этого следует, что порядка 20% пучка осядет на стенках обдирочной трубки, что допустимо в нашем случае, так как ионизация атомов мишени происходит в основном в центре обдирочной трубки. Возможно, что потери пучка на стенках обдирочной трубки будут меньше 20 % в связи с тем, что профиль плотности электронов пучка неравномерен и спадает к внешнему радиусу пучка. Также на расходимость пучка будет влиять неполная пространственная нейтрализация, что возможно увеличит расходимость. Однако при более высоких токах потери электронов на стенках будут велики по сравнению с точностью определения других величин и мы не сможем считать ток пучка постоянным вдоль трубки. Поэтому на больших токах планируется проводить моделирование с энергией пучка 600эВ, что позволит уменьшить потери.

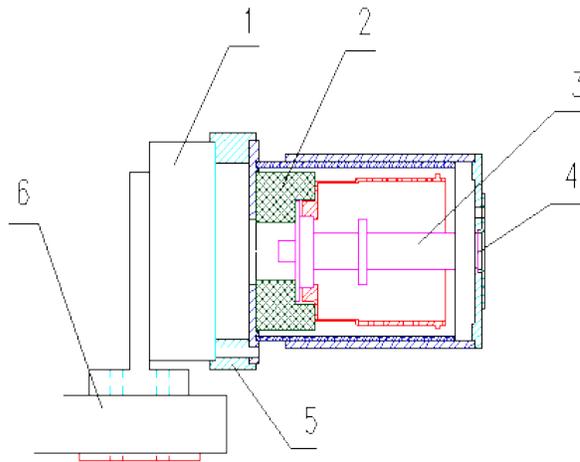
Сетка 1 наиболее подходит нам, так как ее расходимость невелика, для нашего случая, она обладает наибольшей прозрачностью (75%) и изготовлена из достаточно тугоплавкого материала (предположительно нержавеющей сталь).

### 2.2.2. Конструирование источника электронов

Диаметр пучка должен быть меньше чем диаметр обдирочной трубки. Однако желательно, чтобы пучок был однородным внутри трубки и планируется получение больших токов, поэтому было решено диаметр пучка сделать 8мм.

Был сконструирован источник электронов с током пучка 1-40 мА и энергией 500-600 эВ (Рис.5).

Нагреваемый катод из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ), прикрепленный через изолятор к внутреннему стакану, расположен соосно с обдирочной трубкой и окружен тепловыми экранами. Анодная сетка крепится к внешнему стакану, который плотно подогнан по внутреннему стакану и перемещается вдоль него. Таким образом, перемещая внешний стакан с анодной сеткой, по закону трех - вторых мы меняем ток пучка. Стаканы и катод с экранами на изоляторе при помощи втулки крепятся на юстировочную площадку, прикрепленную к штативу. Использовалась стандартная юстировочная площадка, применяемая в оптике. Штатив приварен к опоре, которая крепится к внутреннему объему. Все изготовленные на токарном станке детали подгонялись друг по другу, чтобы



исключить люфт при монтаже. Отклонение направления пучка от оси трубки на величину порядка  $4^\circ$  исключается при помощи юстировочной площадки. Перемещая юстировочную площадку вдоль штатива, мы можем расположить источник электронов на различных расстояниях от обдирочной трубки.

Рис.5 Схема источника электронов.

1- юстировочная площадка, 2- изолятор, 3- гексаборидлантановый катод, 4- анодная сетка, 5- втулка, 6- штатив.

## 3. Экспериментальная часть

### 3.1. Моделирование дифференциальной откачки обдирочной мишени

На ускорителе внутренний объем планируется откачивать турбомолекулярным насосом АТР 900 со скоростью откачки  $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ . Выбор этого насоса связан с его надежностью и компактными размерами, позволяющими поместить его во внутреннем объеме высоковольтного электрода, в вакууме. Насос рассчитан на водяное охлаждение, но в связи с возможностью пробоя по воде, было решено производить охлаждение маслом. Высоковольтные зазоры ускорителя будут откачиваться через жалюзи криогенным насосом со скоростью откачки  $\sim 5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Суммарная проводимость жалюзи составляет  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$  [3]. Таким образом высоковольтные зазоры будут откачиваться со скоростью  $\sim 1,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

На стенде внутренний объем откачивается через трубопровод насосом 01-АБ-1500 со скоростью откачки 0,72 м<sup>3</sup>/с. Трубопровод подсоединен к объему через нижний фланец камеры диаметром 0,35 м и состоит из двух труб с диаметрами 0,4 м и 0,25 м и длинами 2 м и 0,73 м соответственно. Скорость откачки рассчитывалась по формуле:

$$U := \frac{1}{\frac{1}{U_p} + \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}}$$

Где  $U_p$  – скорость откачки насоса,  $U_1$  – проводимость первой трубы,  $U_2$  – проводимость второй трубы,  $U_3$  – проводимость нижнего фланца камеры, через который проводилась откачка. Оцененная скорость откачки внутреннего объема составляет 0,44 м<sup>3</sup>/с. Аналогично внешний объем откачивается насосом НВТ-1000 с оцененной скоростью откачки 0,76 м<sup>3</sup>/с. Скорости откачки насосов на стенде сравнимы со скоростью откачки насосов в ускорителе, что позволяет моделировать ситуацию в ускорителе.

Необходимо измерить вакуум во внутреннем и внешнем объеме при включенной и выключенной дифференциальной откачке с различными трубками-сопротивлениями при заданном расходе газа. Выключение откачки внутреннего объема производилось закрыванием шиберов ЗПТ-250.

При выключенной дифференциальной откачке вакуум во внутреннем объеме определяется подачей газа и скоростью истечения его через трубки-сопротивления. Вакуум во внешнем объеме определяется заданным с помощью масс-флоу контролера расходом газа при фиксированной скорости откачки насоса НВТ-1000.

При включенной дифференциальной откачке вакуум во внутреннем объеме определяется подачей газа, скоростью откачки через трубопровод насосом 01-АБ-1500 и скоростью истечения газа через трубки-сопротивления. Вакуум во внешнем объеме определяется долей газа, которая не откачивается насосом внутреннего объема и скоростью откачки насоса внешнего объема (НВТ-1000).

Течение газа через трубки-сопротивления состоит из двух потоков. Первый образован атомами аргона, которые попали в трубку-сопротивление непосредственно из обдирочной мишени, без столкновений с другими поверхностями. Второй поток состоит из частиц, вылетевших во внутренний объем через зазоры между обдирочной трубкой и трубками-сопротивлениями и не откаченных насосом 01-АБ-1500, так как в результате многочисленных столкновений во внутреннем объеме они попали в трубки-сопротивления.

Оцененная проводимость трубок-сопротивлений  $U_{tr}$  с внутренним диаметром 12,5 мм и длинами 20 мм, 30 мм, 40 мм составила  $9,9 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с,  $6,7 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с и  $5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с соответственно.

Из оценок на основе расчета методом пробных частиц следует, что напрямую из обдирочной трубки во внешний объем вылетает 3 – 6% газа. Кроме этого через трубки-сопротивления во внешний объем попадает порядка 6 - 3% газа, в зависимости от длины трубок-сопротивлений, не откаченного насосом внутреннего объема, при его скорости откачки ~0.4 м<sup>3</sup>/с [2].

Доля вылетающих напрямую частиц зависит от длины трубок, от расстояния до конца обдирочной трубки и от режима течения газа в ней. Возможно зависимость отношения давлений во внешнем объеме с выключенной и включенной дифференциальной откачкой от расхода газа будет медленно расти. Такую зависимость можно объяснить различными режимами течения газа в мишени. При бесстолкновительном режиме течения газа в трубке, когда длина свободного пробега

частицы намного больше диаметра обдирочной трубки, газ из мишени вылетает узкой струей (с малым угловым расхождением). При таком режиме течения большая часть газа, вылетающая из обдирочной трубки, попадает во внешний объем. В случае столкновительного режима течения газа, когда длина свободного пробега частиц много меньше диаметра обдирочной трубки, газ из мишени вылетает с большим угловым расхождением, и может быть описан косинусоидальным распределением. При таком режиме течения большая часть газа попадает во внутренний объем, и лишь малый процент напрямую из трубки вылетает во внешний объем. В нашем случае, длина свободного пробега частиц порядка радиуса обдирочной трубки, то есть реализуется промежуточный режим течения газа. При увеличении расхода  $A_g$ , режим течения газа в мишени переходит в столкновительное движение. В результате все меньшее количество газа напрямую из обдирочной трубки вылетает во внешний объем. Поэтому с увеличением расхода газа, отношение давлений во внешнем объеме с включенной и выключенной дифференциальной откачкой может медленно расти.

Для подтверждения и уточнения расчетов было проведено экспериментальное моделирование дифференциальной откачки обдирочной мишени ускорителя на стенде без рециркуляции. Получены зависимости давления от расхода газа для различных трубок-сопротивлений при включенной и выключенной дифференциальной откачке (таблицы 2,3,5,6,8,9).

Измерения проводились четырьмя вакуумметрами: двумя вакуумметрами магниторазрядного типа (ВМБ-1/8-001 (ПММ-46)), один из которых установлен возле турбомолекулярного насоса, откачивающего внутренний объем, а второй установлен на внутреннем объеме и двумя магниторазрядными вакуумметрами PKR251 (IKR251) фирмы Pfeiffer, установленных на внутреннем и основном объемах. Точность этих вакуумметров составляет 30%. Так как вакуумметр магниторазрядного типа (ВМБ-1/8-001) установленный у турбомолекулярного насоса измеряет вакуум во внутреннем объеме не точно, основные расчеты производились на основе данных, полученных вакуумметрами PKR251.

Точность расхода газа задается MFC, погрешность которого не превышает 0,5% от максимального значения.

В таблицах приведены показания вакуумметров, калиброванных по воздуху. Но так как объемы заполнены в основном аргоном, то необходимо учитывать коэффициент пересчета. Для вакуумметров магниторазрядного типа (ВМБ-1/8-001) коэффициент равен  $k=1,4$  [7]. Для магниторазрядных вакуумметров PKR251 в диапазоне давлений до  $10^{-2}$  Па коэффициент равен  $k=0,8$ , в остальных случаях коэффициент определяется из графика приведенного в паспорте прибора.

### **Для трубок длиной 40 мм и диаметром 12,5 мм**

Вначале был измерен вакуум во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема. Расход газа задавался масс – флоу контроллером (MFC) в процентах от  $1,33 \times 10^{-2}$  Па $\times$ м<sup>3</sup>/с. Проводились измерения вакуума с заданным MFC расходом газа 5, 10, 20, 40, 60, 80 и 100%. Результаты измерений приведены в таблице 2. Значения в строке “MFC 0%” соответствуют измерениям давления в объемах при выключенной подаче газа.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	PKR 251 на внутреннем объеме (Па)	IKR 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	3,20E-05	1,00E-04	3,00E-03	1,80E-04
MFC 5%	3,20E-05	8,70E-04	1,10E-01	1,30E-03
MFC 10%	3,20E-05	1,00E-03	1,20E-01	2,20E-03
MFC 20%	3,20E-05	1,80E-03	2,10E-01	4,50E-03
MFC 40%	3,20E-05	3,70E-03	3,40E-01	9,20E-03
MFC 60%	3,20E-05	6,50E-03	4,50E-01	1,40E-02
MFC 80%	3,20E-005	7,50E-003	5,30E-001	1,80E-002
MFC 100%	3,20E-005	1,00E-002	5,90E-001	2,30E-002

Таблица 2. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 40 мм.

Затем измерялся вакуум при включенной откачке внутреннего объема. Результаты измерений приведены в таблице 3.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	PKR 251 на внутреннем объеме (Па)	IKR 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	1,30E-04	1,00E-04	1,40E-04	1,40E-04
MFC 5%	1,00E-03	1,80E-04	1,50E-03	2,80E-04
MFC 10%	2,10E-03	1,80E-04	3,00E-03	4,20E-04
MFC 20%	3,70E-03	4,20E-04	6,10E-03	6,70E-04
MFC 40%	6,50E-03	6,50E-04	1,30E-02	1,20E-03
MFC 60%	8,70E-03	8,70E-04	1,90E-02	1,60E-03
MFC 80%	1,10E-02	1,30E-03	2,60E-02	2,10E-03
MFC 100%	1,30E-02	1,50E-03	3,20E-02	2,60E-03

Таблица 3. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при включенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 40 мм.

Из результатов измерений была вычислена скорость откачки внутреннего и внешнего объемов по аргону, с установленными трубками-сопротивлениями длиной 4 см. Средняя скорость откачки внутреннего объема  $U_1$  вычислялась по формуле:

$$U_1 = \frac{1}{n} \left[ \sum_{5\%}^{100\%} \left( \frac{Q_i - \alpha \cdot Q_i - 2 \cdot U_{tr} \cdot P_{0i} \cdot k}{(P_{0i} - P_f) \cdot k} \right) \right] \quad (1).$$

Где  $Q_i$  – заданный расход газа,  $n$  – число измерений ( $n=7$ ),  $U_{tr}$  – проводимость одной трубки-сопротивления,  $P_{0i}$  – измеренное давление во внутреннем объеме,  $P_f$  – фоновое давление (давление во внутреннем объеме без подачи газа. Табл.3),  $\alpha$  – процент газа вылетевшего из обдирочной трубки напрямую во внешний объем (Табл. 3). Скорость откачки внешнего объема  $U_2$  вычислялась по формуле:

$$U_2 = \frac{1}{n} \left[ \sum_{5\%}^{100\%} \left( \frac{\alpha \cdot Q_i + 2 \cdot U_{tr} \cdot P_{0i} \cdot k}{(P_i - P_f) \cdot k} \right) \right] \quad (2).$$

Где  $Q_i$  – заданный расход газа,  $n$  – число измерений ( $n=7$ ),  $P_{0i}$  – измеренное давление во внутреннем объеме (Табл. 3),  $P_i$  – измеренное давление во внешнем объеме (Табл. 3),  $P_f$  – фоновое давление (давление во внешнем объеме без подачи газа. Табл.3),  $U_{tr}$  – проводимость одной трубки-сопротивления,  $\alpha$  – процент газа вылетевшего из обдирочной трубки напрямую во внешний объем. Результаты вычислений представлены в таблице 4.

$\alpha$	Скорость откачки внутреннего объема $U_1$ ( $m^3/c$ )	Скорость откачки внешнего объема $U_2$ ( $m^3/c$ )
7%	0 547	0 56
8%	0 541	0 624
9%	0 535	0 688
9 5%	0 532	0 72
10%	0 529	0 752
10 5%	0 526	0 784
11%	0 523	0 816
12%	0 472	0 889
13%	0 466	0 953

Таблица 4. Зависимость скорости откачки от  $\alpha$ .

Из таблицы видно, что скорости откачки внутреннего и внешнего объемов лучшим образом повторяют оценки при  $\alpha \sim 10\% \pm 2\%$ . Таким образом, для трубок-сопротивлений длиной 40 мм, из обдирочной трубки напрямую во внешний объем вылетает  $10\% \pm 2\%$  газа. При расходе газа достаточном для 99% обдирки пучка  $0,008 \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  (MFC 60%), полный поток частиц во внешний объем составит  $\sim 9,4 \times 10^{-4} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  и вакуум во внешнем объеме составит  $\sim 13 \times 10^{-4} \text{ Па}$ .

Были построены зависимости давления во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа (Рис. 6) и улучшения вакуума во внешнем объеме, т.е. отношение давлений при выключенной и включенной дифференциальной откачке от расхода газа (Рис. 7).

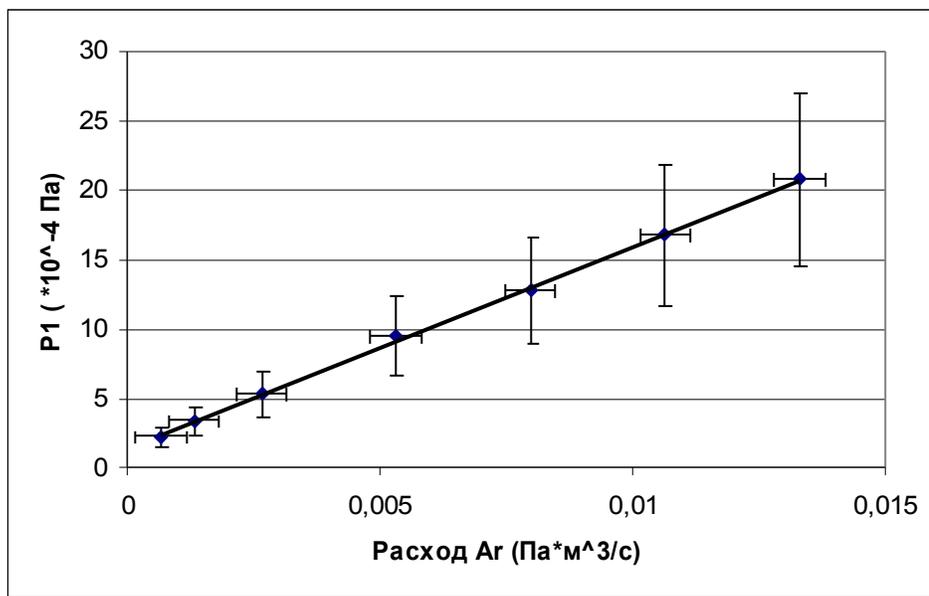


Рис.6. Зависимость давления во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа  
P1 – давление во внешнем объеме с дифференциальной откачкой.

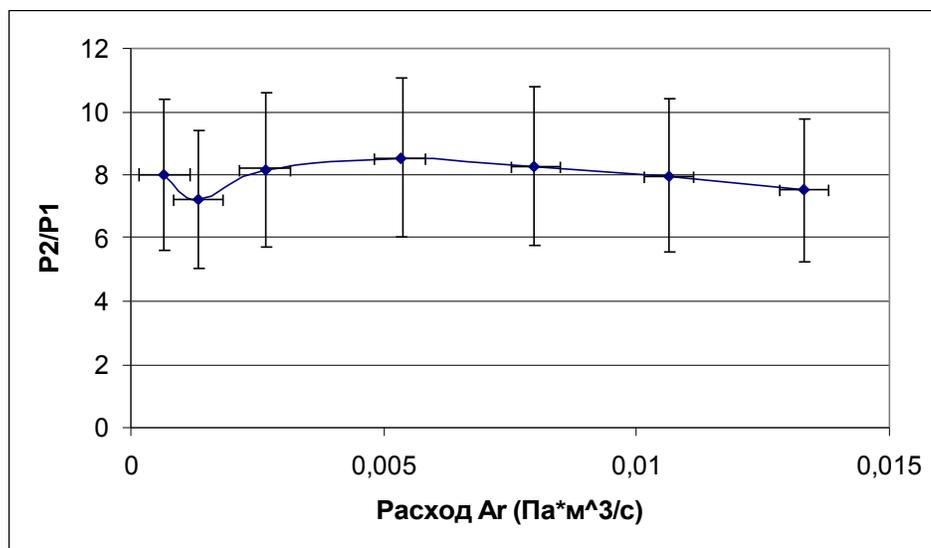


Рис.7. Зависимость улучшения вакуума во внешнем объеме от расхода газа  
P1 – давление во внешнем объеме с дифференциальной откачкой.  
P2 - давление во внешнем объеме без дифференциальной откачки.

Как видно из графика, при включенной дифференциальной откачке давление во внешнем объеме линейно растет с увеличением расхода газа. Отношение давлений во внешнем объеме с включенной и выключенной дифференциальной откачкой постоянно и

не зависит от расхода газа. В среднем, вакуум во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема улучшился в 8 раз, что довольно точно подтверждает проведенные предварительные оценки.

### Для трубок длиной 30 мм и диаметром 12,5 мм

Также проводились измерения вакуума с трубками сопротивлениями длиной 30 мм (Табл. 5,6). Вначале измерялся вакуум во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема, Табл. 5. Расход газа задавался MFC в процентах от  $1,33 \times 10^{-2}$  Па $\times$ м<sup>3</sup>/с.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	PKR 251 на внутреннем объеме (Па)	IKR 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	1,50E-05	1,30E-04	6,50E-03	1,90E-04
MFC 10%	7,50E-06	2,40E-03	1,20E-01	2,50E-03
MFC 20%	1,50E-05	3,70E-03	2,10E-01	4,60E-03
MFC 40%	1,10E-05	7,50E-03	3,40E-01	1,00E-02
MFC 60%	1,30E-05	1,00E-02	4,40E-01	1,50E-02
MFC 100%	1,30E-05	1,80E-02	5,70E-01	2,50E-02

Таблица 5. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 30 мм.

Затем измерялся вакуум при включенной откачке внутреннего объема. Результаты измерений приведены в таблице 6.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	PKR 251 на внутреннем объеме (Па)	IKR 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	2,40E-04	6,50E-05	2,40E-04	7,20E-05
MFC 10%	2,40E-03	2,40E-04	3,40E-03	2,40E-04
MFC 20%	4,90E-03	3,20E-04	7,10E-03	4,00E-04
MFC 40%	7,50E-03	7,40E-04	1,50E-02	6,90E-04
MFC 60%	1,00E-02	1,00E-03	2,20E-02	9,40E-04
MFC 100%	2,10E-02	1,30E-03	3,80E-02	1,50E-03

Таблица 6. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при включенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 30 мм.

Из результатов измерений была вычислена скорость откачки внутреннего и внешнего объемов, с установленными трубками-сопротивлениями длиной 30 мм. Средняя скорость откачки внутреннего объема  $U_1$  вычислялась по формуле (1) ( $n=5$ ). Средняя скорость откачки внешнего объема  $U_2$  вычислялась по формуле (2) ( $n=5$ ). Результаты вычислений представлены в таблице 7.

$\alpha$	Скорость откачки внутреннего объема U1 (м <sup>3</sup> /с)	Скорость откачки внешнего объема U2 (м <sup>3</sup> /с)
1%	0 531	0 47
2%	0 526	0 593
3%	0 52	0 716
3 5%	0 517	0 777
4%	0 515	0 839
4 5%	0 512	0 9
5%	0 509	0 961
6%	0 504	1 085

Таблица 7. Зависимость скорости откачки от  $\alpha$ .

Из таблицы видно, что скорости откачки внутреннего и внешнего объемов повторяют оценки при  $\alpha \sim 3,5\% \pm 1,5\%$ . Таким образом, для трубок-сопротивлений длиной 30 мм, из обдирочной трубки напрямую во внешний объем вылетает порядка  $3,5\% \pm 1,5\%$  газа. При расходе газа  $0,008 \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$ , полный поток частиц во внешний объем составит  $\sim 2 \times 10^{-4} \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  и вакуум во внешнем объеме составит  $\sim 7,5 \times 10^{-4} \text{ Па}$ .

Были построены графики зависимостей давления во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа (Рис. 8) и зависимость улучшения вакуума во внешнем объеме от расхода газа (Рис. 9).

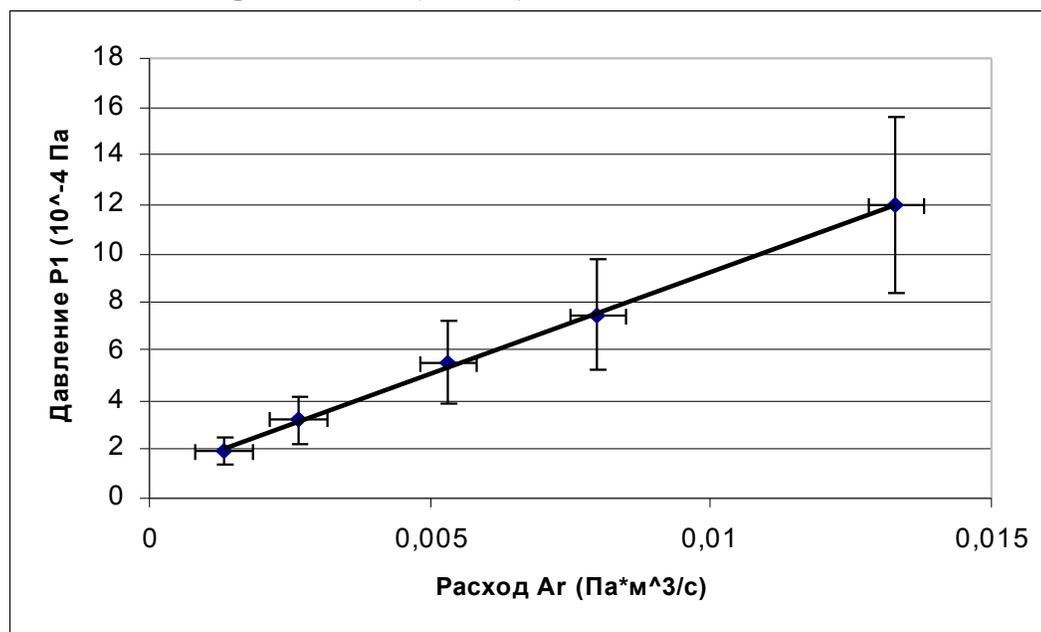


Рис.8 Зависимостей давления P1 во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа.

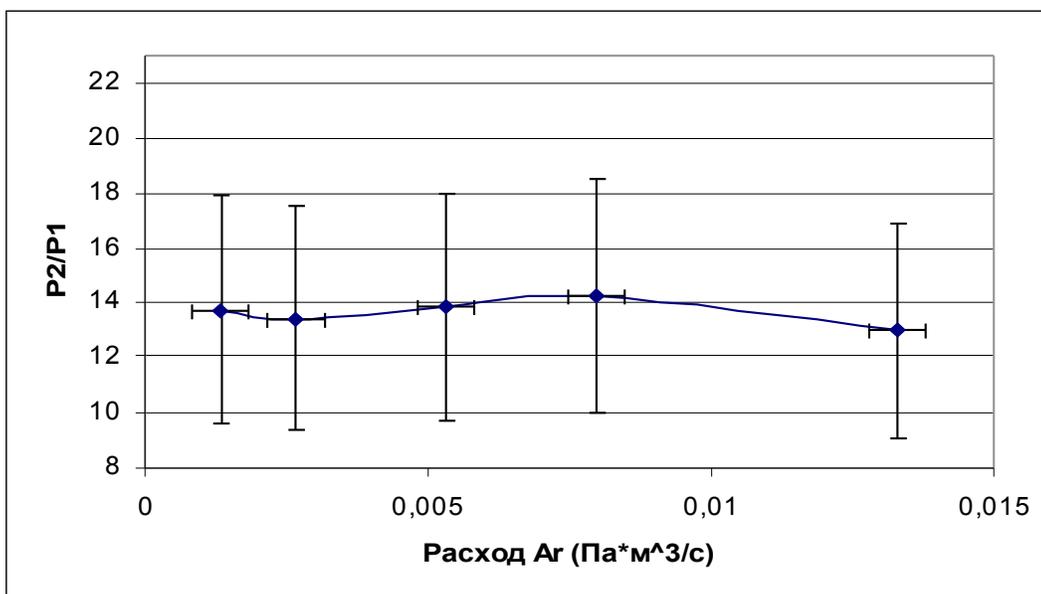


Рис.9 Зависимость улучшения вакуума во внешнем объеме от расхода газа  
P1 – давление во внешнем объеме с дифференциальной откачкой.  
P2 - давление во внешнем объеме без дифференциальной откачки.

Как видно из графика, при включенной дифференциальной откачке давление во внешнем объеме линейно растет с увеличением расхода газа. Отношение давлений во внешнем объеме с включенной и выключенной дифференциальной откачкой постоянно и не зависит от расхода газа. В среднем, вакуум во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема улучшился в 14 раз, что значительно превышает значение предварительных оценок.

### Для трубок длиной 20 мм и диаметром 12,5 мм

Также проводились измерения вакуума с трубками сопротивлений длиной 20 мм (Табл. 8, 9). Вначале измерялся вакуум во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема. Расходом газа задавался MFC в процентах от  $1,33 \times 10^{-2}$  Па\*м<sup>3</sup>/с.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	IKR 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	2,10E-05	1,00E-04	2,30E-04
MFC 5%	2,10E-05	7,50E-04	1,50E-03
MFC 10%	2,10E-05	1,10E-03	2,80E-03
MFC 20%	2,70E-05	2,10E-03	5,50E-03
MFC 40%	4,90E-05	4,20E-03	1,10E-02
MFC 60%	6,50E-05	4,90E-03	1,70E-02
MFC 80%	8,70E-05	6,50E-03	2,30E-02
MFC 100%	1,00E-04	8,70E-03	2,90E-02

Таблица 8. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при выключенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 20 мм.

Затем измерялся вакуум при включенной откачке внутреннего объема. Результаты измерений приведены в таблице 9.

	ВМБ 1/8 на внутреннем объеме (Па)	ВМБ 1/8 на внешнем объеме (Па)	ПКР 251 на внешнем объеме (Па)
MFC 0%	1,30E-04	7,50E-05	1,70E-04
MFC 5%	1,00E-03	1,30E-04	2,80E-04
MFC 10%	2,10E-03	1,80E-04	3,80E-04
MFC 20%	4,20E-03	2,70E-04	5,60E-04
MFC 40%	6,50E-03	4,20E-04	9,00E-04
MFC 60%	8,70E-03	5,60E-04	1,20E-04
MFC 80%	1,10E-02	5,60E-04	1,60E-03
MFC 100%	1,50E-02	7,50E-04	1,90E-03

Таблица 9. Измерения вакуума во внутреннем и внешнем объеме при включенной откачке внутреннего объема, для трубок-сопротивлений длиной 20 мм.

Из результатов измерений была вычислена скорость откачки внутреннего и внешнего объемов, с установленными трубками-сопротивлениями длиной 20 мм. Средняя скорость откачки внутреннего объема  $U_1$  вычислялась по формуле (1) ( $n=7$ ). Средняя скорость откачки внешнего объема  $U_2$  вычислялась по формуле (2) ( $n=7$ ). Так как на внутреннем объеме не был установлен вакуумметр ПКР251, давление во внутреннем объеме рассчитывалось из данных полученных с вакуумметра ВМБ-1/8, установленного возле турбомолекулярного насоса. Из таблиц 2 и 5 следует, что показания вакуумметра ВМБ-1/8 в среднем в два раза превышают показания вакуумметра установленного на внутреннем объеме. Поэтому  $P_{0i} = P_{ВМБ} / 2$ .

Результаты вычислений представлены в таблице 10.

$\alpha$	Скорость откачки внутреннего объема $U_1$ (м <sup>3</sup> /с)	Скорость откачки внешнего объема $U_2$ (м <sup>3</sup> /с)
1%	0 53	0 439
2%	0 524	0 523
3%	0 519	0 611
4%	0 513	0 699
4 5%	0 51	0 743
5%	0 507	0 781
6%	0 502	0 875
7%	0 496	0 963
8%	0 491	1 052
9%	0,485	1,14

Таблица 10. Зависимость скорости откачки от  $\alpha$ .

Из таблицы видно, что скорости откачки внутреннего и внешнего объемов повторяют оценки при  $\alpha \sim 5\% \pm 2\%$ . Таким образом, для трубок-сопротивлений длиной 20

мм, из обдирочной трубки напрямую во внешний объем вылетает порядка  $5\% \pm 2\%$  газа. При расходе газа  $0,008 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ , полный поток частиц во внешний объем составит  $\sim 6,6 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$  и вакуум во внешнем объеме составит  $\sim 9,6 \times 10^{-4} \text{ Па}$ .

Были построены графики зависимостей давления во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа (Рис. 10) и зависимость улучшения вакуума во внешнем объеме от расхода газа (Рис. 11).

Как видно из графика, при включенной дифференциальной откачке давление во внешнем объеме линейно растет с увеличением расхода газа. Отношение давлений во внешнем объеме с включенной и выключенной дифференциальной откачкой постоянно для любого расхода газа. В среднем, вакуум во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема улучшился в 12,5 раз, что превышает значения предварительных оценок.

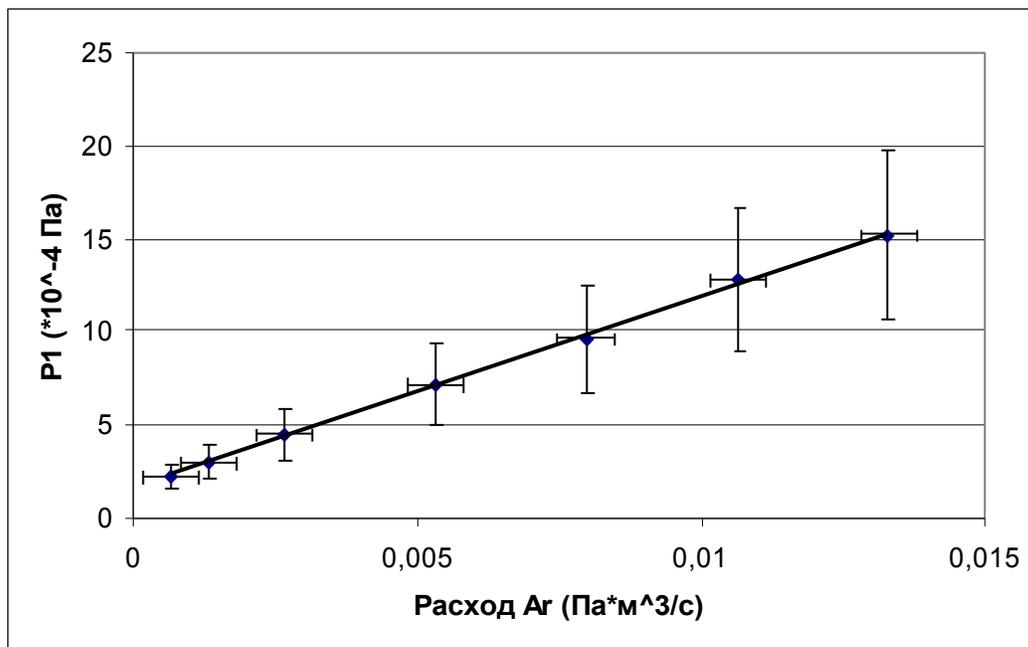


Рис.10 Зависимостей давления  $P_1$  во внешнем объеме с включенной откачкой внутреннего объема от расхода газа.

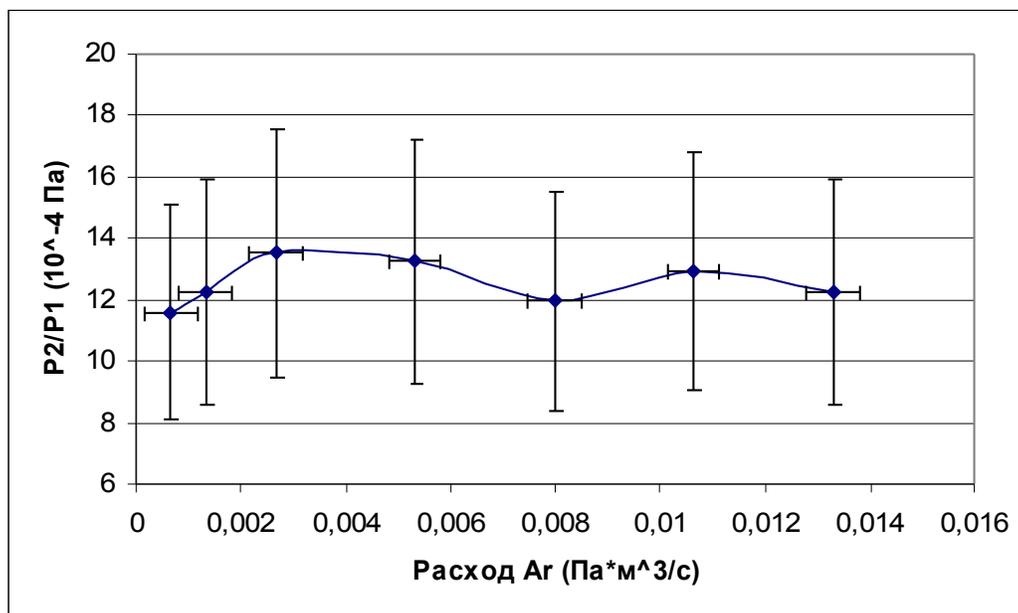


Рис.11 Зависимость улучшения вакуума во внешнем объеме от расхода газа  
P1 – давление во внешнем объеме с дифференциальной откачкой.  
P2 - давление во внешнем объеме без дифференциальной откачки.

### 3.2. Измерение параметров плазмы



Изготовленный источник электронов для моделирования взаимодействия пучка  $H^-$  с обдирочной мишенью был протестирован. При расстоянии между катодом и анодной сеткой  $d = 5$  мм, напряжении  $U = 300$  В получен ток  $I = 2$  мА. Готовится эксперимент для измерения расходимости пучка.

Распределение плотности плазмы будет измеряться двойным ленгмюровским зондом. По оценкам, ток электронов пучка на зонд во много превышает ток ионов из плазмы, что осложняет измерения параметров плазмы. Чтобы уменьшить поток электронов из пучка на зонд, необходимо перед зондом расположить экран, который также позволит предотвратить накопление заряда на поверхности диэлектрика зонда. Несмотря на то, что зонд будет находиться в тени экрана, на него будут попадать электроны пучка отраженные от стенок обдирочной трубки и рассеянные на атомах газа. Полный ток на двойной зонд равен нулю, это позволяет вычитать из измерений ток электронов пучка на зонд. Экран не должен значительно влиять на параметры плазмы, поэтому решено сделать его минимальной площади и заземлить его на обдирочную трубку. Для того, чтобы экран как можно меньше влиял на «собирающую» способность зонда, но при этом защищал зонд от попадания на него электронов, он будет помещен на расстоянии 15 мм от зонда.

Планируется измерить распределение плотности плазмы вдоль обдирочной трубки, для этого была разработана и изготовлена система с подвижным зондом (Рис.12).

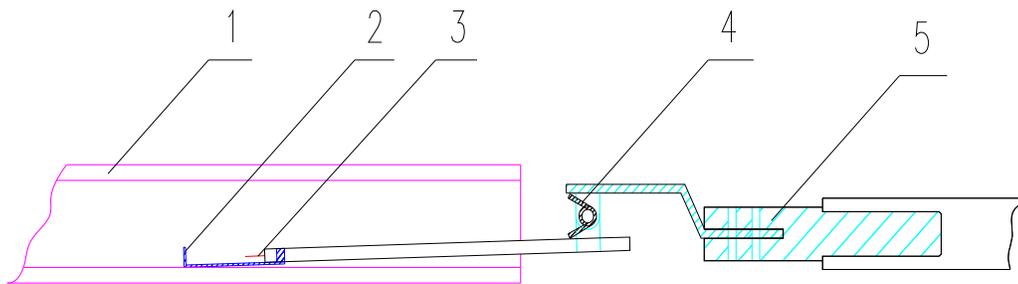


Рис.12 Схема зонда.

1 – обдирочная трубка, 2 – экран, 3 – зонд, 4 – пружина, 5 - штатив.

Экран является полукруглой металлической пластиной, которая крепится к керамике зонда. Зонд закреплен на штативе и с помощью пружины прижимается к стенке обдирочной трубки. Таким образом экран будет находиться под таким же потенциалом, что и обдирочная трубка. Штатив расположен соосно обдирочной трубке и подвижен вдоль ее оси. Длина керамики зонда позволит измерить распределение плотности плазмы вдоль всей мишени. Штатив с помощью вильсоновского уплотнения вводится в объем через торцевой фланец.

#### 4. Заключение

На стенде была проведена работа по моделированию дифференциальной откачки без рециркуляции с трубками-сопротивлениями различной длины. Получены зависимости давления в основном объеме от расхода газа. Для трубок-сопротивлений диаметром 12,5 мм и длиной 40 мм при расходе газа  $0,008 \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  вакуум в основном объеме при включенной дифференциальной откачке улучшился в среднем в 8 раз и составил величину  $\sim 13 \times 10^{-4} \text{ Па}$ . Для трубок-сопротивлений диаметром 12,5 мм и длиной 30 мм при расходе газа  $0,008 \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  вакуум в основном объеме при включенной дифференциальной откачке улучшился в среднем в 14 раз и составил величину  $\sim 7,5 \times 10^{-4}$ . Для трубок-сопротивлений диаметром 12,5 мм и длиной 20 мм при расходе газа  $0,008 \text{ Па} \times \text{м}^3/\text{с}$  вакуум в основном объеме при включенной дифференциальной откачке улучшился в среднем в 12,5 раз и составил величину  $\sim 9,6 \times 10^{-4}$ . Из результатов следует, что использование вакуумных сопротивлений длиной 30 мм предпочтительнее. Отношение давлений во внешнем объеме с включенной и выключенной дифференциальной откачкой постоянно для любого расхода газа.

Для изучения взаимодействия пучка отрицательных ионов водорода с обдирочной мишенью был сконструирован источник электронов с энергией  $\sim 500 \text{ эВ}$  и током  $\sim 1-40 \text{ мА}$ . Для выбранной сетки оцененная расходимость пучка с энергией  $500 \text{ эВ}$  и током  $10 \text{ мА}$  на расстоянии  $50 \text{ см}$  составит  $1,6 \text{ мм}$  (без учета пространственной нейтрализации).

Изготовленный источник электронов был протестирован. При  $d=5$  мм и вытягивающим напряжением  $U=300$  В получен ток 2мА.

Для изучения параметров плазмы, получаемой в обдирочной трубке, была разработана схема измерения распределения плотности плазмы двойным ленгмюровским зондом в присутствии электронного пучка.

В ближайшее время, после установки изготовленного зонда и источника электронов на стенд будет измерено распределение плотности плазмы вдоль обдирочной трубки.

### *Список использованной литературы*

1. Принцип БНЗТ на реакции  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ,  
<http://www.inp.nsk.su/products/medicine/bnct/index.ru.shtml>.
2. Г.Е.Деревянкин, Г.И.Димов, В.М.Долгушин, А.Н.Драничников, Г.С.Крайнов, А.С.Кривенко, В.Е.Пальчиков, М.В.Петриченко, Е.И.Похлебенин, Р.А.Салимов, Г.И.Сильвестров, С.Ю.Таскаев, В.В.Широков. Перезарядная мишень 40 мА 2 МэВ ускорителя-тандема. [Препринт ИЯФ 2001-23](#). Новосибирск. 2001.
3. В.М.Долгушин, А.Н.Драничников, В.В.Кобец, Г.И.Крайнов, А.С.Кривенко, А.М.Крючков, В.В.Широков Вакуумная система установки и особенности откачки низкоэнергетического тракта и обдирочной мишени. Труды рабочего совещания по источнику эпитепловых нейтронов и резонанснопоглощаемых гамма-квантов на основе ускорителя–тандема. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1 апреля 2005.
4. А.А.Бабкин, В.И.Давыденко, А.Н.Драничников, А.А.Иванов, А.С.Кривенко, В.В.Кобец, В.В.Широков [Разработка обдирочной мишени для 10 мА, 1 МэВ пучка отрицательных ионов](#). Труды рабочего совещания по источнику эпитепловых нейтронов и резонанснопоглощаемых гамма-квантов на основе ускорителя–тандема. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1 апреля 2005.
5. V.I.Davydenko, A.N.Dranichni V.I.Davydenko, A.N.Dranichnikov, A.A.Ivanov, G.S.Krainov, A.S.Krivenko, V.V.Shirokov Stripping target of 2.5 MeV 10 mA tandem accelerator.
6. Л.Н.Розанов Вакуумная техника.