

*На правах рукописи*



Куркучеков Виктор Викторович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ПОЛУЧЕННОГО В  
МУЛЬТИАПЕРТУРНОМ ИСТОЧНИКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ  
ЭМИТТЕРОМ**

01.04.08 — физика плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ГАВРИЛОВ Николай Васильевич – доктор технических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики УО РАН, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией.

КЛИМОВ Александр Сергеевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «18» сентября 2020г. в «12:15» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН и на сайте [http://www.inp.nsk.su/images/diss/Kurkuchekov\\_disser.pdf/](http://www.inp.nsk.su/images/diss/Kurkuchekov_disser.pdf/)

Автореферат разослан «23» июля 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П. А. Багрянский

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования.

Слаборелятивистские ( $\gamma \sim 1$ ) пучки электронов с мощностью 1–10 МВт и субмиллисекундной длительностью импульса представляют собой уникальный и гибкий инструмент, востребованный во многих научных и технологических сферах. На сегодняшний день, данный класс пучков активно применяется в различных исследованиях, посвященных развитию открытых ловушек, моделированию импульсных тепловых нагрузок на элементы конструкции установок термоядерного класса, модификации поверхности материалов и др.

В контексте открытых ловушек, в настоящее время, осевой инжекции электронных пучков отводятся две ключевые функции [1]. Во-первых, стабилизация и управление плазмой в открытой ловушке с термоядерными параметрами. В качестве данного инструмента электронные пучки призваны обеспечить контроль электрического потенциала плазмы даже при высокой электронной температуре и хорошем продольном удержании, когда непосредственный электрический контакт плазмы с торцевыми электродами становится недостаточным или неэффективным. Во-вторых, создание предварительной плазмы с параметрами необходимыми для дальнейшего эффективного нагрева с помощью ECR или атомарных пучков.

Большой интерес, на сегодняшний день, вызывает применение интенсивных электронных пучков для моделирования импульсных тепловых нагрузок на элементы конструкции и материалы будущих термоядерных установок, таких как токамак ИТЕР [2]. Быстрые переходные процессы в плазме токамаков, такие как ELM (Edge Localized Modes) или срывы, являются наиболее серьезными источниками тепловой нагрузки, которая может повредить вольфрамовую обшивку дивертора. Хотя на современных токамаках исследуются различные методы, призванные к снижению тепловой нагрузки, на данный момент нельзя полностью исключить возможность таких событий в установках реакторного класса. В этих случаях тепловые нагрузки могут достигать плотности энергии 5–80 МДж/м<sup>2</sup>, плотности мощности 5–25 ГВт/м<sup>2</sup> за время нагрева 0,3–3 мс. Данные тепловые нагрузки соответствуют значениям параметра теплового потока 600–2000 МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0.5</sup> [3;4], выходящим далеко за пределы уровня нагрузок в современных токамаках.

На сегодняшний день, активно применяются несколько техник, позволяющих изучить поведение материалов при термических нагрузках, сопоставимых с нагрузками в будущих термоядерных установках [5]. Одной из них является использование мощных электронных пучков. К преимуществам данного подхода относятся гибкость параметров и довольно однородная тепловая нагрузка на большой и хорошо определенной области. Кроме того, относительно слабое сопутствующее излучение позволяет использовать оптические диагностики для наблюдения за динамикой эрозии поверхности исследуемого образца.

Наряду с перечисленными, актуальным приложением данного класса пучков является воздействие на поверхностный слой металлов с целью придать новые физические и химические свойства, недоступные традиционным технологиям. Тепловое воздействие электронного пучка с плотностью мощности  $5\text{--}50\text{ ГВт/м}^2$  при длительности импульса от десятков до сотен микросекунд вызывает очень быстрый нагрев, плавление и последующую закалку поверхностного слоя [6–8]. В результате в зоне термического воздействия происходят микроструктурные преобразования, улучшающие свойства материала, такие как шероховатость поверхности, твердость, коррозионная стойкость и т. д.

Для всех перечисленных приложений важной представляется информация о пространственных и угловых характеристиках электронного пучка. Так, очевидно, что для адекватной оценки тепловой нагрузки на мишень необходима информация о распределении тока. В тоже время угловые характеристики важны при транспортировке и компрессии пучка во внешнем магнитном поле.

На сегодняшний день, в ИЯФ СО РАН создан и функционирует экспериментальный стенд ВЕТА (Beam of Electrons for material Testing Applications) [9]. Целью работ на данном стенде является экспериментальное моделирование воздействия тепловых нагрузок на элементы и материалы конструкции, контактирующие с плазмой, в масштабах характерных для ИТЭР. В качестве основных источников тепловых нагрузок, способных привести к повреждению поверхности вольфрама в диверторе ИТЭР, рассматриваются срывы и ELM типа I. Для моделирования сопоставимых тепловых нагрузок на стенде ВЕТА используется источник электронного пучка с плазменным эмиттером и мультиапертурной ЭОС [10]. Данный источник позволяет получать пучки

с мощностью до 10 МВт при ускоряющем напряжении 50–110 кВ и длительности импульса 0,1–3 мс.

Конструкция источника основана на использовании плазменного эмиттера на базе дугового разряда с холодным катодом. Использование плазменного эмиттера представляется наиболее адекватным для прикладных задач, ввиду относительной простоты и надежности данного типа эмиттера. Так, взрывоэмиссионный катод обеспечивает большую плотность тока (100–200 А/см<sup>2</sup>), однако образующаяся в результате взрывной эмиссии плазма распространяется со скоростью 10<sup>6</sup> см/с и закорачивает ускоряющий зазор, что значительно усложняет получение пучка требуемой длительности. Подобных трудностей не возникает при использовании накаливаемых катодов. Но использование последних сопряжено с рядом проблем инженерного характера, а именно: обеспечением равномерного нагрева тела катода, отводом излучаемого тепла и деградацией катода под действием обратного потока ионов и продуктов эрозии мишени.

Для формирования пучка в данном источнике используется мультиапертурная электронно-оптическая система (ЭОС). Подобные системы широко используются в ИЯФ СО РАН при создании инжекторов нейтральных атомов для нагрева плазмы. Мультиапертурная ЭОС позволяет получать полный пучок как совокупность отдельных пучков из каждой апертуры. Альтернативу мультиапертурной системе представляет ЭОС с мелкоячеистой сеткой [11], при работе с данной системой в пространстве дрейфа пучка необходимо создание плазменного анода, требующее специальных газовых условий.

В экспериментах на стенде ВЕТА пучок электронов транспортируется во внешнем магнитном поле. Для достижения требуемых плотностей мощности на мишени осуществляется магнитная компрессия пучка с коэффициентом 10–100. В данной постановке интерес представляют угловые характеристики пучка, ограничивающие степень компрессии пучка. Кроме того, для определения параметров теплового воздействия на мишень ключевой является информация о распределении тока пучка по сечению, в том числе информация о возможных неоднородностях распределения, связанных, например, с дискретной структурой электродов ЭОС.

Таким образом, ряд прикладных задач, как и дальнейшее развитие технологии генерации электронных пучков на основе плазменного

эмиттера требует знаний о пространственно-угловых характеристиках пучка. **Целью** данной работы является экспериментальное изучение пространственных и угловых характеристик мощного электронного пучка полученного в источнике с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной ЭОС.

Для достижения данной цели в рамках работы предполагалось решение следующих **задач**:

1. Создание комплекса диагностик, позволяющего получить информацию о распределении тока пучка. Исходя из прикладных задач, целесообразным является измерение распределения плотности тока как до, так и после сжатия пучка. Пространственное разрешение диагностик должно быть достаточным для разрешения неоднородностей распределения масштаба сетчатой структуры ЭОС.
2. Создание диагностики, позволяющей проводить измерения угловых характеристик пучка при его транспортировке во внешнем магнитном поле.
3. Разработка методов калибровки диагностик, обработки и анализа данных.
4. Проведение экспериментального изучения угловых и пространственных характеристик мощного электронного пучка. Определение зависимости регистрируемых параметров пучка от параметров эксперимента (тока пучка, энергии электронов, величины ведущего магнитного поля и др.)

### **Научная новизна**

1. Впервые выполнено детальное исследование пространственных характеристик электронного пучка, сформированного в источнике на основе мультиапертурной ЭОС и плазменного катода со свободной эмиссионной поверхностью, транспортируемого в ведущем магнитном поле. Экспериментально показана возможность получения гладкого поля облучения на плоскости мишени, несмотря на изначально дискретную, многоструйную структуру пучка.
2. Найден оригинальный подход, позволяющий с помощью изображающей рентгеновской диагностики измерить вклад каждой отдельной апертуры ЭОС в полный эмиссионный ток.
3. Показано, что начальная угловая расходимость скоростей электронов и не полная зарядовая компенсация являются достаточными условиями для «размывания» дискретной структуры пучка.

4. Впервые выполнено исследование угловых характеристик электронного пучка в системе с мультиапертурной ЭОС и плазменным эмиттером. Показано, что угловая расходимость пучка определяется диаметром эмиссионного отверстия и величиной диодного промежутка и в экспериментально достижимом диапазоне параметров практически не зависит от величины тока эмиссии и ускоряющего напряжения.

### **Научная и практическая значимость**

Экспериментально измерены пространственно-угловые характеристики пучка, представляющие интерес для ряда практических приложений.

Результаты по измерению пространственных характеристик пучка могут быть использованы для оценки удельной нагрузки на исследуемые образцы при моделировании импульсных тепловых нагрузок, либо при электронно-лучевой обработке металлов. При этом, требуемый уровень нагрузок может быть достигнут за счет компрессии пучка в магнитном поле, поэтому информация о его угловых характеристиках представляет интерес. Кроме того, угловые характеристики пучка являются критически важными при инъекции в открытые плазменные ловушки.

Материалы диссертации в целом могут быть использованы для дальнейшего развития технологии генерации мощных электронных пучков с использованием плазменного эмиттера.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально продемонстрирована возможность достижения гладкого распределения плотности тока пучка в поперечном сечении, при том, что на старте пучок имеет дискретную, многоструйную структуру и транспортируется в ведущем магнитном поле.
2. В экспериментах и численных расчетах показано, что наличие нескомпенсированного пространственного заряда пучка приводит к «размытию» изначально дискретной структуры, не устранимому подстройкой величины ведущего поля и энергии электронов.
3. Было продемонстрировано, что в источнике с одиночным осевым дуговым генератором плазмы, находящимся в продольном магнитном поле, возможно получение пучков с достаточно

большим поперечным сечением. Для ЭОС диаметром 85 мм с 241 апертурой перепад тока эмиссии между центральными и периферийными апертурами составлял ~70%

4. Продемонстрировано, что угловые характеристики пучка, полученного в мультиапертурном источнике с плазменным эмиттером, определяются конфигурацией ЭОС и не зависят от величины тока пучка (в диапазоне 1–80 А) и ускоряющего напряжения (в диапазоне 60–100 кВ). Предложено объяснение наблюдаемым зависимостям и выполнено численное моделирование, согласующееся с экспериментальными данными.
5. Продемонстрировано, что для пучка с током 80 А, энергией электронов 100 кэВ и длительностью 140 мкс, при коэффициенте магнитной компрессии  $R=36$ , плотность поглощенной вольфрамовой мишенью мощности нагрева достигает 25 ГВт/м<sup>2</sup>, что соответствует параметру теплового потока  $\sim 300$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-0,5</sup> и сопоставимо с уровнем нагрузок, ожидаемым во время переходных процессов (срывы и ELM типа I) в будущих термоядерных установках.

### **Достоверность**

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается хорошей воспроизводимостью, в том числе с использованием независимых диагностик. При разработке диагностик и методов обработки данных был проанализирован большой объем материала, полученного на других источниках пучков заряженных частиц. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Приведённые выводы сформулированы на основе большого массива экспериментальных данных.

### **Личный вклад**

Автор диссертации принимал активное участие в постановке задачи, разрабатывал все применяемые в работе диагностики, участвовал в проведении эксперимента, проводил анализ полученных результатов, проводил численное моделирование, а также участвовал в подготовке публикаций.

### **Апробация работы**

Доклады о работах по теме диссертации были представлены на следующих международных конференциях: Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Цукуба, Япония, 2012), Open Magnetic Systems for



Plasma Confinement (Тэджонг, Южная Корея, 2014), 18th International Symposium on High Current Electronics (Томск, Россия, 2014), 19th International Symposium on High Current Electronics (Томск, Россия, 2016), EAPPC and BEAMS (Эшторил, Португалия, 2016), 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (Цукуба, Япония, 2017), International Conference on Fusion Reactor Materials (Аомори, Япония, 2017). Результаты диссертации опубликованы в российских и зарубежных научных журналах.

### **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 публикациях, 3 из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web Of Science и Scopus, 4 — в сборниках трудов международных конференций.

### **В изданиях из списка ВАК РФ:**

1. Novel Injector of Intense Long Pulse Electron Beam for Linear Plasma Devices /Kurkuchekov V.V., Astrelin V.T., Avrorov A.P. et al. //Fusion Science andTechnology. — 2013. — Vol. 63, no. 1T. — Pp. 292–294
2. V. T. Astrelin et al., Generation and transport of submillisecond intense electron beams in plasma cathode vacuum diodes. Vacuum. 143, 495–500 (2017).
3. V. Kurkuchekov, I. Kandaurov, Y. Trunev, 2D imaging X-ray diagnostic for measuring the current density distribution in a wide-area electron beam produced in a multiaperture diode with plasma cathode. Journal of Instrumentation. 13 (2018).

### **В сборниках трудов конференций:**

1. Heating of tungsten target by intense pulse electron beam / Yu A Trunev,AS Arakcheev, AV Burdakov et al. // AIP Conference Proceedings / AIP Pub-lishing LLC. — Vol. 1771. — 2016. — P. 060016.
2. Novel electron beam based test facility for observation of dynamics of tungstenerosion under intense ELM-like heat loads / Vyacheslavov L., Arakcheev A.,Burdakov A. et al. //AIP Conference Proceedings. — 2016. — Vol. 1771,no. 1. — Pp. 44–48.

3. Kurkuchekov, V., Astrelin, V., Kandaurov, I., & Trunev, Y. (2017). Angular distribution of beam electrons in a source with arc plasma emitter. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 830).
4. Kandaurov, I. V., Kurkuchekov, V. V., & Trunev, Y. A. (2017). Study of electron beam uniformity in large-area multi-aperture diode with arc plasma cathode. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 830). Institute of Physics Publishing.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 139 страниц с 58 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 86 наименований.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

В **первой главе** приведено описание условий эксперимента на установке ГОЛ-3 и стенде ВЕТА. Генерация электронного пучка осуществлялась с помощью источника с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной ЭОС. На Рисунке 1 приведена схема источника электронного пучка и внешний вид электродов ЭОС. Для создания эмиссионной плазмы использовался импульсный дуговой генератор с холодным катодом. В качестве рабочего газа использовался аргон, напускавшийся быстрым электромагнитным клапаном через отверстие в катоде дугового генератора.

Для формирования пучка использовалась мультиапертурная диодная ЭОС, катодный и анодный электроды которой представляют собой «решетки» с 241 отверстием, просверленным в гексагональном порядке (Рисунок 1). Отверстия выставлялись соосно с хорошей точностью при сборке диода. Диаметр отверстий на катоде и на аноде составлял 2/3 мм и 4,4 мм, соответственно, зазор диода варьировался в пределах 7–12 мм.

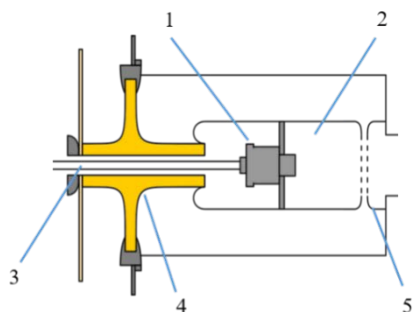


Рисунок 1 — Схема инжектора пучка и внешний вид электродов ЭОС. 1 – дуговой генератор плазмы, 2 – плазменный экспандер (полый анод дуги) с эмиссионным электродом (катод диода), 3 – кабели питания дугового генератора и трубка подвода газа, 4 – высоковольтный изолятор, 5 – вытягивающий электрод (анод диода)

Существующая система питания позволяет получать пучки электронов с широким диапазоном параметров: ток пучка 1–100 А, ускоряющее напряжение 45–110 кВ при длительности импульса до нескольких миллисекунд.

**Вторая глава** диссертации посвящена измерению пространственных характеристик несжатого пучка. Приведен обзор методик, применяемых для измерения распределения плотности тока пучков заряженных частиц. Предложена простая диагностическая система на основе рентгеновской камеры-обскуры.

Эксперименты с рентгеновской камерой-обскурой проводили на установке ГОЛ-3, схема эксперимента показана на Рисунке 2. Источник электронного пучка был установлен в концевой вакуумный бак установки. Электронный пучок транспортировался в слабо сходящемся продольном магнитном поле, создаваемом катушками концевой бака, на расстояние 1,2 м, где принимался на плоскую металлическую мишень, расположенную под углом  $45^\circ$  к оси установки. В качестве материала

приёмника пучка был выбран молибден. Рентгеновое изображение отпечатка пучка на мишени регистрировали камерой-обскурой, схема которой показана в рамке А, Рисунок 2. Камера выполнена в виде ящика, с передней стенкой из свинцового листа для защиты от паразитной рентгеновской засветки. В передней стенке имеется специальная вставка из медно-вольфрамового композита толщиной 15 мм.

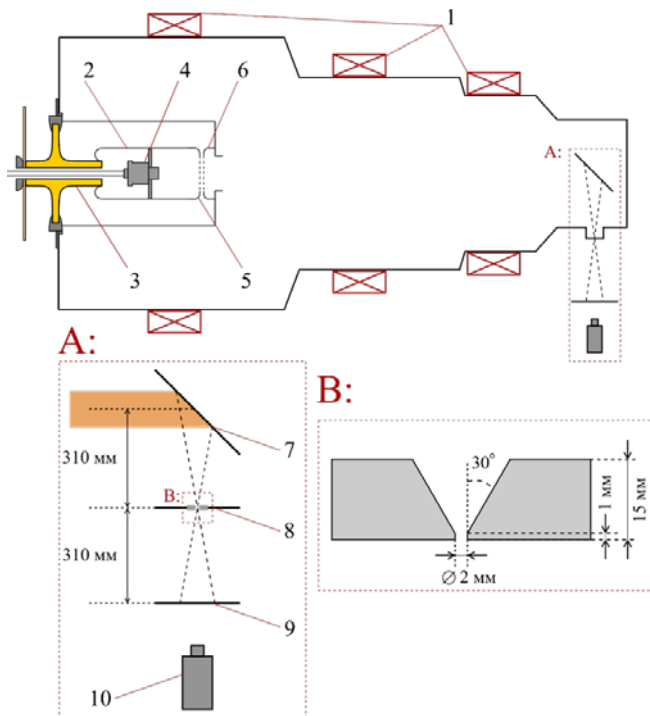


Рисунок 2 — Схема эксперимента с рентгеновской камерой-обскурой:

- 1 – катушки магнитного поля, 2 – высоковольтный электрод, 3 – высоковольтный изолятор, 4 – дуговой генератор плазмы, 5 – молибденовые вставки с эмиссионными отверстиями, 6 – анод диода, 7 – приёмник пучка, 8 – вставка из медно-вольфрамового композита с отверстием камеры-обскуры, 9 – люминофорный экран, 10 – ПЗС-камера.

В данной вставке выполнено цилиндрическое отверстие камеры-обскуры, диаметром 2 мм, переходящее в коническое, с углом раствора конуса 30°

(рамка В, Рисунок 2). Рентгеновское изображение проецируется на люминофорный экран (здесь и далее использовали люминофор на основе окси-сульфида гадолия), свечение которого фиксировали цифровой ПЗС-камерой SDU-285. Экспериментально была проверена линейность регистрируемой яркости изображения от плотности потока падающих электронов. Пространственное разрешение диагностики было измерено в тестовых экспериментах и составило 4,5 пар линий/см при уровне контрастности 10%.

Эксперименты с рентгеновской камерой-обскурой выявили ряд ограничений данной схемы, не позволяющих получить контрастное изображение отпечатка пучка во всём диапазоне экспериментальных параметров без ухудшения пространственного разрешения. В качестве решения была предложена альтернативная схема измерения распределения тока пучка, примененная в экспериментах на стенде ВЕТА (Рисунок 3).

Электронный пучок транспортировался в продольном магнитном поле, создаваемом катушками концевого бака, на расстояние 0,85 м, где принимался на плоскую металлическую мишень, расположенную перпендикулярно к оси установки. Приёмник пучка представлял собой тонкую металлическую пластину и служил в качестве рентгеновского конвертера. Материал и толщина конвертера выбирали из соображений получения максимального количества света и минимального нагрева конвертера за один импульса пучка. В экспериментах использовали стальную пластину толщиной 1 мм. Для визуализации рентгеновского отпечатка пучка использовали люминофорный экран. Свечение люминофора фиксировали с помощью быстрой цифровой камеры SDU-285 и зеркала, расположенного под углом  $45^\circ$  к оси установки. Пространственное разрешение диагностики было измерено экспериментально и составило 4 пары линий/см при контрастности 10%. По сравнению с рентгеновской камерой-обскурой использование «сэндвича» – металлический коллектор-люминофор, позволяет получать контрастные изображения отпечатка пучка в значительно более широком диапазоне параметров, в том числе при малых значениях тока и энергии пучка.

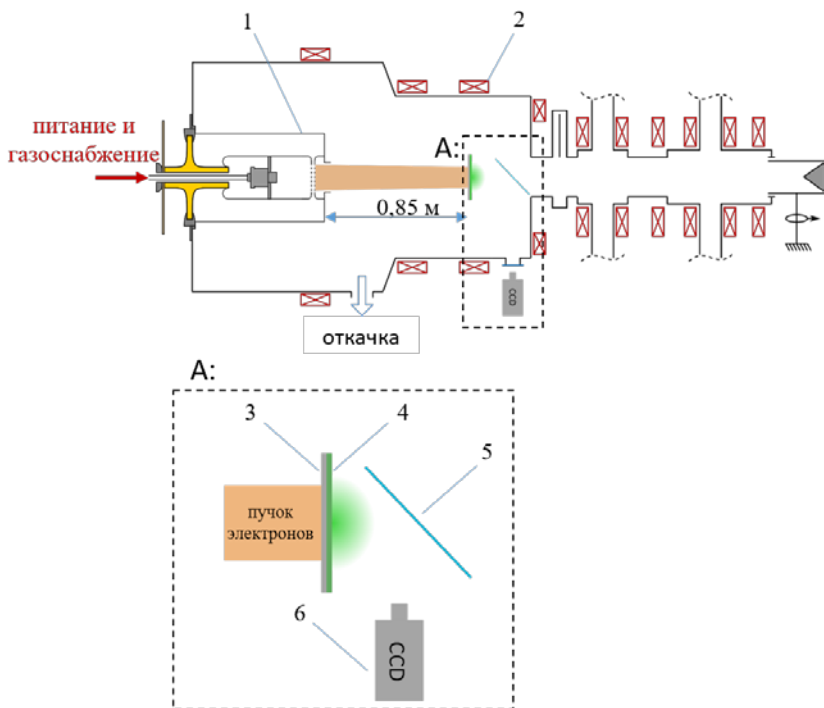


Рисунок 3 — Схема эксперимента по измерению пространственных характеристик пучка: 1 – источник пучка электронов, 2 – катушки магнитного поля, 3 – металлическая мишень (рентгеновский конвертер), 4 – люминофорный экран, 5 – зеркало, 6 – ПЗС-камера.

Результаты измерений пространственных характеристик электронного пучка, полученного в источнике с дуговым плазменным катодом и мультиапертурной ЭОС приведены в **третьей главе**. Показано, что изначально дискретная, многоструйная структура пучка сохраняется при его транспортировке в ведущем магнитном поле, если ток пучка достаточно мал ( $<5^\circ\text{A}$ ). Наличие угловой расходимости скоростей электронов приводит к радиальным колебаниям огибающей отдельных струек. Соответствующим подбором ускоряющего напряжения и (или) величины ведущего магнитного поля, можно достичь как дискретного, так и гладкого (за счет перекрытия границ соседних струек) распределения

тока пучка в плоскости мишени. Пример рентгеновских отпечатков пучка приведен на Рисунке 4.

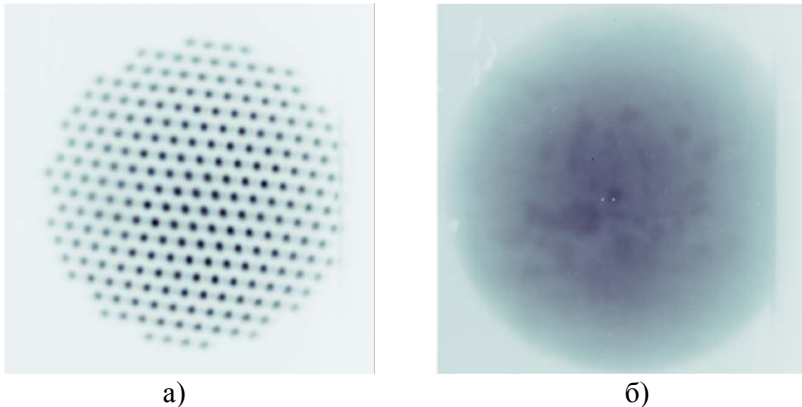


Рисунок 4 — Примеры изображений рентгеновского отпечатка пучка: а – дискретный («многоструйный») отпечаток, б – гладкий отпечаток пучка на мишени.

Регистрация дискретной структуры пучка позволяет оценить величины эмиссионного тока в каждой отдельной апертуре непосредственно на выходе из ускорительного диода. Изображения пучка показывают, что эмиссия происходит во всех апертурах ЭОС с эффективным диаметром 83 мм. Перепад величины тока эмиссии в центральных и периферийных апертурах составляет около 70%.

По мере увеличения тока пучка свыше  $\sim 5$  А наблюдается «размытие» дискретного распределения вне зависимости от энергии электронов пучка и величины ведущего магнитного поля. Численным моделированием показано, что данный эффект может быть объяснен влиянием пространственного заряда пучка.

В экспериментах наблюдалось вращение пучка вокруг своей оси. Направление вращения соответствует дрейфу в скрещенных полях: внешнем магнитном и радиальном электрическом поле. Радиальное электрическое поле обусловлено наличием пространственного заряда. По измеренной величине угла поворота в зависимости от тока пучка проведены оценки степени компенсации пространственного заряда пучка. Согласно этим оценкам, эффективный уровень компенсации пространственного заряда  $\geq 50\%$ .

**Четвертая глава** посвящена измерению пространственных характеристик электронного пучка после магнитной компрессии. Схема диагностики приведена на Рисунке 5.

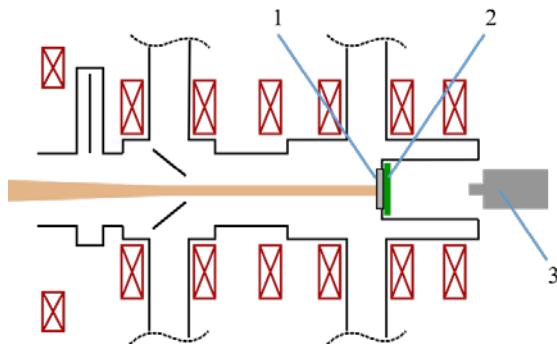


Рисунок 5 — Схема измерения распределения тока сжатого пучка: 1 – приемник пучка/рентгеновский конвертер, 2 – люминофор, 3 – ПЗС-камера.

Электронный пучок транспортировался и сжимался в магнитном поле пробочной конфигурации. В районе максимума магнитного поля, на расстоянии  $\sim 2$  м от источника, пучок принимался на металлический приемник – рентгеновский конвертер. Положение конвертера совпадает с положением мишени в экспериментах по моделированию импульсных тепловых нагрузок. Получившееся рентгеновское излучение проходит сквозь тело конвертера, стенку вакуумной камеры и попадает на сцинтиллятор. Видимое свечение сцинтиллятора регистрировали с помощью быстрой ПЗС-камеры. Пространственное разрешение диагностики измерялось экспериментально и составило  $\sim 3$  пары линий на сантиметр, при уровне контрастности 10%.

Распределение тока сжатого пучка, наблюдаемое с помощью данной диагностики, хорошо описывается функцией Гаусса. Характерный размер пучка (определенный как  $2\sigma$ ) изменяется в зависимости от коэффициента магнитной компрессии согласно с потоком магнитного поля. На Рисунке 6 приведены примеры снимков отпечатка пучка при различных значениях коэффициента компрессии. Соответствующие профили тока приведены под снимками, синяя кривая – коэффициент компрессии 58, красная кривая –  $R = 10$ .



Пространственного разрешения данной диагностики не достаточно для наблюдения дискретного распределения тока пучка. Однако, его достаточно для оценки уровня тепловой нагрузки на поверхности мишени.

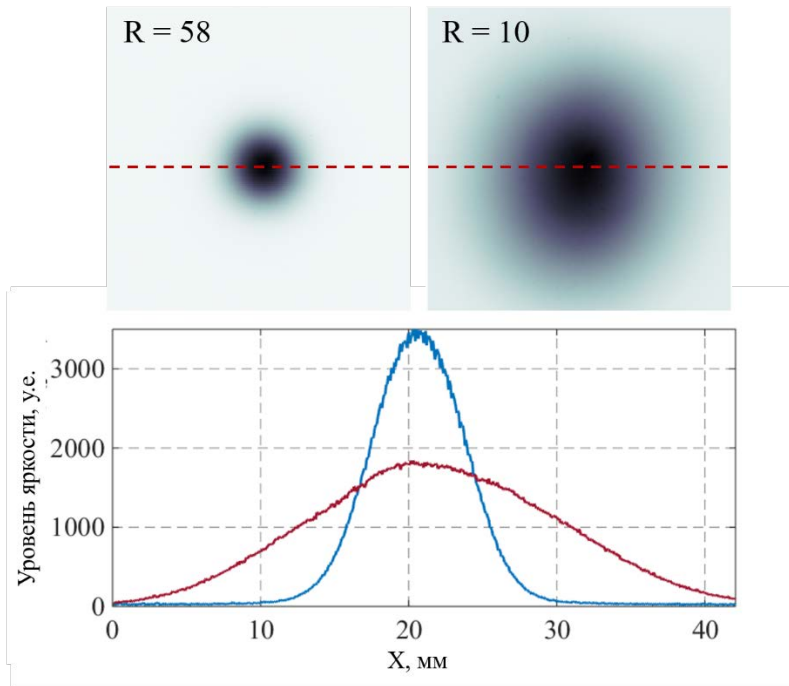


Рисунок 6 — Сравнение отпечатка пучка при различных значениях коэффициента магнитной компрессии

Для пучка с током 80 А, энергией электронов 100 кэВ и длительностью 140 мкс при коэффициенте магнитной компрессии  $R=36$  плотность мощности, поглощенная вольфрамовой мишенью, достигает  $25 \text{ ГВт/м}^2$ , что соответствует параметру теплового потока  $\sim 300 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0.5}$ . Данный уровень тепловых нагрузок сопоставим с нагрузками, ожидаемыми во время переходных процессов (срывы и ELM типа 1) в будущих установках реакторного типа.

Наблюдать дискретную структуру сжатого пучка на поверхности металлической мишени удалось с помощью тепловизионной диагностики. Форма наблюдаемого дискретного распределения полностью соответствует геометрии ЭОС. Дискретная структура пучка позволяет

судить о степени его компрессии. Показано, что степень сжатия пучка согласуется с пробочным коэффициентом магнитного поля. Также продемонстрировано, что подбирая параметры пучка и транспортировки, можно добиться гладкого распределения тока сжатого пучка на мишени.

**Пятая глава** посвящена исследованию угловых характеристик пучка. В данной главе приведен обзор различных методик, применяющихся для измерения углового разброса пучков заряженных частиц. Исходя из экспериментальных условий и опыта регистрации распределения тока пучка, был выбран метод "реpper pot". Схема эксперимента приведена на Рисунке 7. Пучок принимался на маску – металлическую пластину с массивом отверстий. Получившиеся в результате бимлеты принимались на тонкую металлическую фольгу (рентгеновский конвертер) расположенную на небольшом расстоянии за маской. Для визуализации рентгеновских отпечатков бимлет использовался люминофорный экран, расположенный непосредственно за фольгой. Свечение люминофора фиксировали с помощью зеркала и быстрой цифровой камеры. Угловой разброс электронов пучка определялся по уширению бимлет.

Особое внимание уделяли выбору параметров диагностики и методике обработки результатов, что позволило нивелировать влияние внешнего магнитного поля, собственных полей пучка и аппаратной функции диагностики на измеряемые величины.

Исследованы угловые характеристики электронного пучка, генерируемого в мультиапертурном диоде с плазменным эмиттером. Показано, что распределение электронов по углам хорошо описывается функцией Гаусса.

В экспериментах с различными конфигурациями ЭОС продемонстрирована зависимость угловых характеристик пучка от величины ускоряющего зазора и диаметра эмиссионного отверстия. Для ЭОС с диаметром эмиссионных отверстий 2 мм и ускоряющим зазором 10,5 мм осуществлена транспортировка пучка в магнитном поле с пробочным отношением  $R = 200$ , при прохождении 80% тока пучка. Для ЭОС с диаметром эмиссионных отверстий 3 мм и ускоряющим зазором 8,5 мм в поле с  $R = 100$  проходит лишь 50% тока пучка.

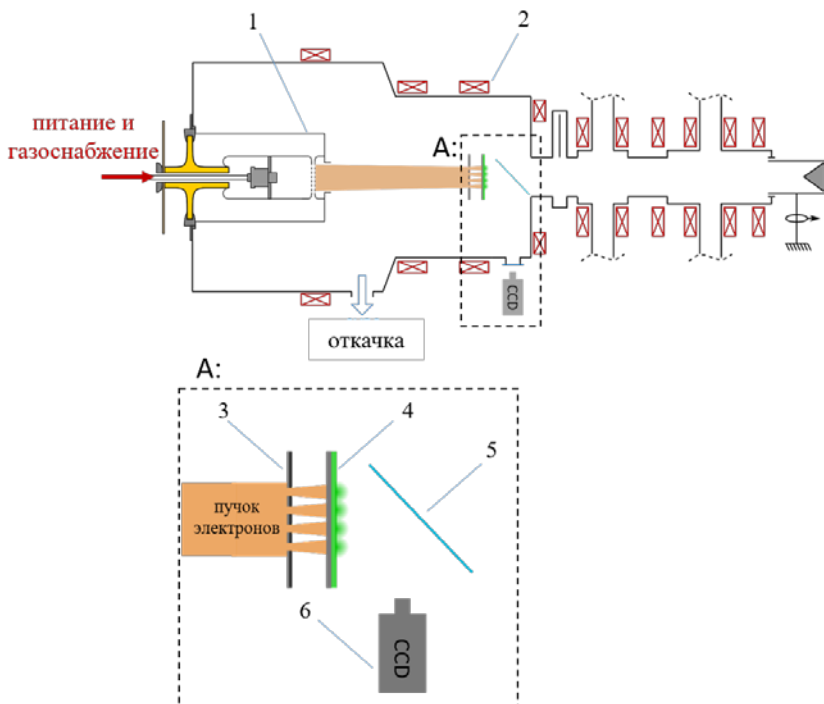


Рисунок 7 — Схема эксперимента по измерению угловых характеристик пучка: 1 – источник пучка электронов, 2 – катушки магнитного поля, 3 – маска, 4 – рентгеновский конвертер и люминофорный экран, 5 – зеркало, 6 – ПЗС-камера.

Измеренные угловые характеристики согласуются с экспериментальными данными по прохождению пучка сквозь магнитную пробку, при различных величинах пробочного отношения. При этом, в экспериментально доступном диапазоне параметров, угловые характеристики не зависят от величины тока эмиссии и ускоряющего напряжения.

Показано, что ограничивающим фактором для транспортировки пучка сквозь магнитную пробку, помимо стартовой угловой расходимости, являются собственные электрическое и магнитное поле пучка.

Проведено сравнение полученных результатов с расчетами в пакете CST studio. Полученные с помощью моделирования результаты качественно согласуются с экспериментом. Так, распределения

электронов по величине питч-угла как в расчетах, так и в эксперименте имеют форму близкую к функции Гаусса. Среднеквадратичная ширина модельных распределений примерно в 1,7 раза больше наблюдаемых в эксперименте. При этом, форма и ширина вычисленных распределений не зависят от величины тока и ускоряющего напряжения, в экспериментально доступном диапазоне параметров.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. В экспериментах по измерению пространственных характеристик пучка получены следующие результаты:

1. Разработаны рентгеновские изображающие диагностики, позволяющие измерить в одном рабочем импульсе распределение плотности тока электронного пучка в его поперечном сечении. С помощью этих диагностик выполнены экспериментальные исследования пространственных характеристик пучка, сформированного в мультиапертурном плазмозмиссионном диоде, до и после магнитного сжатия.
2. Показано, что изначально дискретная, многоструйная структура пучка сохраняется при его транспортировке в ведущем магнитном поле, если ток пучка достаточно мал. Наличие угловой расходимости скоростей электронов приводит к радиальным колебаниям огибающей отдельных струек, составляющих пучок. Соответствующим подбором ускоряющего напряжения и (или) величины ведущего магнитного поля, можно достичь как дискретного, так и гладкого (за счет перекрытия границ соседних струек) распределения тока пучка в плоскости мишени.
3. Регистрация дискретной структуры пучка дает инструмент для измерения величины эмиссионного тока в каждой отдельной апертуре непосредственно на выходе из ускорительного диода. Изображения пучка показывают, что эмиссия происходит во всех апертурах ЭОС с эффективным диаметром 83 мм. Перепад величины тока эмиссии в центральных и периферийных апертурах составляет около 70%.
4. По мере увеличения тока пучка свыше  $\sim 20$  А наблюдается «размытие» дискретного распределения, вне зависимости от энергии электронов пучка и величины ведущего магнитного поля.

Численным моделированием показано, что данный эффект может быть объясним влиянием пространственного заряда пучка.

5. В экспериментах наблюдается вращение пучка, обусловленное наличием пространственного заряда. По измеренной величине угла поворота в зависимости от тока пучка проведены оценки степени компенсации пространственного заряда пучка. Согласно этим оценкам, уровень компенсации пространственного заряда  $\geq 50\%$ .
6. При транспортировке пучка в ведущем магнитном поле, возрастающем от  $\sim 5\text{--}10$  мТл в области диода до  $\sim 0,2\text{--}0,4$  Тл в плоскости мишени, сжатие пучка по сечению происходит в хорошем согласии с компрессией потока ведущего магнитного поля.

При исследовании угловых характеристик пучка были получены следующие результаты:

1. Разработана рентгеновская изображающая диагностика, позволяющая измерять методом “perfor pot” угловое распределение электронов в нескольких точках поперечного сечения пучка за один импульс. С помощью этой диагностики получены экспериментальные данные по угловым характеристикам электронного пучка, формируемого в мультиапертурном диоде с плазменным эмиттером. Показано, что угловое распределение скоростей электронов хорошо описывается функцией Гаусса со стандартным отклонением  $\sigma \sim 0,03\text{--}0,08$  рад, в зависимости от геометрии ЭОС.
2. В экспериментах с различными конфигурациями ЭОС измерена зависимость угловых характеристик пучка от величины диодного зазора и диаметра эмиссионного отверстия. Для ЭОС с наименьшим диаметром эмиссионных отверстий (2 мм) и наибольшим ускоряющим зазором (10,5 мм) продемонстрирована транспортировка пучка в магнитном поле с пробочным отношением  $R=200$ , при 80% прохождении тока пучка.
3. Показано, что в экспериментально доступном диапазоне параметров (60–100 кэВ и 20–80 А) угловые характеристики пучка практически не зависят от величины тока эмиссии и ускоряющего напряжения. Выдвинуто предположение, что это связано со слабой чувствительностью формы и положения эмитирующей

границы к параметрам пучка, ввиду малости его первеанса. Проведено численное моделирование электронной оптики единичной апертуры с учетом свободной плазменной эмиссионной границы. Результаты моделирования согласуются с экспериментом.

4. Расчеты прохождения пучка сквозь магнитную пробку, выполненные на основе измеренных угловых характеристик, демонстрируют согласие с результатами экспериментов по определению коэффициента транспортировки пучка в магнитном поле пробочной конфигурации при различных величинах пробочного отношения, тока и энергии электронов.
5. Показано, что наряду со стартовыми питч-углами, фактором, ограничивающим прохождение пучка через магнитную пробку, является наличие нескомпенсированного пространственного заряда пучка.

### Список литературы

- [1] Иванов А.А., Приходько В.В. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы //Успехи физических наук. — 2017. — Т. 187, №. 5. — с. 547–574.
- [2] Project ITER goals. <https://www.iter.org/sci/Goals>
- [3] A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status / Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. //Journal of Nuclear Materials. — 2013. —no. 438 (SUPPL). — Pp. S48–S56.
- [4] In-vessel dust and tritium control strategy in ITER / M Shimada, RA Pitts, S Ciattaglia et al. //Journal of Nuclear Materials. — 2013. — Vol. 438. —Pp. S996–S1000.
- [5] T. Hirai, K. Ezato, P. Majerus. ITER Relevant High Heat Flux Testing on Plasma Facing Surfaces //Materials Transactions. — 2005. — Vol. 46, no. 3.— Pp. 412–424.
- [6] Physical foundations for surface treatment of materials withlow energy, high current electron beams / Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E.and Ivanov Yu.F., Markov A.B. //Surface and Coatings Technology. —2000. — Vol. 125, no. 1-3. — Pp. 49–56
- [7] Application of Pulsed Electron Beams for Improvement of Material Surface Properties / Mueller G., Engelko V., Bluhm H. et al. //AIP Conference Pro-ceedings. — 2002. — Vol. 650, no. 325.

- [8] A facility for metal surface treatment with an electron beam / Koval' N.N., Shchanin P.M., Devyatkov V.N. et al. //Instruments and Experimental Tech-niques. — 2005. — Vol. 48, no. 1. — Pp. 117–121.
- [9] Novel electron beam based test facility for observation of dynamics of tungsten erosion under intense ELM-like heat loads / Vyacheslavov L., Arakcheev A.,Burdakov A. et al. //AIP Conference Proceedings. — 2016. — Vol. 1771, no. 1.— Pp. 44–48.
- [10] Novel Injector of Intense Long Pulse Electron Beam for Linear Plasma Devices /Kurkuchekov V.V., Astrelin V.T., Avrorov A.P. et al. //Fusion Science and Technology. — 2013. — Vol. 63, no. 1Т. — Pp. 292–294.
- [11] В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин. Генерация и транспортировка сильноточных низко энергетичных электронных пучков в системе с газонаполненным диодом //Журнал технической физики. — 1998. — Т. 68, No 1.— С. 44–48.

Куркуचेков Виктор Викторович

ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ПОЛУЧЕННОГО В  
МУЛЬТИАПЕРТУРНОМ ИСТОЧНИКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ  
ЭМИТТЕРОМ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 6.07.2020 г. Подписано в печать 7.07.2020 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*