

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Омельченко Анастасия Николаевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение характеристик пучка атомов водорода для нагрева  
плазмы в токамаке TCV**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19308

**Научный руководитель:**

ассистент, С. Е. Краснопевцев,  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

н.с. А. В. Сорокин,  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В. Т. Астрелин  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Мощные пучки высокоэнергетичных нейтральных атомов - один из основных методов нагрева плазмы в установках по изучению термоядерного синтеза. Целью работы являлось изучение характеристик такого пучка для нагрева плазмы в токамаке TCV, а именно – расходимость пучка, его оптимальный ток и фокусное расстояние. Была изучена модель формирования пучка в инжекторе и способ его регистрации. Массивом вторично-эмиссионных датчиков были проведены измерения размера пучка при различных токах на разных расстояниях от ионного источника, при этом было получено значение оптимального тока пучка, когда пучок имеет минимальный размер. При помощи методов математического моделирования в программе MathCad из полученных данных были вычислены фокусное расстояние и угловая расходимость пучка по двум координатам при оптимальном токе. Измерения характеристик пучка производились при ускоряющем напряжении ниже проектного из-за отсутствия штатного источника питания. Полученный оптимальный ток пересчитывается на расчетное напряжение исходя из закона «3/2» с сохранением значений угловой расходимости и фокусного расстояния.

Ключевые слова: инжекция пучка нейтральных атомов водорода, угловая расходимость пучка, фокусное расстояние, оптимальный ток, плазма, управляемый термоядерный синтез.

## Оглавление

1	Введение .....	4
2	Теоретическая часть.....	5
3	Постановка задачи и описание экспериментальной установки .....	8
4	Результаты эксперимента .....	11
5	Обработка и анализ результатов .....	13
6	Выводы .....	15
7	Благодарности .....	15
8	Список литературы .....	15

## 1 Введение

Плазма – это ионизированный газ, состоящий, в общем случае, из любых заряженных частиц и имеющий высокую температуру. Такой газ является квазинейтральным, причем занимает достаточно большой объем, чтобы соотношение положительных и отрицательных ионов оставалось почти одинаковым [1]. Это наиболее распространенное состояние во Вселенной, однако, для получения плазмы в исследовательских целях необходимо достаточно сложное оборудование и большие энергозатраты.

Одним из важнейших приложений физики плазмы является термоядерный синтез. Пути его проведения зависят от возможного применения: это, например, термоядерное оружие, мощность которого зависит только от количества используемого ей материала – например, водорода. Разумеется, имеет место и мирное протекание такого процесса: как и в случае с бомбой, на Солнце происходит неуправляемый термоядерный синтез – так называемый «протон-протонный цикл» поддерживает существование звезды на протяжении миллиардов лет. На Земле же возможно применение термоядерной реакции как практически неисчерпаемого источника энергии. Связано оно в первую очередь с перспективой освоения технологии управляемого термоядерного синтеза.

Его проведение возможно непосредственно с помощью плазмы – высокая температура позволяет начать термоядерный синтез, который впоследствии оказывается самоподдерживающимся. Один из способов длительного сохранения плазмы в стабильном состоянии без ее контакта с поверхностью емкости, в которой она содержится – это магнитное удержание. Для магнитного захвата плазмы используется тороидальная конфигурация магнитного поля в токамаках, стеллараторах, или конфигурация магнитного зеркала [2]. Так как плазма является ионизированным газом, то, перемещаясь по спирали вокруг линий магнитного поля, она ограничивается в движении в перпендикулярном направлении.

Плазму, удерживаемую в магнитных конфигурациях, необходимо нагреть до температур в десятки килоэлектронвольт для протекания реакции синтеза. Одним из методов нагрева является инжекция мощных пучков высокоэнергетичных нейтральных атомов. Нейтральные частицы проходят внутрь магнитного поля, где ионизируются плазмой установки. Полученные ионы удерживаются в магнитном поле, где передают свою энергию плазме путем столкновений.

Итак, целью данной работы являлось изучение характеристик нейтрального пучка водорода, а именно – его расходимость, оптимальный ток и фокусное расстояние.

## **2 Теоретическая часть**

Физический принцип получения энергичных пучков атомов заключается в ускорении ионов с их последующей конверсией в атомы на газовой мишени [3]. Существует несколько способов получения таких пучков, а именно - на основе положительных и отрицательных ионов.

Инжекция на основе положительных ионов заключается в следующем: в газовом разряде образуются положительные ионы водорода, которые впоследствии извлекаются из разряда, ускоряются и формируются в пучок, после чего перерабатываются в нейтральные атомы на перезарядной мишени. Полученный поток атомов очищается от неперезарядившихся ионов и инжектируется в плазму термоядерной установки. У такого инжектора эффективность ограничивается энергией перезарядки положительных ионов. Этого недостатка лишены инжекторы на основе отрицательных ионов, однако, получение отрицательных ионов – процесс более трудоемкий, чем получение положительных ионов.

Рассмотрим элементы установки (рис.1):

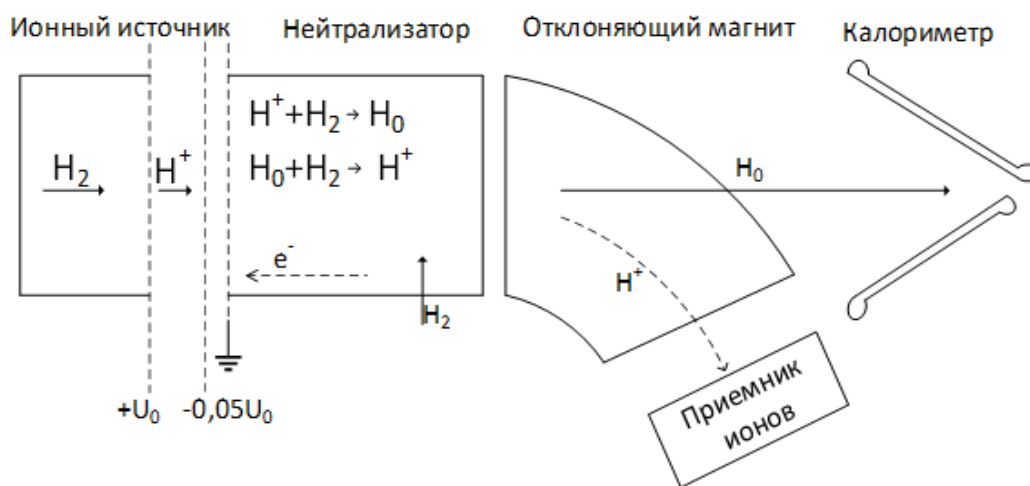


Рис.1. Схема инжектора на основе положительных ионов водорода

Ионным источником называется устройство для получения ионного пучка - пространственно сформированного потока ионов, средняя скорость

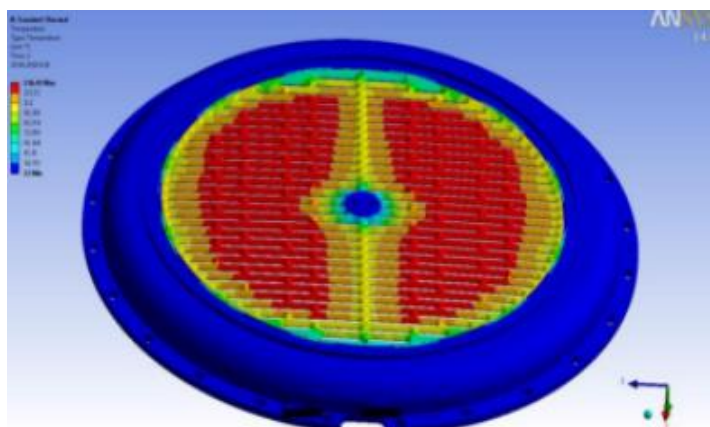


Рис.2. Структура плазменной сетки

направленного движения которого много больше хаотических тепловых скоростей составляющих его частиц. Ионный источник можно разделить на источник плазмы и ионно-оптическую систему

(ИОС). Наличие плазменной сетки (рис.2), которая непосредственно контактирует с плазмой, обуславливает извлечение пучка, его ускорение и последующее формирование [4]. Далее ионы пучка, ускоренные до потенциала, приложенного между электродами ионно-оптической системы, проходит сквозь нейтрализатор.

При возникающих реакциях в нейтрализаторе образуется вторичная плазма. В результате выделяется определенное число электронов, образующих электронный ток  $I_e$ , намного превышающий ионный ток вследствие большей подвижности. Чтобы предотвратить его попадание в ИОС, в ней устанавливается запирающая сетка, на которую подается небольшое отрицательное напряжение для создания барьера для вторичных электронов.

Важнейший выходной параметр источника — полный ток ионного пучка  $I$ . Сам пучок при этом состоит из микропучков, образованных на ИОС, а плотность потока ионов  $j$  в каждом из них меняется по сечению  $(x, y)$ . При этом в электродах с щелевыми отверстиями расхождение по  $x$  обусловлено только тепловыми эффектами, а по  $y$  — тепловыми эффектами и абберацией.

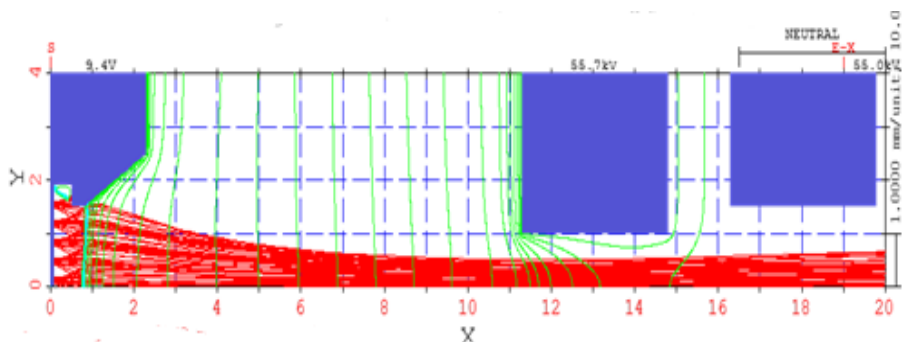


Рис.3. Расчет формирования пучка в ионно-оптической системе

Часто важно знать распределение плотности тока пучка  $j(x, y)$  на различных расстояниях от источника. Из-за неравномерности плазмы, общую оценку необходимо проводить по усредненному значению. При этом расхождением пучка в перпендикулярном направлении обусловлено возникновением тепловых эффектов, а в продольном также движением заряженных частиц в электрическом поле (рис.3). Тогда при достаточно большом расстоянии от ИОС плотность тока приобретает гауссовый вид. Так, среднюю плотность потока можно представить как:

$$j(r) = j_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_e^2}\right) \quad (1)$$

где  $r$  — радиус пучка при заданном расстоянии без учета расходимости его микропучков,  $r_e$  — радиус пучка с учетом расходимости.

При формировании пучка существенными являются два фактора: фокусировка за счет кривизны эквипотенциальных поверхностей и дефокусировка за счет наличия собственного пространственного заряда ионов пучка. Взаимная компенсация двух эффектов приводит к минимальной угловой расходимости, что возможно при некотором оптимальном токе пучка.

Кривизной и размерами сеток ИОС определяется их фокусное расстояние при заданной энергии пучка. Для этого их изготавливают сферической формы, чтобы каждое отверстие было направлено в гипотетическую точку фокуса. Так, происходит «обдирка» проходящего через щель микропучка, и в итоге для каждого из них получается распределение, которое определяет минимальный размер пучка, находящийся на уровне фокусного расстояния (см. рис.4).

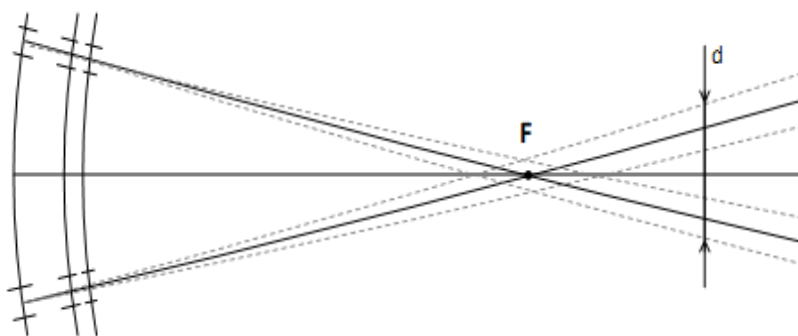


Рис.4. Расходимость пучка

Также одной из характеристик пучка также является длительность импульса. В течение этого времени возможно существование плазмы, но оно ограничено различными факторами: например, возможностью разрушения катода в разряде, неустойчивостью разряда, перегревом элементов системы.

### 3 Постановка задачи и описание экспериментальной установки

Пучки для нагрева плазмы должны отвечать определенным параметрам: энергия, мощность, длительность, сорт частиц. Кроме того, поскольку плазма в установке имеет конечный размер, так же как и соединительный порт установки, то и сформированный пучок быстрых атомов должен иметь достаточно малый поперечный размер. Исследуемый инжектор предназначен для нагрева плазмы в токамаке TCV (Tokamak à configuration variable). Характеристики пучка, указанные в спецификации: мощность 1 МВт, энергия 55 кВ, длительность импульса 2 секунды, сорт газа дейтерий [5]. Также пучок должен пройти без значительных потерь сквозь порт токамака размером 220x170 мм. Поскольку поведение пучка описывается законом Чайлд-Ленгмюра («3/2»), предварительное тестирование проводилось на меньшей



энергии и уменьшенной длительности. Это не повлияло на расходимость пучка и расположение точки фокуса. При этом ток пучка всегда можно найти, масштабируя параметры системы до нужных значений:

$$\frac{I_{ont}}{I} \approx \frac{U_{ont}^{3/2}}{U^{3/2}}, \quad (2)$$

где  $U_{ont} = 55$  кВ,  $I$  – ток пучка при энергии  $U$  в эксперименте. Кроме того, работа с дейтерием приводит к достаточно большим потокам нейтронов, и для безопасности эксперимента использовался водород. Для водородного пучка  $H_2$  состав после ионизации включает в себя  $H^+$ ,  $H_2^+$  и  $H_3^+$  (в нашем эксперименте

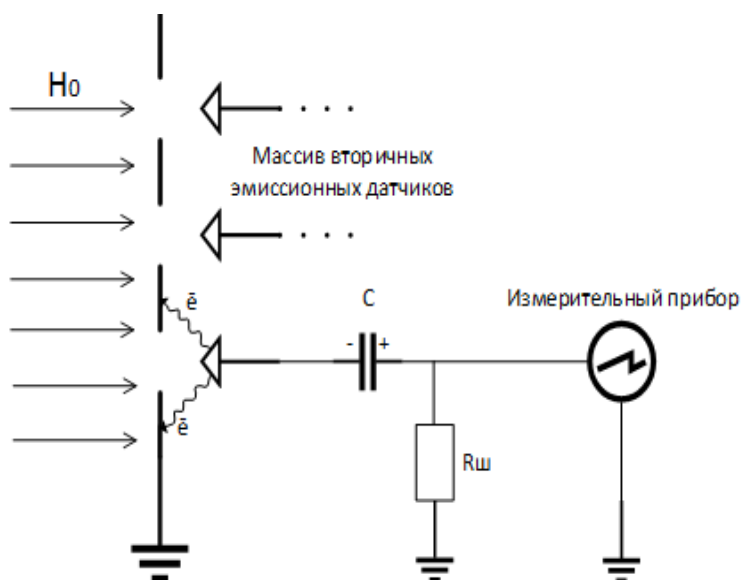


Рис.5. Схема измерения тока пучка массивом электродов

их содержание соответственно 70%, 20% и 10%), образующих в ИОС сформированный пучок.

Измерения проводились следующим образом: при постоянном ускоряющем и запирающем напряжениях менялась мощность высокочастотного разряда, следовательно, менялся

ионный ток. При этом, регистрируя интенсивность пучка на определенном расстоянии от электродов и ток системы высоковольтного питания, можно получить радиусы расходимости пучка  $R_x$  и  $R_y$  на расстоянии расположения датчиков.

Регистрация сигнала происходит в системе датчиков, которая расположена сразу после блока нейтрализатора (рис.5). В массиве исследуемого инжектора имелось 17 датчиков с расстоянием между ними по 25 мм, расположенных за коллимирующим экраном. Также в схеме находятся заряженные конденсаторы, которые создают запирающее напряжение на входе. Бомбардировка датчиков

быстрыми атомами вызывает вторичную эмиссию электронов с коэффициентом вторичной эмиссии  $K_{\text{вэ}} \sim 1,7$ . На датчики подается отрицательное напряжение смещения порядка 150 В, при котором не происходит запираания электронов между датчиками и экраном коллиматора по закону «3/2». Подача напряжения осуществляется от предварительно заряженного конденсатора, положительная обкладка которого заземлена через шунтирующее сопротивление. Ток вторичной эмиссии создает импульс напряжения на шунтирующем сопротивлении, регистрируемый аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) осциллографа. Зная диаметр отверстия перед датчиком ( $D = 2,5$  мм) и принимаемый на датчик ток  $I_{SED}$ , можно выразить плотность тока пучка из следующей формулы:

$$I_{SED} = j \frac{\pi D^2}{4} K_{\text{вэ}} \quad (3)$$

В нашем случае входное напряжение АЦП осциллографа  $U_{\text{вх}}$  ограничено величиной 10 В, что задает величину шунтирующего сопротивления  $R_{\text{ш}}$ . С учетом формулы (3) и закона Ома  $I_{SED} = U_{\text{вх}}/R_{\text{ш}}$ , можно вычислить плотность потока пучка, принимаемого одним датчиком.

Для вычисления фокусного расстояния достаточно измерить размеры пучка на различных расстояниях от ИОС. Чтобы это осуществить, в ходе эксперимента изменяли расстояние от ИОС до системы датчиков путем введения дополнительной части тракта.

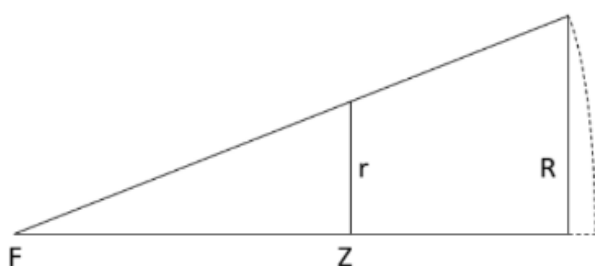


Рис.6. Схема фокусировки пучка; F - фокусное расстояние, r - радиус пучка, Z - расстояние измерения радиуса пучка, R - радиус сетки

Сделаем оценку, с помощью которой можно найти фокусное расстояние. По теореме подобия треугольников

несложно вывести формулу зависимости радиуса пучка в заданной точке Z:

$$r = R \cdot \frac{F - Z}{F} \quad (4)$$

Каждый микропучок имеет собственную расходимость. Радиус микропучка на расстоянии  $Z$  от ИОС рассчитывается по формуле  $r_0 = \text{tg}\alpha \cdot Z$ , где  $\alpha$  – угол расходимости. В первом приближении можно принять, что  $r_0 = \alpha \cdot Z$ . Тогда вычислим среднеквадратичное значение  $r_e$ , которое описывает радиус пучка с учетом расходимости микропучков:

$$r_e^2 = R^2 \left( 1 - \frac{Z}{F} \right)^2 + \alpha^2 Z^2 \quad (5)$$

Опытным путем определив радиус расходимости при заданном расстоянии и при помощи правильной математической модели, описывающей систему, можно определить фокусное расстояние.

#### 4 Результаты эксперимента

В ходе работы были проведен эксперимент с различными расстояниями между ИОС и системой регистрации пучка. Измерения велись при помощи АЦП компьютера. Было установлено, что на запирающей сетке напряжение было достаточным, чтобы запереть ток электронов  $I_e$  – при этом ток на сетке практически не изменялся.

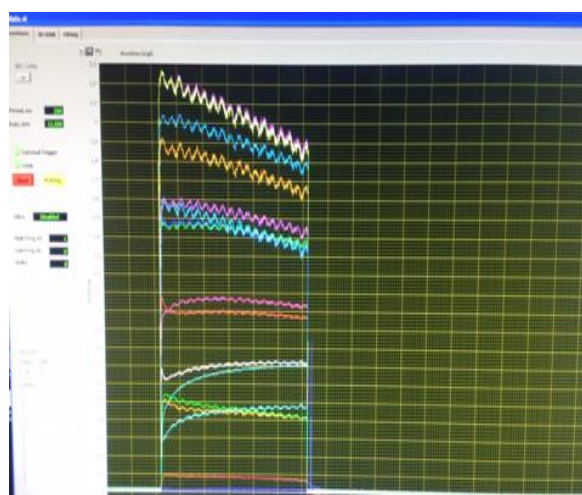


Рис.7. Регистрация сигналов с помощью АЦП ПК

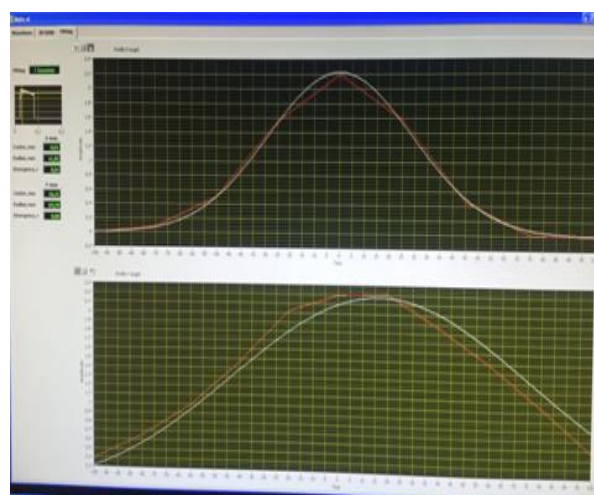


Рис.8. Аппроксимация формы пучка нормальным распределением

В первом случае длина тракта составила  $Z = 2800$  мм, радиус ИОС  $R = 12,5$  см. Измерения проводились при напряжении на плазменной сетке  $U = 27,3$  кВ.

Таблица 1. Измерения при  $Z = 2800$  мм

$I_{\text{пучок}}, \text{ А}$	$U_{\text{пучок}}, \text{ кВ}$	$I_{\text{сетка}}, \text{ А}$	$R_x, \text{ мм}$	$R_y, \text{ мм}$	$\text{Ампл.}, \text{ В}$
17,1	27,3	2,65	52,77	75,12	2,45
16,7	27,3	2,55	52,67	74,61	2,45
16,4	27,3	2,45	53,05	75,04	2,40
16,3	27,3	2,40	53,14	74,99	2,35
15,9	27,3	2,33	53,47	76,18	2,30
15,7	27,3	2,25	53,75	76,79	2,25
15,4	27,3	2,20	54,16	79,28	2,10
15,1	27,3	2,13	54,48	80,96	2,00
14,9	27,3	2,12	54,91	85,51	1,85
14,5	27,3	2,07	55,11	91,04	1,70
14,2	27,3	2,14	55,55	95,31	1,60
13,8	27,3	2,23	53,01	101,87	1,44

Во втором случае измерения велись при длине тракта  $Z = 3350$  мм и при напряжении  $U = 28,8$  кВ.

Таблица 2. Измерения при  $Z = 3350$  мм

$I_{\text{пучок}}, \text{ А}$	$U_{\text{пучок}}, \text{ кВ}$	$I_{\text{сетка}}, \text{ А}$	$R_x, \text{ мм}$	$R_y, \text{ мм}$	$\text{Ампл.}, \text{ В}$
13,0	28,8	2,05	41,60	86,90	2,25
14,4	28,8	2,10	41,60	86,70	2,30
13,8	28,8	2,17	41,50	81,40	2,50
14,2	28,8	2,23	41,87	82,57	2,50
14,3	28,8	2,20	42,21	79,43	2,50
14,7	28,8	2,25	42,30	80,80	2,65
15,2	28,8	2,32	42,30	79,60	2,70
15,5	28,8	2,40	42,70	79,10	2,70
15,5	28,8	2,35	42,90	79,00	2,80
15,8	27,8	2,45	43,00	78,80	2,85
16,2	27,8	2,55	43,02	79,07	2,85
15,8	27,8	2,43	42,98	78,35	2,80
16,3	27,8	2,55	43,42	79,74	2,85
16,9	27,8	2,70	44,01	85,22	2,80

17,2	27,8	2,75	44,03	86,31	2,80
17,2	27,8	2,70	44,32	90,00	2,75

## 5 Обработка и анализ результатов

Для обработки результатов воспользуемся математическим методом моделирования пучка. Так как отверстия сеток имеют щелевидные формы (см. рис.2), то и расходимость по координатам  $x$  и  $y$  будет различной. Тогда для определения диаметра пучка на расстоянии  $Z$  введем следующие величины:  $I$  – полный ток в ионах,  $F$  – фокусное расстояние ИОС,  $R$  – радиус ИОС,  $\psi_x$  – расходимость вдоль щели,  $\psi_y$  – расходимость поперек щели. Также введем цилиндрическую систему координат, где обозначим за  $\rho$  значение расстояния пучка от щели до проекции точки наблюдения, а за  $\varphi$  – угол между  $\rho$  и осью  $x$ . Тогда для получения выражения полной плотности тока пучка необходимо проинтегрировать плотности тока микропучков по всей площади ИОС. Это можно осуществить посредством моделирования в программе MathCad. Запишем соответствующие уравнения:

Углы расходимости пучка  $\theta_x$  и  $\theta_y$  по координатам  $x$  и  $y$  соответственно:

$$\theta_x = \arccos \left[ \frac{F \cdot z + \rho \cos(\varphi) \cdot (\rho \cos(\varphi) - x)}{\sqrt{F^2 + (\rho \cos(\varphi))^2} \cdot \sqrt{z^2 + (x - \rho \cos(\varphi))^2}} \right] \quad (6)$$

$$\theta_y = \arccos \left[ \frac{F \cdot z + \rho \cos(\varphi) \cdot (\rho \cos(\varphi) - y)}{\sqrt{F^2 + (\rho \sin(\varphi))^2} \cdot \sqrt{z^2 + (y - \rho \sin(\varphi))^2}} \right] \quad (7)$$

Плотность тока  $j$  каждого микропучка определяется следующим выражением:

$$j = \frac{I}{(\pi R^2)(\pi \cdot \psi_x \psi_y z^2)} \quad (8)$$

Т.к. пучок расходится по гауссу, можем ввести параметр распределения тока:

$$L = \exp \left[ - \left( \frac{\theta_x}{\psi_x} \right)^2 - \left( \frac{\theta_y}{\psi_y} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Тогда общий ток пучка, зависящий от координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ , выражается формулой:

$$J = j \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R L \cdot \rho \cdot d\rho d\varphi \quad (10)$$

С заданными параметрами системы были обработаны данные и, в результате подбора параметров фокусного расстояния и расходимости вдоль и поперек щели, получен график зависимости тока от координаты так, чтобы минимум расходимости приходился на полученный экспериментально оптимальный ток:

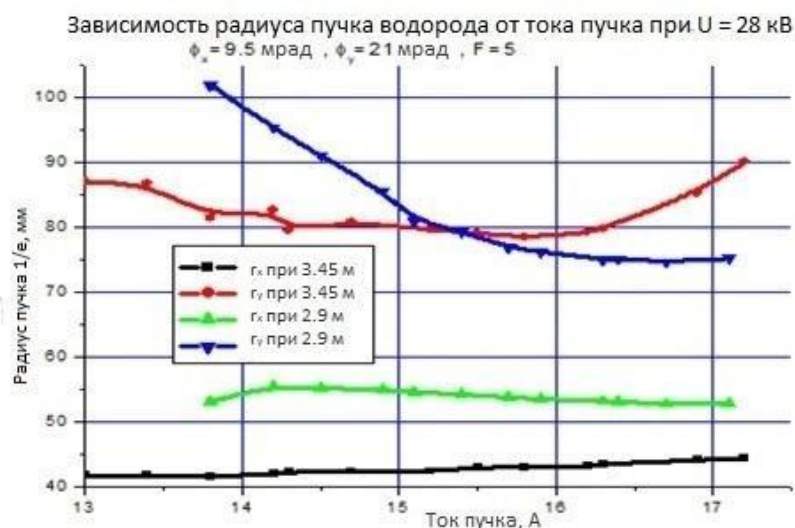


Рис.9. Зависимость радиуса пучка при различном токе

Таким образом, расходимости пучка составили значения  $\phi_x = 9,5$  мрад,  $\phi_y = 21$  мрад; фокусное расстояние  $F = 5$  м.

Ошибки могли возникать по следующим причинам: во-первых, это точность измерительных приборов и точность изготовления деталей установки. Последние могли внести наиболее существенную погрешность. Во-вторых, это используемая модель описания пучка. На самом деле, распределение плотности тока пучка имеет гауссовый вид только в пределе (при удалении от ИОС). В реальности же это оценочное предположение, которое существенно упрощает расчеты. В-третьих, это неидеальность подаваемого ВЧ питания. Но, т.к.

эксперимент проводился не при максимальной мощности, это практически не влияло на результат.

## **6 Выводы**

В ходе выполнения работы были изучены основы получения высокоэнергетичных пучков нейтральных атомов водорода для инъекции в токамак TCV. Также были изучены характеристики прохождения пучка по системам инжектора. В результате испытаний были получены значения тока пучка и его расходимости при различных расстояниях до системы измерения.

Были найдены параметры пучка при напряжении на плазменной сетке  $U = 28$  кВ. При расстоянии  $Z = 2800$  мм найден оптимальный ток пучка  $I = 16,7$  А. При  $Z = 3250$  мм оптимальный ток  $I = 15,8$  А. В общем случае при  $U = 55$  кВ, оптимальный ток составил значение  $I = 41$  А. Методом математического моделирования были определены угловые расходимости пучка  $\varphi_x = 9,5$  мрад,  $\varphi_y = 21$  мрад и фокусное расстояние  $F = 5$  м.

С учетом возможности пересчета параметров на более высокую мощность с сохранением значений фокусного расстояния и угловой расходимости, были проведены предварительные испытания инжектора и сделана оценка его характеристик.

## **7 Благодарности**

Выражаю благодарность составу лаборатории 9-0 Института ядерной физики им. Г. И. Будкера за возможность написания курсовой работы на базе кафедры плазмы. Также выражаю благодарность в руководстве и в помощи написания курсовой работы Алексею Валерьевичу Сорокину.

## **8 Список литературы**

1. Сивухин Д. В., Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004.

2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитное\\_удержание\\_плазмы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитное_удержание_плазмы)
3. «Инжекторы быстрых атомов водорода», Н. Н. Семашко, А. Н. Владимиров, В. В. Кузнецов и др. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. «Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ», ж. «Успехи физических наук», том 188, № 6 // июнь 2018г – Ю. И. Бельченко, В. И. Давыденко, П. П. Дейчули, И. С. Емелев, А. А. Иванов, В. В. Колмогоров, С. Г. Константинов, А. А. Краснов, С. С. Попов, А. Л. Санин, А. В. Сорокин, Н. В. Ступишин, И. В. Шиховцев, А. В. Колмогоров, М. Г. Атлуханов, Г. Б. Абдрашитов, А. Н. Драничников, В. А. Капитонов, А. А. Кондаков.
5. 1 MW high energy neutral beam for the TCV tokamak, Final design report (25.06.2019, Novosibirsk).