

Додулад Эмиль Игоревич

**Влияние конфигурации электродов на эмиссионные
свойства разряда типа сильноточная
низкоиндуктивная вакуумная искра**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва - 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Савёлов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Паперный Виктор Львович, доктор физико-математических наук, профессор,
зав. кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВПО «ИГУ»

Волков Георгий Степанович, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Отделения физики токонесущей плазмы ФГУП
ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Ведущая организация:

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Защита состоится « 18 » декабря 2013 года в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «18» ноября 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Импульсные плазменные источники частиц и излучения (лазерные и электроразрядные) актуальны для различных применений, включая нанотехнологии, медицину, биофизику.

Большое количество исследований импульсных плазменных источников посвящено разряду типа сильноточная низкоиндуктивная вакуумная искра (СНВИ), рабочим веществом которого является материал электродов. Благодаря тому, что излучающая область данного разряда имеет микронные размеры, и значительная часть спектра ее излучения лежит в достаточно мягкой рентгеновской области, разряд может использоваться в проекционной рентгенографии, обеспечивая высокую контрастность и пространственное разрешение изображения исследуемого объекта. Вследствие малой длительности импульса рентгеновского излучения, испускаемого разрядом, он может использоваться как инструмент исследования быстропротекающих плазменных и иных процессов. Кроме того разряды типа СНВИ являются источниками с высокой плотностью потока заряженных частиц. Это открывает перспективы их использования в экстремальном материаловедении и при разработке средств диагностики импульсной плотной плазмы.

Достоинствами установок на основе разряда типа СНВИ являются простота их конструкции, возможность работы в квазичастотном режиме, достаточно большой ресурс работы и невысокая стоимость. Кроме того, физические процессы, протекающие в различных Z-пинчевых разрядах, имеют много общего, и физические закономерности, выявленные на небольших установках, могут иметь место и на других более крупных установках.

Однако, создание разряда с параметрами, оптимизированными для его практического использования, затруднено тем, что до сих пор отсутствует полное понимание того, какие начальные параметры и каким образом влияют на динамику протекания разряда, а, следовательно, и на его излучательные характеристики. В ходе ряда эмпирических исследований отмечено влияние на

разряд таких начальных параметров как геометрия электродной системы (форма, размеры и взаимное расположение электродов), полярность напряжения на электродах, начальный энерговыход в разряд. Но вышеупомянутые исследования проводились на установках с различающейся конфигурацией электродной системы (геометрией и полярностью электродов), при разных параметрах разрядной цепи, различных системах инициирования разряда, что могло различным образом влиять на динамику развития разряда вакуумной искры.

Актуальность представляемой работы заключается в получении систематической информации о влиянии на характеристики СНВИ начальных параметров и определении на ее основании условий оптимизации разряда как источника рентгеновского излучения или заряженных частиц. При этом важно, чтобы исследования проводились при различной конфигурации электродной системы, но в одинаковых условиях, с одинаковыми параметрами разрядной цепи и системы инициирования разряда.

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются:

1. Исследование влияния конфигурации электродной системы на излучательные характеристики разряда типа СНВИ в рентгеновском диапазоне.
2. Определение абсолютной величины энергии рентгеновского излучения, испущенного разрядом, в зависимости от начального энерговыхода в разряд.
3. Определение параметров корпускулярных потоков, эмитируемых разрядом СНВИ.

В соответствии с поставленными целями в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка методики определения вклада материалов электродов в плазму по рентгеновским спектрам излучения разряда.
2. Определение влияния геометрии и полярности электродов установки на основе разряда типа СНВИ на вклад материалов электродов в плазму разряда и на его эмиссионные характеристики.

3. Анализ спектра излучения разряда в рентгеновском диапазоне, определение зависимости коэффициента преобразования электрической энергии в энергию излучения в зависимости от конфигурации электродной системы и начального энерговклада в разряд.
4. Определение параметров импульсных плазменных потоков, эмитируемых разрядом типа СНВИ.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:

1. Разработана методика определения вклада материалов электродов в плазму микропинчевого разряда типа СНВИ по K_{α} -спектрам излучения данных материалов.
2. Впервые обнаружено, что при использовании электродных конфигураций с внутренним острым катодом, вне зависимости от геометрии анода, продукты эрозии обоих электродов вносят сравнимый по величине вклад в излучающую в K_{α} линиях плазму; в конфигурациях с внешним катодом наблюдается излучение материала лишь одного из электродов, при этом в случае острого внутреннего анода достигается наибольшая степень сжатия плазмы с образованием ярких точечных источников излучения.
3. Определено, что в геометрии «острие-острие» полная энергия рентгеновского излучения ($\geq 4,5$ кэВ), эмитированного разрядом, в 5 раз превышает аналогичный показатель для геометрии «острие-плоскость».
4. Впервые определена плотность потока плазмы в периферийной области разряда на различных расстояниях от оси разряда с помощью комплексной методики, созданной для определения газодинамического давления и параметров зарядовой компоненты.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Разработанная методика определения вклада материалов электродов в плазму разряда сильноточной вакуумной искры по K_{α} -спектрам излучения данных материалов может быть применена на широком классе плазменных установок.
2. Определены конфигурации электродной системы обеспечивающие наибольшую эффективность пинчевания с образованием горячей точки,

при этом с преобладающим вкладом в излучающую плазму разряда материала одного из электродов. Эта информация важна для задачи оптимизации разряда СНВИ как точечного источника рентгеновского излучения.

3. Для создания источника рентгеновского излучения (с энергией квантов $\geq 4,5$ кэВ) рекомендовано использование конфигурации электродов «острие-острие», обеспечивающей в 5 раз большую полную энергию рентгеновского излучения при одинаковых энергозатратах, чем использование электродной системы «острие-плоскость».
4. Определенные величины газодинамического давления (до 70 бар, на расстоянии 8 мм) и плотности потока плазмы (до 10^{24} см⁻²с⁻¹) накладывает ограничения на конструктивные особенности установки, такие как: толщина стенок камеры, размер и форма тоководов в камере, конструкция узлов крепления электродов.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Разработана и апробирована методика определения относительного вклада материалов электродов в плазму разряда сильноточной вакуумной искры по *K*-спектрам излучения данных материалов и экспериментально выявлена роль каждого из электродов в формировании излучающей плазмы.
2. Показано влияние конфигурации электродной системы на эмиссионные характеристики плазмы СНВИ. Конфигурация электродной системы задает начальное распределение напряженности электрического поля в приэлектродных областях и, тем самым, определяет величину тока эмиссии с поверхности электрода и механизм поступления продуктов эрозии в межэлектродное пространство.
3. Для исследованных конфигураций электродной системы определена геометрия, обеспечивающая максимальный коэффициент *k* преобразования электрической энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в энергию рентгеновского излучения, эмитированного разрядом. В геометрии «острие-острие» *k* в 5 раз превышает аналогичный показатель для

геометрии «острие-плоскость» и остается постоянным при различном энергокладе в режиме микропинчевания разряда.

4. С помощью комплексной диагностики определена плотность потока плазмы в периферийной области разряда СНВИ на различных расстояниях от оси разряда и при различных значениях энергоклада в разряд.

Личный вклад соискателя

Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке, проведении и обработке результатов всех представленных в работе экспериментов.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и изложена на 123 страницах машинописного текста, включая 41 рисунок, 7 таблиц и список литературы, содержащий 138 наименований.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в данной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: II Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Саров, Россия, 2008; VI-VIII Российские семинары «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», Москва, Россия, 2008, 2010, 2012; ежегодная конференция «Научная сессия НИЯУ «МИФИ», Москва, 2009, 2010, 2011, 2012; VII-IX Курчатовская молодежная научная школа, Москва, Россия, 2009, 2010, 2011; XXXVIII и XL Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, Россия, 2011, 2013; XIV и XV Всероссийские конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14 и ДВП-15, Звенигород, Россия, 2011, 2013.

Публикации

По теме диссертации была опубликована 31 печатная работа, в том числе, 3 статьи в реферируемых журналах из перечня ВАК (2 из которых входят в базы данных Web of Science и Scopus).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит обзор литературных источников, посвященных исследованию влияния различных начальных условий на динамику протекания разряда СНВИ, а также анализ методов рентгеновской и корпускулярной диагностики плазмы.

В разрядах сильноточной низкоиндуктивной вакуумной искры при токах порядка 100 кА и выше наблюдается образование ионов высокой кратности ионизации, вплоть до водородоподобных, в так называемых «горячих точках» (ГТ), формирующихся при микропинчевании плазмы. Область формирования ГТ является интенсивным источником характеристического рентгеновского излучения. Благодаря тому, что излучающая область разряда имеет микронные размеры, и значительная часть спектра ее излучения лежит в достаточно мягкой рентгеновской области, он может использоваться в проекционной рентгенографии, обеспечивая высокую контрастность и пространственное разрешение изображения исследуемого объекта. Благодаря малой длительности существования ГТ разряд может использоваться в качестве источника излучения при исследовании быстропротекающих плазменных и иных процессов.

Целенаправленное сопоставление результатов исследований на различных установках типа СНВИ показывает, что формирование микропинчей происходит в плазме материала внутреннего электрода, независимо от его полярности. Подобное предположение представляется важным для более полного понимания сути явлений, приводящих к образованию ГТ. Однако эти исследования проводились на установках с различающейся геометрией

электродных систем, при разных параметрах разрядной цепи и различных системах инициирования разряда. Большинство авторов не уделяет достаточного внимания описанию конструкции разрядного контура, что может различным образом повлиять на динамику развития разряда СНВИ.

В ряде публикаций отмечено влияние начального энерговклада в разряд на формирование ГТ, а, следовательно, и на эмиссионные свойства разряда [1], [2].

Большой объем информации о динамике разряда дают рентгеновские методы диагностики. Их анализ позволил выделить следующие:

- спектроскопические методы, которые дают возможность определить температуру плазмы, ее элементный состав, а применение спектрографов с пространственным разрешением позволяет получить локальную информацию об излучающих областях разряда в различных спектральных диапазонах;
- термолюминисцентные детекторы (ТЛД), позволяющие получить абсолютную величину энергии излучения, испущенного разрядом и поглощенного в детекторе в широком спектральном диапазоне.

Исследование корпускулярных потоков из области разряда низкоиндуктивной вакуумной искры дает информацию о динамике протекания разряда, позволяет вычислить основные параметры плазмы – температуру и концентрацию. Одним из параметров, описывающих потоки плазмы из области разряда, является газокINETическое давление. Информация о давлении плазмы, кроме того, необходима при моделировании взаимодействия высокоэнергетичных потоков плазмы с мишенью. Прямые измерения давления потоков плазмы в разряде датчиками, встроенными в мишень, зачастую невозможны по причине недостаточной электрической и механической прочности датчика. В таких случаях целесообразным является использование непрямых методов.

Одним из достаточно распространенных методов диагностики плазмы является использование зондов, в том числе многосеточных. При простоте измерений, для которых не требуется специальная сложная аппаратура,

многосеточный зонд позволяет определить энергетический спектр заряженных частиц эмитируемых плазмой, их плотность, и, кроме того, дополняет результаты экспериментов, проведенных с помощью других методик. Однако при проведении экспериментов с применением электрических зондов следует учитывать вносимое ими возмущение в исследуемую плазму и влияние вторичных процессов на поверхности зонда при его взаимодействии с заряженными частицами[3].

На основании проведенного анализа литературных источников определяются методы и способы решения поставленных перед автором диссертации задач.

Глава 2 посвящена подготовке экспериментальной установки к проведению исследований для решения задач, поставленных в диссертации.

Исследования производились на установке «Зона-2» (НИЯУ «МИФИ») [4] с разрядным устройством типа сильноточная низкоиндуктивная вакуумная искра. Основные характеристики установки и схема электродной системы представлены соответственно в таблице 1 и на рис. 1.

Подвод электрической энергии к межэлектродному промежутку

осуществляется с помощью коаксиального токовода. Электрод, расположенный на внутреннем тоководе – внутренний электрод, электрод, расположенный на внешнем тоководе – внешний (рис.1).

Каждый из электродов установки имел форму либо плоского цилиндра высотой 10 мм, диаметром 20 мм со сквозным центральным отверстием диаметром 3 мм, либо заостренного стержня диаметром 3 мм. Всего исследовалось 4 варианта конфигурации электродной системы: плоский внешний электрод, острый внутренний электрод; плоский внутренний

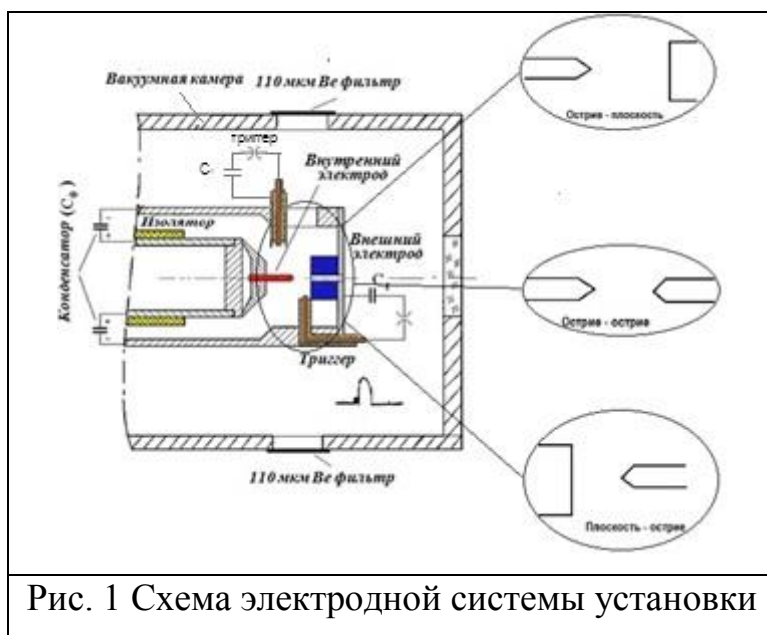
Таблица 1 Характеристики установки «Зона-2»	
Конденсатор: суммарная ёмкость: рабочее напряжение: общая индуктивность: период разряда: максимальный разрядный ток:	КМК-30-10 <i>20 мкФ</i> <i>до 25 кВ</i> <i>90 нГн</i> <i>8,5 мкс</i> <i>160 кА при 15 кВ</i>
Вакуумная откачка	Диффузионный насос, <i>200 л/с</i>
Инициирование разряда (триггер)	Вспомогательный поверхностный разряд

электрод, острый внешний электрод; оба электрода имеют острый форму; оба электрода плоские. При этом электроды изготавливались из различных материалов, один из меди, а другой из малоуглеродистой стали с содержанием железа ~98%. В ходе исследований также изменялась полярность электродов.

Инициирование разряда во всех экспериментах осуществлялось со стороны катода с помощью вспомогательного триггера. Для уменьшения влияния материала триггера на результаты измерений его электроды были изготовлены из тугоплавких металлов. Для получения информации о распределении электрических полей в межэлектродном промежутке было проведено их численное моделирование с помощью кода Elcut 5.9.

Результаты проведенного моделирования показали что, в геометрии «острие-плоскость»


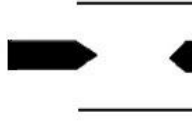

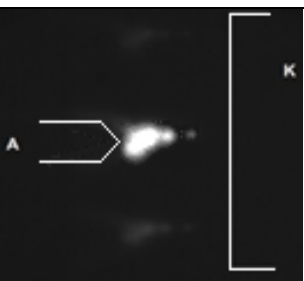
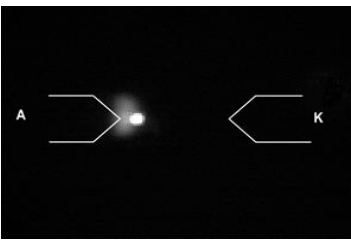
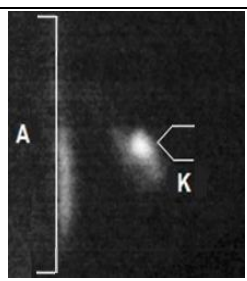

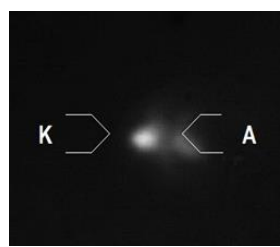
напряженность электрического поля у поверхности внутреннего острого электрода более чем в 1,5 раза выше, чем у поверхности плоского электрода. В геометрии «острие-острие» напряженность электрического поля у поверхности



внутреннего острого электрода выше напряженности у поверхности внешнего в 1,3 раза из-за наличия экранировки последнего внешним тоководом. Также следует отметить, что в конфигурациях с внутренним плоским электродом напряженность электрического поля у его поверхности максимальна у его боковой кромки, в отличие от конфигураций с внешним плоским электродом, где напряженность поля максимальна у поверхности на расстоянии, примерно, 1/4 радиуса от центра.

Для исследования спектров излучения разряда были выбраны два фокусирующих спектрографа с пространственным разрешением ФСПР-1Д/2Д [5], разработанных во ВНИИФТРИ. Для получения оптимальных параметров их настройки возникла необходимость приблизить диспергирующий элемент спектрографа к исследуемому разряду. Для этих целей к основному вакуумному объему была пристыкована дополнительная вакуумная камера меньших размеров, в которой размещалась электродная система разряда.

Таблица 2. Рентгеновские обскурограммы разряда, полученные при различной геометрии и полярности электродов

Геометрия / полярность	 Острие - плоскость	 Острие - острие	 Плоскость - острие
Положительный внутренний электрод			
Отрицательный внутренний электрод			Н/Д

Для оперативного контроля режима микропинчевания применялась система регистрации рентгеновских обскурограмм в режиме реального времени. [6]. С помощью данной методики было исследовано пространственное распределение источников рентгеновского излучения плазмы разряда НВИ при различных конфигурациях электродной системы (табл. 2).

Для геометрии «плоскость-острие» при отрицательной полярности внутреннего плоского электрода развивался паразитный пробой на внешний токопровод, шунтирующий разрядный промежуток. Аналогичная ситуация

наблюдалась при геометрии «плоскость-плоскость», при любой полярности электродов.

Таким образом, для проведения дальнейших исследований были отобраны конфигурации электродной системы «острие – плоскость» и «острие – острие» (при различной полярности электродов), и конфигурация «плоскость – острие» при отрицательной полярности внешнего острейного электрода.

Глава 3 посвящена исследованию влияния конфигурации электродной системы на состав плазмы разряда сильноточной вакуумной искры и процесс микропинчевания. Эксперименты основаны на регистрации К-спектров характеристического излучения материалов электродов. Выбор K_α линий обусловлен их высокой интенсивностью и возможностью их регистрации спектрографом с высоким разрешением.

Для регистрации линий K_α излучения были использованы два фокусирующих спектрографа с пространственным разрешением ФСПР-1Д/2Д [5], собранные по схеме Иоганна. Спектрографы располагались с противоположных сторон вакуумной камеры установки, и каждый настраивался на свой материал электрода. Вывод излучения осуществлялся через Ве фильтры толщиной 110 мкм.

Для учета влияния расстояния до источника излучения, ослабления в воздухе и различия коэффициентов отражения диспергирующего кристалла в различных порядках была разработана методика оценки вклада основных элементов, входящих в состав, электродов в плазму разряда с перекрестной заменой материалов электродов.

Содержание материала анода a и катода c в общей концентрации частиц в разряде при данной конфигурации вычисляется по формулам:

$$a = \frac{D_{Cu}^{an}}{(k_s \cdot D_{Fe}^{cat} + D_{Cu}^{an})} \quad \text{и} \quad c = \frac{k_s \cdot D_{Fe}^{cat}}{(k_s \cdot D_{Fe}^{cat} + D_{Cu}^{an})} \quad (1),$$

где $k_s = \frac{k_{Cu}}{k_{Fe}} = \sqrt{\frac{D_{Cu}^{an} \cdot D_{Cu}^{cat}}{D_{Fe}^{cat} \cdot D_{Fe}^{an}}}$, D - плотность почернения пленки при регистрации спектрографом, настроенным на линии $K\alpha$ материала соответствующего

электрода, k_i – коэффициент, учитывающий чувствительность спектрографа, ослабление излучения в воздухе и вероятность излучения K_α фотонов данным веществом в разряде. В ходе проведения исследований обнаружено, что при использовании электродных конфигураций с внутренним острым катодом, вне зависимости от геометрии анода, продукты эрозии обоих электродов вносят сравнимый по величине вклад в излучающую в K_α линиях плазму, в конфигурациях с внешним катодом наблюдается излучение материала лишь одного из электродов при этом в случае острого внутреннего анода достигается наибольшая степень сжатия плазмы с образованием ярких точечных источников излучения. Наблюдаемая картина может объясняться тем, что конфигурация электродной системы задает начальное распределение величины напряженности электрического поля в приэлектродных областях, от которой зависит величина тока автоэлектронной эмиссии с поверхности электрода. В результате возможно изменение механизма, ответственного за поступление продуктов эрозии катода в межэлектродное пространство, и меняется распределение материала данного электрода в межэлектродном пространстве. Сводная таблица результатов исследования вклада материалов электродов представлены в таблице 3. По результатам проведенных экспериментов были сделаны следующие выводы:

- образование микропинча наблюдается преимущественно в парах острого электрода, при этом наибольшая эффективность пинчевания с образованием плазменной точки достигается при положительной полярности острого внутреннего электрода;

- при использовании электродных конфигураций с внутренним острым катодом, вне зависимости от геометрии анода, продукты эрозии обоих электродов вносят сравнимый по величине вклад в излучающую в K_α линиях плазму, что, вероятно, связано с зависимостью механизма, ответственного за поступление продуктов эрозии электродов в межэлектродное пространство от величины напряженности электрического поля в приэлектродных областях.

Таблица 3. Наличие эмиссии $K\alpha$ линий материалов электродов при различной конфигурации электродной системы			
Геометрия	«острие – плоскость»	«острие – острие»	«плоскость – острие»
Прямая полярность	Излучение вещества острейного электрода протяженностью 2-3 мм начиная от его поверхности, излучение вещества плоского электрода отсутствует	Излучение вещества внутреннего электрода протяженностью 2-3 мм начиная от его поверхности, излучение вещества внешнего электрода отсутствует	Излучение вещества плоского электрода отсутствует, излучение вещества острейного электрода из области 2 мм в середине промежутка
Обратная полярность	Излучение вещества острейного электрода из области 3 мм в середине промежутка, излучение вещества плоского электрода протяженностью 2-3 мм начиная от его поверхности	Излучение вещества внутреннего электрода из области 2 мм в середине промежутка, излучение вещества внешнего электрода протяженностью 2-3 мм начиная от его поверхности	н/д
Примечание	Наблюдается спектр Неподобных ионов материала острейного электрода. Величины вклада материалов внешнего плоского анода и внутреннего острейного катода в излучающую плазму СНВИ: $a_{пл.внешн}=0,55\pm 0,05,$ $c_{остр.внутр.}=0,45 \pm 0,05$	Наблюдается спектр Неподобных ионов материала острейного анода. Величины вклада материалов внешнего острейного анода и внутреннего острейного катода в излучающую плазму СНВИ: $a_{остр.внешн}=0,49\pm 0,06,$ $c_{остр.внутр.}=0.51 \pm 0,06$	При отрицательной полярности внутреннего плоского электрода развивался паразитный пробой на внешний токопровод, шунтирующий разрядный промежуток

Глава 4 посвящена исследованию спектра разряда СНВИ с помощью термолуминесцентных детекторов.

Спектры рентгеновского излучения регистрировались при различных конфигурациях электродов и при разных значениях прикладываемого к межэлектродному промежутку напряжения.

Эксперименты проводились с помощью многоканального спектрометра со сборками термолуминесцентных детекторов, закрытых алюминиевыми фильтрами различной толщины (рис 2). Детектор помещался внутрь установки на расстоянии 6 см от оси разряда. Использование наборов тонких алюминиевых фильтров позволило регистрировать рентгеновское излучение в

выбранном для исследований диапазоне $\geq 4,5$ кэВ. Спектр излучения разряда восстанавливался с помощью метода эффективных энергий [7].

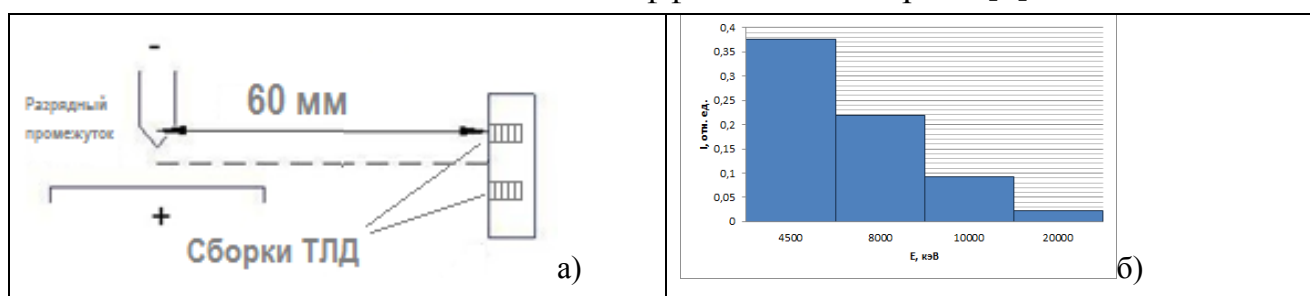


Рис. 2. Схема регистрации рентгеновского излучения с помощью ТЛД (а), восстановленный спектр излучения разряда (б)

Результаты проведенных экспериментов и коэффициенты преобразования запасенной электрической энергии в энергию рентгеновского излучения, испущенного СНВИ, во всех направлениях при различной геометрии электродов и энерговкладе в разряд представлены в таблице 4 и 5.

При одинаковом начальном энерговкладе в разряд для конфигурации «острие – острие» выход рентгеновского излучения в 5 раз превышает аналогичный показатель для конфигурации «острие – плоскость». Коэффициент преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения остается постоянным (в пределах погрешности) при различном энерговкладе в режиме микропинчевания разряда. При отсутствии микропинчевания коэффициент преобразования уменьшается на порядок.

Таблица 4. Коэффициент преобразования запасенной электрической энергии в энергию рентгеновского излучения НВИ при различной геометрии электродов и зарядном напряжении 15 кВ

Конфигурация	«Острие – плоскость»	«Острие – острие»
Запасенная энергия, кДж	2,25	2,25
Энергия рентгеновского излучения, Дж	4,7±0,5	25±2
Коэффициент преобразования электрической энергии в энергию излучения	$(2,1±0,2) \cdot 10^{-3}$	$(1,1±0,1) \cdot 10^{-2}$

Таблица 5. Коэффициент преобразования запасенной электрической энергии в энергию рентгеновского излучения НВИ при различном энерговкладе в разряд и конфигурации «Острие – острие»

Зарядное напряжение, кВ	15	10	7,5
Запасенная энергия, кДж	2,3	1,0	0,6
Энергия рентгеновского излучения, Дж	25±2	13±1	0,56±0,06
Коэффициент преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения	$(1,1±0,1) \cdot 10^{-2}$	$(1,3±0,1) \cdot 10^{-2}$	$(1,0±0,1) \cdot 10^{-3}$

В главе 5 представлены результаты комплексного исследования корпускулярных потоков, эмитируемых разрядом НВИ. При измерении газокинетического давления плазмы микропинчевого разряда в качестве

детектора использовался акустический стержень, встроенный в оптическую схему лазерного интерферометра. В процессе генерации плазмы импульс давления возбуждал в стержне волну сжатия. Смещение торца стержня измерялось методами лазерной интерферометрии с высокой точностью. По определенному смещению поверхности торца стержня рассчитывалась величина газокINETического давления [8].

С помощью данной методики были получены значения давления плазмы микропинчевого разряда на различных расстояниях от оси разряда и различном напряжении на межэлектродном промежутке (таблица 6). На рис. 3. представлен характерный вид временной зависимости давления плазмы для расстояния 22мм от оси разряда и тока разряда при напряжении на разрядном промежутке 15 кВ. Зависимость максимального давления плазмы от энергии, запасенной в батарее конденсаторов, для этого же расстояния представлена на рис. 4.

Таблица 6. Давление плазмы НВИ в зависимости от напряжения на разрядном промежутке и расстояния от оси разряда

Расстояние от оси разряда, мм	Давление, бар		
	5кВ	10кВ	15кВ
33	0,29±0,03	2,9±0,3	6,9±0,7
28	0,47±0,05	4,8±0,5	12±1
22	1,9±0,3	7,6±0,8	19±2
18	2,2±0,3	12±1	22±2
8	8,9±0,7	38±4	68±7

Рис.3. Временные зависимости давления плазмы на расстоянии 22 мм от оси разряда (вверху) и тока разряда (внизу) для начального напряжения на разрядном промежутке 15 кВ

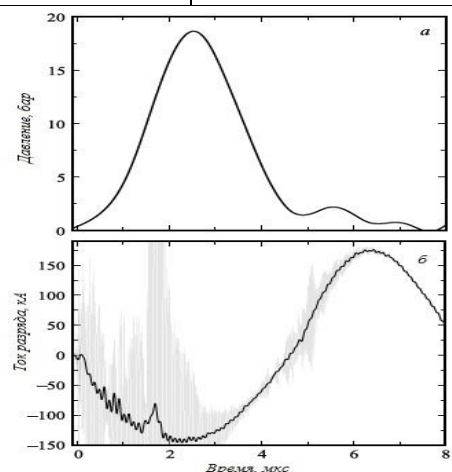
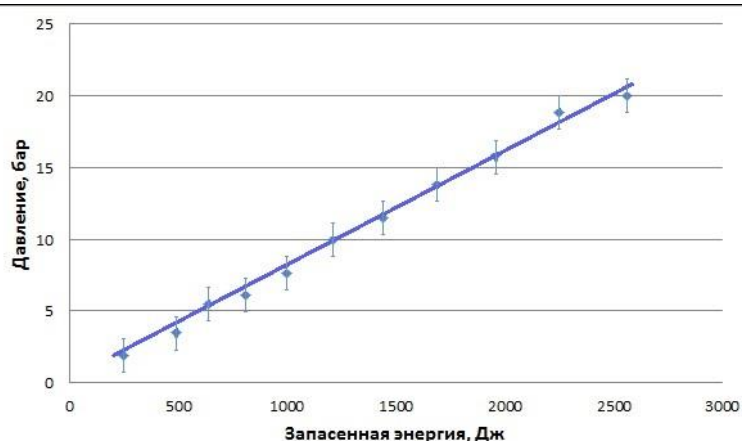


Рис.4. Зависимость максимального давления разряда от энергии, запасенной в конденсаторной батарее



Давление (P) и плотность потока частиц (φ), эмитируемых микропинчевым разрядом, связаны выражением:

$$P = \varphi t v, \tag{2}$$

где v – скорость потока, t – масса частицы.

Следовательно, для нахождения плотности корпускулярного потока дополнительно необходимо было определить его скорость.

На установке «Зона-2» использовалась зондовая методика для определения скорости потоков плазмы, эмитируемых микропинчевым разрядом. На рис. 5 представлены типичные осциллограммы сигнала с зонда, при регистрации ионной составляющей корпускулярного потока, и тока разряда для различных значений зарядного напряжения конденсаторной батареи.

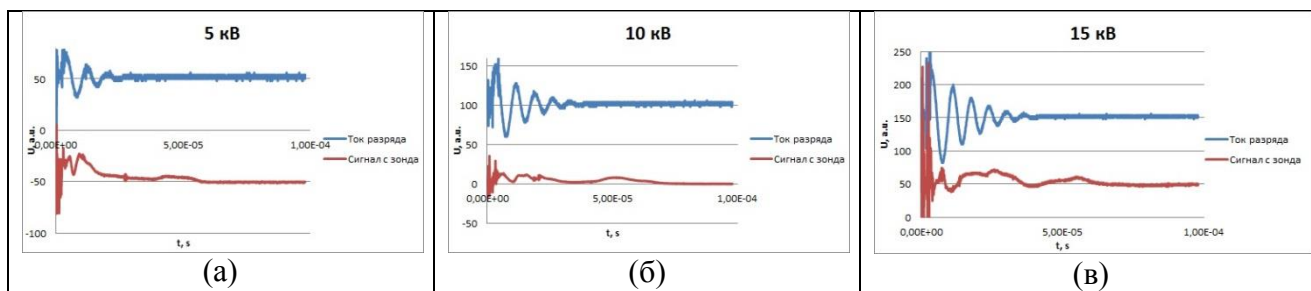


Рис. 5. Сигналы с зонда при зарядном напряжении батареи 5 кВ (а), 10 кВ (б), 15 кВ (в)

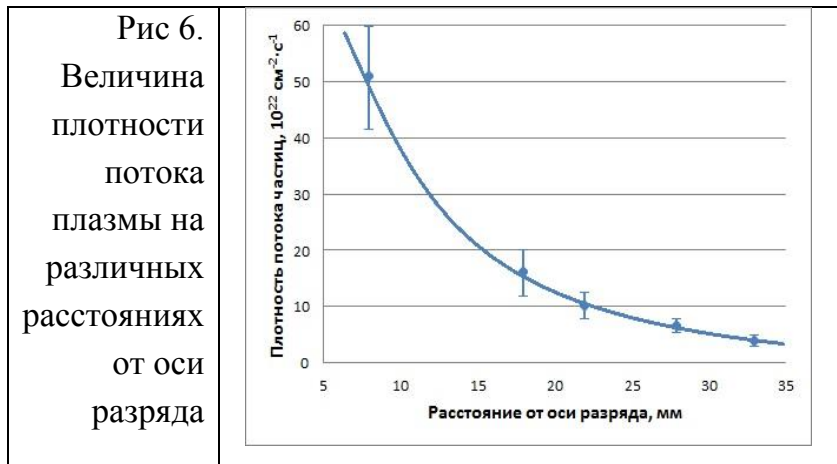
Ионная составляющая потока частиц, эмитируемых разрядом, регистрировалась через $t=50\pm 8$ мкс после начала протекания разряда. Как видно из табл. 7, в пределах погрешности, скорости ионной составляющей корпускулярного потока равны при различных значениях напряжения на конденсаторной батарее.

Таблица 7. Значения скорости ионной составляющей, полученные для различных зарядных напряжений конденсаторной батареи установки			
Uз, кВ	5	7,5	10
V, 10 ⁵ см/с	10±2	10±2	9±2

Полученные результаты позволяют оценить плотность потока частиц на различных расстояниях от оси разряда. В предположении, что основной вклад в давление дает ионная составляющая, давление потоков плазмы определяется формулой (2).

Используя

полученные значения скорости ионной составляющей, и предполагая цилиндрическую симметричность распространения плазмы относительно оси разряда, получаем значения плотности потока частиц на периферии разряда (рис. 6). При сравнении полученных значений концентрации на расстоянии 8 мм от оси разряда со значением плотности периферийной плазмы, полученным на этой установке с помощью лазерной интерферометрической методики [4] было отмечено их совпадение в пределах погрешности. Это говорит о правомерности определения плотности потоков плазмы с помощью измерения газокINETического давления.



В заключении представлены основные результаты работы:

1. Разработана и апробирована методика определения относительного вклада материалов электродов в плазму разряда сильноточной вакуумной искры по *K*-спектрам излучения данных материалов и экспериментально выявлена роль каждого из электродов в формировании излучающей плазмы.
2. Показано влияние конфигурации электродной системы на эмиссионные характеристики плазмы СНВИ. Конфигурация электродной системы задает начальное распределение напряженности электрического поля в приэлектродных областях и, тем самым, определяет величину тока эмиссии

с поверхности электрода и механизм поступления продуктов эрозии в межэлектродное пространство.

3. Для исследованных конфигураций электродной системы определена геометрия, обеспечивающая максимальный коэффициент k преобразования электрической энергии, в энергию рентгеновского излучения. В геометрии «острие-острие» k в 5 раз превышает аналогичный показатель для геометрии «острие-плоскость» и остается постоянным при различном энергокладе в режиме микропинчевания разряда.
4. С помощью комплексной диагностики определена плотность потока плазмы в периферийной области разряда СНВИ на различных расстояниях от оси разряда и при различных значениях энергоклада в разряд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tseluyko A.F. [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics". 2010. №6. P.176.
2. Романов И.В. [и др.] // Письма в ЖТФ. 2013. Т.39. Вып.8. С.62-70.
3. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. С. 3-10.
4. Кузнецов А.П. [и др.] // Физика плазмы. 2008. Т.34. С.219.
5. Скобелев И.Ю.[и др.] // ЖЭТФ. 1995. Т.108. С.1263.
6. Башутин О.А. [и др.] Методика регистрации рентгеновских обскурограмм микропинчевого разряда с помощью ПЗС камеры: сб. Материалы VII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», М.: НИЯУ МИФИ. 2010. С.141.
7. Кушин В.В., Ляпидевский В.К., Пережогин В.Б. Ядерно-физические методы диагностики плазмы. М.: МИФИ. 1985. С. 30 – 32.
8. Кузнецов А.П. [и др.] // Письма в Журнал технической физики. 2012. Т.38. №23. С. 46-54.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Саранцев С.А., Савёлов А.С. Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры // Физика плазмы. 2012. том 38. №3. С. 261 (входит в базу данных Web of Science).
2. Баронова Е.О., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Вихрев В.В., **Додулад Э.И.**, Елисеев С.П., Крауз В.И. [и др.] Исследование динамики развития кумулятивной струи в пинчевом разряде методами сдвиговой интерферометрии // Физика плазмы. 2012. том 38. №9. С. 815-825 (входит в базу данных Web of Science).
3. Алхимова М.А., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Саранцев С.А., Савёлов А.С. Влияние электродной системы на излучательные характеристики вакуумной искры // Физика плазмы. 2013. том 39. №11. С. 1006 – 1016.
4. О.А. Башутин, **Э.И. Додулад**, А.П. Кузнецов, А.С. Савёлов [и др.] Экспериментальное наблюдение взаимосвязи процессов на электродах и в межэлектродном промежутке микропинчевого разряда: Сб. Тезисы докладов II Всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Саров, 2008.
5. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С. [и др.] О применении комплекса диагностических средств для исследования импульсной плазмы Z-пинча в МИФИ: Сб. Тезисы докладов VI Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», М.: МИФИ, 2008. С. 132.
6. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С., Саранцев С.А. Оптимизация узлов автономной установки для исследования Z-пинча: кн. Сборник научных трудов научной сессии МИФИ – 2009, М., МИФИ, 2009
7. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С., Саранцев С.А. Экспериментальная установка и диагностические средства для

- исследования микропинчового разряда: сб. Тезисы докладов VII Курчатовской молодежной научной школы, М., 2009.
8. Додулад Э.И., Раевский И.Ф., Саранцев С.А. Применение универсального фокусирующего спектрографа в исследовании видимого спектра вакуумной искры: сб. Тезисы докладов VIII Курчатовской молодежной научной школы, М., 2010. С.166.
 9. Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Саранцев С.А. Предварительное исследование влияния условий инициирования на динамику плазмы сильноточной вакуумной искры на установке «Пион»: сб. Материалы VII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С.120.
 10. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Методика регистрации рентгеновских обскурোগрам микропинчового разряда с помощью ПЗС камеры: сб. Материалы VII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», М., НИЯУ МИФИ, 2010. С.141.
 11. Додулад Э.И., Кирко Д.Л., Савёлов А.С. Изучение Спектрального состава излучения низкоиндуктивной вакуумной искры: сб. Материалы VII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды», М., НИЯУ МИФИ, 2010. С.139.
 12. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Диагностика сильноточной вакуумной искры при различных условиях тригатронного инициирования: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, том 1, М., 2010.
 13. Додулад Э.И., Раевский И. Ф., Саранцев С.А., Степаненко А.М. Универсальный фокусирующий спектрометр для регистрации спектров плазмы: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, том 1, М., 2010.

14. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С., Саранцев С.А. Оптимизация узлов автономной установки для исследования Z-пинча: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, том 1, М., 2010.
15. Баронова Е.О., **Додулад Э.И.**, Раевский И.Ф., Саранцев С.А., Степаненко А.М. Универсальный фокусирующий спектрометр для регистрации спектров плазмы в диапазоне от нескольких 1 эВ до 200 кэВ: сб. Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 2011.
16. Баронова Е.О., **Додулад Э.И.**, Никулин В.А., Савёлов А.С., Степаненко А.М. [и др.] Исследование пространственной структуры пинчевого разряда с применением теневого фотографирования и интерферометров различного типа: сб. Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, Звенигород, 2011.
17. Баронова Е.О., **Додулад Э.И.**, Никулин В.А., Савёлов А.С., Степаненко А.М. [и др.] Определение зарядового и компонентного состава периферийной плазмы пинчевых разрядов: сб. Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, Звенигород, 2011.
18. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С., Саранцев С.А. [и др.] Влияние условий инициирования низкоиндуктивной вакуумной искры на динамику плазмы и процессы на поверхности электродов: сб. Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, Звенигород, 2011.
19. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.**, Савёлов А.С., Саранцев С.А. [и др.] Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры: Сборник тезисов докладов XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, Звенигород, 2011.
20. Бялковский О.А., **Додулад Э.И.**, Кузнецов А.П. [и др.] Комплексные измерения параметров плазмы микропинчевого разряда методами лазерной

интерферометрии: сб. аннотаций работ IX Курчатовской Молодежной Научной Школы, М., 2011.

21. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., **Додулад Э.И.** [и др.] Рентгеновская спектроскопия как метод исследования состава плазмы сильноточной вакуумной искры: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, М., 2012.
22. Баронова Е.О., Башутин О.А., Вовченко Е.А., **Додулад Э.И.**, Никулин В.Я., Раевский И.Ф. [и др.] Развитие методов лазерной интерферометрии существенно неоднородной импульсной плазмы: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, М., 2012.
23. **Э.И. Додулад**, И.Ф. Раевский, А.С.Савёлов, С.А.Саранцев Взаимосвязь процессов, протекающих в межэлектродном промежутке микропинчового разряда и процессов на поверхности электродов: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, М., 2012.
24. **Додулад Э.И.**, Кирко Д.Л., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Спектроскопическое исследование плазмы микропинчового разряда: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, М., 2012.
25. Бялковский О.А., **Додулад Э.И.**, Кузнецов А.П. [и др.] Комплексные измерения параметров плазмы микропинчового разряда методами лазерной интерферометрии: Аннотации докладов научной сессии НИЯУ МИФИ, М., 2012.
26. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., **Додулад Э.И.**, Литвин А.Д., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование параметров рентгеновского излучения горячей плазмы при помощи термолюминесцентных детекторов: кн. Материалы VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 44.
27. **Э.И. Додулад**, Кирко Д.Л., Савёлов А.С. Временные характеристики излучения спектральных линий вакуумной искры: кн. Материалы VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 80.

28. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Москаленко И.Н., Раевский И.Ф., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Исследование вклада материала электродов в плазму сильноточной вакуумной искры в зависимости от конфигурации электродной системы: кн. Материалы VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», М.: НИЯУ МИФИ, 2012. с.141.
29. Додулад Э.И., Саранцев С.А., Филиппов Е.Д., Раевский И.Ф. Использование лазерного осветителя на молекулярном азоте для визуализации процессов в межэлектродном промежутке низкоиндуктивной вакуумной искры: кн. Материалы VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С.145.
30. Алхимова М.А., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савёлов А.С. Влияние электродной системы на излучательные характеристики вакуумной искры: Тезисы докладов XI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2013. С. 250.
31. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Кузнецов А.П., Савёлов А.С., Саранцев С.А. Комплексное исследование корпускулярных потоков импульсной плазмы: Сборник тезисов докладов XV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-15, Звенигород, 2013. С. 82.