

На правах рукописи

УДК 533.952

УДК 533.9.082

**ДАНЬКО Сергей Александрович**

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИЯ  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С  
МЕГААМПЕРНЫМИ Z-ПИНЧАМИ**

Специальность 01.04.08.- физика плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре  
«Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук  
Голубев Александр Александрович (ГНЦ РФ-ИТЭФ)

Доктор физико-математических наук  
Ивановский Андрей Владимирович (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Доктор физико-математических наук  
Никулин Валерий Яковлевич (ФИАН)

Ведущая организация:

Государственный научный центр «Троицкий институт  
инновационных и термоядерных исследований»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_ часов на  
заседании Диссертационного совета Д.520.009.02 при  
Национальном исследовательском центре «Курчатовский  
институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова,  
д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
НИЦ «Курчатовский институт».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А.В. Демура

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Современная физика высокотемпературной плазмы родилась на заре исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС). В настоящее время УТС остаётся наиболее притягательным приложением сил исследователей горячей плазмы. Развиваются несколько направлений в этих исследованиях, наиболее продвинутыми из которых являются квазистационарная высокотемпературная плазма токамаков, лазерная плазма, импульсная токонесущая плазма Z-пинчей. Мегаамперные Z-пинчи являются эффективным источником мягкого рентгеновского излучения, с помощью которого можно сжать и поджечь термоядерную мишень. В настоящее время рекордная в лабораторных экспериментах величина мощности мягкого рентгеновского излучения: 200 ТВт и 1.8 МДж, - достигнута именно при сжатии многопроволочной сборки током в 20 МА.

Знание закономерностей формирования и движения плазмы позволяет получить мощный источник мягкого рентгеновского излучения, создавать сверхсильные электромагнитные поля, потоки энергичных электронов и многозарядных ионов и достичь экстремального состояния вещества.

Получаемые в высокотемпературной плазме электромагнитное излучение и корпускулярные потоки становятся основой для методов исследования быстропротекающих физических процессов с высоким временным и пространственным разрешением, исследований взаимодействия мощных потоков излучения с веществом, что перспективно для нанотехнологий и для производства и испытаний микроэлектроники.

Прогресс в понимании физики плотной горячей плазмы и генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения является фундаментом для разработок новой техники мощных электрических импульсов, в частности, с использованием вакуумных передающих линий.

Исследование новых плазменных структур и образований невозможно без разработки новых диагностических средств, имеющих специальные временные, пространственные, спектральные и другие характеристикам. К этим диагностикам относятся и новые разработанные автором рентгеноспектральные методы. Методические разработки, развиваемые в плазменных исследованиях, пригодны для изучения космических объектов, внутренней структуры биологических объектов.

Все вышесказанное и определяет актуальность представленной работы.

### **Цель работы и задачи исследований.**

Изучение и оптимизация физических процессов при сжатии быстрых сильноточных Z-пинчей: формирования токовой плазменной оболочки; динамики плазмы на стадии ускорения; развития неустойчивостей и разработка способов их смягчения и подавления; формирования плотной горячей плазмы (цилиндрического жгута или горячей точки) на оси, - и создание на этой основе источника мягкого рентгеновского излучения с требуемыми параметрами.

Поставленные задачи были решены путем разработки новых типов нагрузок, новых диагностических средств, специальных целенаправленных экспериментов в высоковольтном диоде мощных импульсных генераторов тока.

### **Связь с государственными научно-техническими программами.**

Диссертационная работа выполнена по плану проводимых в НИЦ "Курчатовский институт" научно-исследовательских работ в соответствии с Федеральной целевой научно-технической программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения», подпрограмма "УТС и плазменные процессы" 1996-2000 годы; Федеральной целевой научно-технической программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы; Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы»; Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

### **Научная новизна работы** заключается в том что:

1. Для непосредственного измерения мощности вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения в широком спектральном интервале:

-была предложена и осуществлена схема выравнивания спектральной характеристики вакуумного диода за счёт применения специально подобранного фотокатода и компенсирующего фильтра, располагающегося перед детектором;

-предложен алгоритм расчёта многослойной диафрагмы для равномерного ослабления освещённости детектора, который позволяет определить геометрию такой системы по простым формулам с малой погрешностью;

-предложен новый способ и разработано устройство для равномерного уменьшения освещённости детектора мягкого рентгеновского излучения с использованием эффекта полного внешнего отражения от сферической поверхности при малых углах скольжения.

2. Разработана и апробирована оригинальная методика определения верхней границы тормозного спектра рентгеновского излучения на основе фотонейтронных реакций, которая была применена для измерения импульсного напряжения в диапазоне 2-5 МВ на диоде высоковольтного генератора с плазменным прерывателем тока.

3. При имплозии многопроволочных лайнеров на импульсных сильноточных генераторах тока впервые обнаружены следующие особенности:

- характерный период осевой неустойчивости типа стратификации в сборках, составленных из разных материалов, существенным образом определяется периодом элемента с наибольшим атомным номером. Этот период распространяется на все проводники;

- на этапе ускорения на отдельных участках сжимающейся цилиндрической сборки, параллельных её оси, зарегистрировано нерегулярное изменение плотности (эффект "просветления"). Наиболее вероятно, что оно обусловлено токовой филаментацией в разреженной плазменной короне в результате развития нелинейной электронной магнитной гидродинамической неустойчивости;

- в процессе магнитного обжатия двойных вложенных цилиндрическихборок на основе рентгеноспектральных измерений впервые обнаружен эффект "провала" внешней оболочки сквозь внутреннюю.

4. Разработана и впервые применена в экспериментах по имплозии многопроволочныхборок мегаамперными токами методика регистрации линейчатых рентгеновских спектров с наносекундным временным разрешением. По зарегистрированным спектрам [H]- и [He]-подобных ионов алюминия были определены временные характеристики параметров горячей плазмы Z-пинча.

5. Для улучшения устойчивости сжатия цилиндрического Z-пинча предложен, изготовлен и экспериментально проверен на работоспособность двухоболочечный лайнер, состоящий из двух тонких пластиковых оболочек с разреженным газом между ними, позволяющий организовать равномерно распределённое по азимуту протекание электрического тока на старте. Продемонстрировано устойчивое 10-кратное сжатие лайнеров такой конструкции.

6. С помощью рентгеновского спектрографа с пространственным разрешением показано, что в схеме рентгеновского излучателя «лайнер-

конвертор» добавление в гелиевый Z-пинч примесей со средними атомными номерами приводит к лучшему нагреву электронов и увеличению энерговыделения на электроде–конверторе за счет аксиальной теплопроводности.

7. Исследования динамики сжатия плазмы в веществе из лёгких элементов, содержащем дейтерий, в экспериментах, моделирующих зажигание шнура из конденсированного водорода, показано, что в пинчах с начальной плотностью нагрузки  $\sim 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> при токах 1-3 МА достигнуты температура и плотность плазмы в перетяжке достаточные для того, чтобы диагностировать ядерную реакцию синтеза. Эксперименты указывают на присутствие как термоядерного механизма, соответствующего ионной температуре плазмы в перетяжке, так и на механизм, связанный с нетепловым распределением дейтронов.

8. Впервые были проведены экспериментальные исследования многопроволочных X-пинчей из различных материалов при токах более 2 МА, которые подтвердили основные закономерности динамики X-пинчей, сформулированные при существенно меньших токах. Были зафиксированы рекордные параметры плазменного излучателя: яркость излучения выше  $10^{15}$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср) в мягком рентгеновском диапазоне при размере горячей точки  $\sim 20$  мкм и мощности излучения  $\sim 120$  ГВт.

9. Впервые была исследована работоспособность возобновляемых участков вакуумных транспортирующих линий с магнитной самоизоляцией с параметрами, требующимися для концептуального проекта термоядерного реактора. Экспериментально показано, что вне зависимости от материала и степени очистки электродов при пропускании тока с линейной плотностью до 7 МА/см по модели линии с магнитной изоляцией входной и выходной токи отличаются менее чем на 10% достаточно длительное время - 220÷320 нс.

### **Научная и практическая значимость**

Полученные в проведенных исследованиях результаты привели к уточнению ряда представлений в физике сжимающихся многопроволочных лайнеров, газовых струй и механизмов формирования плотной горячей плазмы в Z-пинчах.

Модельные эксперименты продемонстрировали принципиальную возможность трансформации электромагнитной энергии с использованием теплопроводностного механизма по схеме "лайнер-конвертор" в мощный импульс рентгеновского излучения.

В Z-пинчах, моделирующих инициирование самоподдерживающейся волны реакции синтеза на дейтерированных нагрузках, достигнуты температура и плотность плазмы в перетяжке достаточные для того, чтобы диагностировать ядерную реакцию синтеза. Эксперименты указывают на перспективность этого подхода.

Экспериментальные исследования многопроволочных X-пинчей при токах более 2 МА указали на перспективу создания источника рентгеновского излучения с уникальными по своим временным, пространственным и яркостным параметрам свойствами на более мощных генераторах.

Разработанные оригинальные научные приборы и экспериментальные методики используются в исследованиях высокотемпературной плазмы и могут использоваться в других плазменных экспериментах и исследованиях быстропротекающих процессов.

Продемонстрирована пригодность вакуумных транспортирующих линий с магнитной самоизоляцией для передачи мощного электромагнитного импульса к нагрузке демонстрационного термоядерного реактора. Результаты диссертации можно использовать для тестирования микроэлектронной продукции на радиационную стойкость и в рентгенолитографии.

#### **На защиту выносятся:**

1. Детектор импульсного мягкого рентгеновского излучения с равномерной спектральной характеристикой на основе вакуумного рентгеновского диода с соответственно подобранными рентгеновским фотокатодом и фильтром.
2. Два типа широкополосных равномерных ослабителей мягкого рентгеновского излучения: на основе многодырочной диафрагмы и на основе эффекта полного внешнего отражения от сферической поверхности при малых углах скольжения.
3. Активационная и времяпролётная методики регистрации нейтронного излучения, проведение нейтронных измерений и их обработка.
4. Методика определения высокоэнергичной границы тормозного рентгеновского спектра в мегавольтном диапазоне на основании фотоядерных реакций.
5. Методика линейной развёртки рентгеновских K-спектров алюминия с наносекундным временным разрешением на мощных импульсных генераторах тока.
6. Модель и численные коды для определения параметров горячей оптически плотной плазмы по K-спектрам [H]- и [He]- ионов.

7. Технология изготовления сложных экспериментальных нагрузок, в том числе и тонкостенных пластиковых лайнеров с газовым наполнением.
8. Экспериментальная демонстрация работоспособности модели вакуумной линии с магнитной изоляцией при токах с линейной плотностью до 7 МА/см и измерение температуры и плотности плазмы в межэлектродном зазоре.
9. Выявление общих закономерностей и конкретных особенностей в образовании пространственных структур, спектрального состава и временных характеристик излучения Z-пинча, образующегося в результате имплозии лайнеров различной геометрии и различного химического состава.
10. Экспериментальные исследования X-пинча при рекордном токе  $\sim 2$  МА. Определение параметров плазмы в X-пинче и в перетяжке Z-пинча из лёгких элементов.

### **Личный вклад автора.**

Все результаты, представленные для защиты в диссертации, получены автором лично или с его определяющим участием. Автор организовал несколько экспериментальных кампаний и руководил их проведением; ставил экспериментальные задачи, исполнял ведущую роль в их реализации, разрабатывал диагностические методы и приборы, анализировал, обрабатывал и интерпретировал результаты экспериментов.

### **Достоверность и обоснованность результатов,**

полученных в диссертационной работе, определяется комплексным подходом к исследованиям, использованием большого количества различных взаимно дополняющих методов диагностики и достаточной статистикой измерений, полученной как в большом числе опытов, так и на нескольких экспериментальных стендах, а также сравнением экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Результаты представленных работ нашли своё подтверждение в независимых работах других экспериментальных групп.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались и обсуждались на:

Международных конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в Звенигороде: 1997, 2002, 2006–2011;

Европейских конференциях по физике плазмы и управляемому синтезу: Амстердам (Голландия) 1990, Берлин (Германия) 1991, Прага (Чехия) 1998, Сорренто (Италия) 2000, С.-Петербург (Россия) 2003, Лондон (Англия) 2004, Таррагона (Испания) 2005, Рим (Италия) 2006;



Международных конференциях по физике плазмы и УТС (IEEE - ICOPS, Йокогама (Япония)1998, Киото (Япония) 2001, Карлсруэ (ФРГ)2008, ICPP-Фукуока (Япония) 2008;

Международных конференциях по плотным Z – пинчам: Ванкувер (Канада) 1997, Альбукерки (США) 2002, Александрия (США) 2008, Биарриц (Франция) 2011;

Международных конференциях по мощным импульсным пучкам заряженных частиц BEAMS: Кобе (Япония) 1986, Карлсруэ (ФРГ)1988, Новосибирск (СССР) 1990, Сан-Диего (США)1994, Прага (Чехия) 1996, Хайфа (Израиль)-1998, Нагаока (Япония) 2000, Санкт Петербург (Россия) 2004), Оксфорд (Англия) 2006, Ченду (КНР) 2006, Сиань (КНР) 2008;

Международной конференции по мегагауссовым магнитным полям Альбукерки (США) 1992;

Международной конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (HTRD), Тусон США, 2000;

Международных конференциях по экстремальным состояниям вещества (Эльбрус, Россия): 2004, 2009;

Совещании по диагностике высокотемпературной плазме; С.-Петербург (Россия), 1993,

Всероссийском семинаре по Z – пинчам (Москва, 2006);

Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике, г. Томск (СССР)1987; 2010;

Международной конференции по инерциальной науке и приложениям. Бордо (Франция) 1999;

Международном симпозиуме по плазменным исследованиям и их приложениям: Варшава (Польша) 2001, 2003;

Международный Симпозиум по Физике плазмы и технологии: Прага (Чехия) 1997;

Европейской конференции по современной диагностике для управляемого синтеза, Варенна (Италия) 2001;

Китайско-Российских семинарах по Физике плазмы: Пекин (КНР) 2006, 2009;

Международной конференции по диагностике плазмы: Алушта (Украина) 2010;

Российском семинаре "Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды" МИФИ 2009, 2010;

Международной конференции Передовые рубежи в Физике плазмы и технологии, Катманду (Непал) 2009;

Семинарах в ФИ РАН, ТРИНИТИ, НИЦ Курчатовский институт, ИТЭФ, ИПХФ РАН, ФГУП «Институт стратегической стабильности».

Результаты исследований изложены в 73 печатных трудах, среди которых 27 статей, в том числе 24 статьи в рекомендованных ВАК периодических изданиях для диссертаций, 38 докладов на Международных и Российских симпозиумах и конференциях, 5 препринтов, 3 патента (авторских свидетельства) на изобретения.

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения.

Объём диссертации составляет 214 страниц, включая 136 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 268 наименований.

### **Содержание диссертации.**

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, указывается её практическая ценность, научная новизна работы, перечисляются выносимые на защиту положения.

В первой главе приведен краткий обзор подходов к реализации инерциального термоядерного синтеза (ИТС) на основе мощных импульсных источников излучения и современного состояния физики Z-пинчей.

Вторая глава содержит описание разработанных автором диагностических методов исследования свойств горячей плазмы по её рентгеновскому и нейтронному излучению. Часть методов представляют собой адаптацию ранее известных способов и приёмов для экспериментов на мощных импульсных генераторах тока. Это - §2.1 Рентгеновская спектрометрия и §2.3 «Нейтронные измерения». Новые разработанные автором методы изложены в §2.2 «Измерение мощности мягкого рентгеновского излучения в широком спектральном диапазоне с помощью вакуумных и полупроводниковых диодов» и §2.4 «Определение верхней границы распределения тормозного излучения с помощью фотонейтронных реакций».

В большинстве экспериментов для определения параметров плазмы автором применялся кристаллический рентгеновский спектрограф на основе выпуклого кристалла слюды с двумерным, в определённых случаях, пространственным разрешением в линиях различных порядков. Выпуклый кристалл регистрирует при небольшом угловом размере источника широкий спектральный диапазон - от 0.25 до 1.3 нм, в который может попасть два-три порядка отражения характеристических линий. Спектрограф снабжён узкой щелью, располагающейся в плоскости дисперсии. Эта щель строит одномерное по высоте изображение источника. Температура и плотность плазмы определялись из соотношения интенсивностей линий водородо- и

гелиеподобных ионов. Ширина отдельной линии определялась как ее спектральной шириной (преимущественно доплеровским уширением), так и угловым размером источника излучения в плоскости дисперсии. В зависимости от порядка отражения вклад в ширину линии спектральной составляющей умножается, в то время как вклад геометрического размера источника остается неизменным. Это обстоятельство позволяет разделить геометрическую и спектральную составляющие ширины линии. Ионная температура плазмы определялась по доплеровскому уширению спектральных линий. Более мелкий вертикальный размер отдельной точки изображения оценивался по ширине границы изображения (полутени) от входной щели. Для интерпретации большинства рентгеноспектральных измерений, приведённых в диссертационной работе применялась специально написанная вычислительная программа DISMAT, восстанавливающая параметры плазмы по спектральным интенсивностям линий водородо- и гелиеподобных ионов.

Для измерений рентгеновских спектров с временным разрешением была выбрана схема с преобразованием рентгеновского спектра сцинтиллятором в оптическое изображение, которое передается гибким волоконным световодом для регистрации на световом хронографе. Пройдя по чувствительности схеме, использующей открытые рентгеновские камеры, и имея ограничение по временному разрешению, она позволяет относительно легко варьировать спектральный интервал регистрации излучения, изменяя угол падения излучения на кристалл и взаимное расположение кристалла и сцинтиллятора. Сферический фокусирующий кристалл слюды даёт возможность фокусировки излучения, как в плоскости дисперсии, так и в сагиттальной плоскости, в несколько раз увеличивая светосилу прибора по сравнению с плоскими и цилиндрическими кристаллами. Небольшие угловые размеры источника в плоскости дисперсии, совпадавшей с горизонтальной плоскостью, делали возможным смещение сцинтиллятора от круга Роуланда для достижения вертикальной фокусировки без существенного ухудшения спектрального разрешения. Сцинтиллятор (полистирол с *p*-терфенилом толщиной ~20 мкм) с характерным временем высвечивания 2.5 нс располагался непосредственно на торцевой поверхности волоконного световода. Противоположный конец световода передавал изображение спектра на входную волоконно-оптическую шайбу электронно-оптической камеры K008. Вся электронная регистрирующая часть системы помещалась в экранированный бокс с автономным электропитанием, трансформаторными развязками и оптронной связью с компьютером, что обеспечивало надёжную защиту от электромагнитных помех.

Для прямого измерения мощности излучения в широком интервале энергий квантов была предложена схема выравнивания спектральной характеристики вакуумного фотоэмиссионного диода за счёт применения компенсирующего фильтра, располагающегося перед детектором. Суть предложения состояла в подборе такой пары, в которой провалы чувствительности фотокатода и скачки пропускания фильтра коррелировали между собой и были небольшими по величине, что характерно для металлов с большим  $Z$ . Из ряда доступных и технологически пригодных материалов были подобраны золотой катод и фильтр, представляющий собой слой двуокиси свинца толщиной 130 нм, нанесенный на нитроцеллюлозную пленку толщиной 100 нм. В этом случае  $W$  (Вт) =  $5 \cdot 10^4 I$  (А) в широком спектральном интервале 0.1-5 кэВ и с максимально возможной погрешностью 80% независимо от спектрального распределения в этом диапазоне.

Гладкую и слабо меняющуюся в широком интервале энергий квантов спектральную характеристику имеют появившиеся 20 лет назад фотопроводящие детекторы: алмазные PCD (Photoconductive detectors) и кремниевые AXUV, – что очень ценно для измерений полной мощности мягкого рентгеновского излучения. Чтобы согласовать их чувствительность с тераваттным излучателем используется система ахроматического ослабления всего спектрального интервала, содержащего существенную часть энергии. Автором предложен алгоритм расчёта многодырочной диафрагмы для равномерного ослабления освещённости детектора, который позволяет спроектировать геометрию такой системы по простым формулам с малой погрешностью. Автор предложил новый альтернативный способ ахроматического ослабления, основанный на свойстве полного внешнего отражения рентгеновского излучения от твёрдой поверхности при малых углах скольжения, не превосходящих некоторый критический угол для квантов данной энергии и для данного материала. После отражения от поверхности широкий непрерывный спектр будет обрезан с высокоэнергичной стороны. Так для поверхности LiF с шероховатостью 1 нм при угле скольжения  $\alpha = 3$  градуса величина коэффициента отражения составляет 0.8 при неравномерности отражения не более 7% в интервале  $h\nu < 0.4$  кэВ. А если излучение будет направлено на участок сферической поверхности, то форма поверхности позволит многократно уменьшить интенсивность излучения на небольшом удалении детектора. Освещённость детектора отражёнными от сферы лучами уменьшается по сравнению с освещённостью сферы пропорционально  $(L/r)^2$ , например, при радиусе сферы  $r = 1$  см на удалении  $L=1$  м в  $10^4$  раз.

Для измерения полного нейтронного выхода использовался детектор, который действовал на основе активационной методики с затянутой регистрацией: сначала быстрые нейтроны замедлялись в полиэтиленовом кубе, ребро которого имело длину 9 см; далее, уже замедленные нейтроны взаимодействовали с шестью индиевыми пластинами толщиной 1.5 мм, расположенными на гранях куба с образованием  $\beta$ -частиц в реакции  $^{115}\text{In}(n, \beta)^{116}\text{Sn}$ . Время полураспада  $^{116}\text{In}$  - 14.1 с. Излученные  $\beta$ -частицы регистрировались шестью счетчиками Гейгера (СБТ-10), приложенными к обратной стороне индиевых пластин. Формулу определения полного выхода нейтронов  $\mathcal{N}$  для импульсного источника излучения удобно представить в виде  $\mathcal{N} = 1.5 \cdot 10^3 N_{1/2} R^2$ , где  $N_{1/2}$  - число отсчетов детектора за первый полупериод распада индия (14.1 с),  $R$  (см) - удаление центра детектора от источника нейтронов. Коэффициент в формуле соответствует проведенной абсолютной калибровке, динамический диапазон регистрации составляет пять порядков.

В качестве детекторов нейтронов времяпролётной методики использовались фотоэлектронные умножители со сцинтилляторами. Наиболее быстрые детекторы имели вместе с измерительным трактом временное разрешение 4 нс, которое определялось временным разрешением ФЭУ СНФТ8 - 3 нс и временем высвечивания  $\sim 2.5$  нс органического сцинтиллятора из полистирола с добавкой *p*-терфинала, имевшим толщину 10-25 мм. Коэффициент усиления ФЭУ СНФТ8 не превосходил  $5 \times 10^6$ . Бóльший коэффициент усиления,  $10^8$ , имели сцинтилляционные детекторы ССДИ-8 (НИИИТ), комплектовавшиеся такими же сцинтилляторами с размерами  $\text{Ø}50 \times 100$  мм и  $\text{Ø}100 \times 100$  мм. В экспериментах детекторы устанавливались парами на разных расстояниях в каждом направлении, что давало возможность определить энергию нейтронов, момент их генерации и анизотропию излучения.

Разработана и апробирована оригинальная методика определения импульсного напряжения высоковольтного генератора с плазменным прерывателем тока в диапазоне 2-5 МВ. Основой методики является измерение спектра высокоэнергичной границы тормозного спектра излучения электронного пучка, возникающего в вакуумном диоде генератора, с помощью пороговых фотонейтронных реакций. В этом диапазоне энергий электронов жесткий край их тормозного спектра можно измерить, регистрируя фотонейтроны в реакциях  $\text{Be}^9(\gamma, n)\text{Be}^8$  и  $\text{D}^2(\gamma, n)p$ , имеющие самые низкие энергетические пороги:  $E_{\text{Be}} = 1.6$  МэВ и  $E_{\text{D}} = 2.25$  МэВ. Важнейшим обстоятельством, определяющим эффективность описываемого метода, является очень сильная зависимость отношения

выхода нейтронов в этих двух реакциях от пикового значения напряжения: при его изменении от 2.5 до 4.5 МВ отношение выходов меняется почти на два порядка. Это и обеспечивает высокую точность определения напряжения, несмотря на возможные погрешности в измерениях или расчетах. Установлено хорошее соответствие электротехнических измерений напряжения с фотонейтронными измерениями.

В Третьей главе представлены исследования по имплозии лайнеров нескольких видов с целью организации устойчивого сжатия и генерации мощного импульса мягкого рентгеновского излучения на импульсных сильноточных установках на основе Z-пинчей.

Основные эксперименты проводились в РНЦ «Курчатовский институт» на сильноточных импульсных генераторах на водяных формирующих линиях "Модуль А-5" ( $I \sim 1.5$  МА,  $\tau \sim 140$  нс) и "Стенд-300" ( $I \sim 3.5$  МА,  $\tau \sim 100$  нс).

В ходе экспериментов измерялись токи и напряжения в различных точках электрической цепи, и применялся широкий набор диагностик, в частности:

- электронно-оптическая фотография сжимающегося лайнера в видимом свете (кадровый и хронографический режимы);
- электронно-оптическая фотография в мягком рентгеновском и ВУФ-излучении на основе открытых рентгеновских ЭОП'ов с МКП-катодами (длительность экспозиции 2-5 нс);
- набор вакуумных рентгеновских диодов с металлическими катодами и различными фильтрами, а также рентгеновские pin-диоды;
- различные варианты лазерного зондирования;
- рентгеновские кристаллические спектрографы.

В втором параграфе главы 3 представлены результаты экспериментов по организации однородного по периферии протекания электрического тока и устойчивости сжатия лайнера в схеме рентгеновского излучателя «лайнер-конвертор». Неоднородности плотности тока, протекающего по оболочке, существенно увеличивают опасность развития всевозможных крупномасштабных неустойчивостей. Поэтому задача формирования однородной токовой оболочки представляется весьма существенной. Одним из вариантов обеспечения однородности тока является применение пластиковых лайнеров с газовым наполнением - "шубой". Он представляет собой две цилиндрические коаксиальные оболочки, между которыми находится слой газа при давлении в несколько Торр. Варьируя толщину оболочек, можно выбирать массу лайнера. Наличие газа между оболочками с давлением вблизи минимума кривой Пашена резко снижает напряжение пробоя, и, соответственно, улучшает однородность протекания тока по

периферии лайнера. Производилось сравнение степени однородности начального электрического пробоя пластикового лайнера в случае наличия газа с плотностью  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  у его поверхности и пробоя пластикового лайнера в вакууме. В первом случае наблюдался достаточно однородно светящийся по азимуту трубчатый слой плазмы, во втором - отдельные каналы пробоя по поверхности. Отмеченный выше эффект четко проявился и на хронографических фотографиях. В случае пробоя пластикового лайнера в вакууме наблюдается резко локализованные светящиеся каналы, которые оставались заметными по крайней мере до момента  $t = 150 \text{ нс}$  после начала тока; при пробое лайнера с газом свечение однородно. Импульсия лайнеров с массой более 200 мкг происходит достаточно устойчиво, степень сжатия  $R_0/r$ , определяемая из кадровых теневых фотографий, из щелевой развертки и по рентгеновским изображениям, достигала 10. В момент максимального сжатия наблюдается импульс вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения с длительностью на полувысоте около 10 нс; его максимальная мощность достигала  $3 \times 10^{11} \text{ Вт}$ . Однако сжатие лайнеров с массой менее 200 мкг происходило без ускорения, с постоянной скоростью, которая меньше расчетной; мягкое рентгеновское излучение возникает со значительным, 50-100 нс, опережением момента максимального сжатия. Все это свидетельствует о развитии неустойчивости на промежуточной стадии импlosionии.

В течение нескольких лет исследовалась оригинальная схема рентгеновского излучателя "лайнер-конвертор", предложенная Л.И. Рудаковым. В ее основе лежит следующий сценарий:

- 1) перевести в результате импlosionии существенную часть кинетической энергии лайнера, первоначально имеющего форму полого цилиндра с относительно редким наполнением внутри, в нагрев центральной его части при не очень горячих "стенках"; обеспечить магнитную теплоизоляцию горячей плазмы от "стенок";
- 2) передать накопленную в приосевой плазме энергию за счет электронной теплопроводности вдоль оси лайнера к конвертору, который излучит ее в рентгеновском диапазоне.

Обострение мощности излучения и пространственная концентрация энергии, позволяющие создать на конверторе яркий источник излучения, происходит благодаря резкому включению теплопроводности плазмы, пропорциональной  $T_e^{3.5}$ , в момент максимального сжатия плазмы на оси.

В экспериментах в качестве лайнера использовалась сверхзвуковая ( $M = 4-6$ ) цилиндрическая полая газовая (дейтериевая или гелиевая с диагностической добавкой 2% Ne) струя, сформированная с помощью импульсного

быстродействующего клапана с кольцевым соплом. Выходной торец сопла являлся отрицательным электродом разрядного промежутка, а его анодом служил прозрачный сетчатый электрод кольцевой формы. Продольное квазистационарное магнитное поле величиной до 45 кГс в области ускорения лайнера создавалось катушкой при протекании по ней тока. Оно служило и стабилизатором сжатия лайнера, и радиальной теплоизоляцией. Эксперименты проводились на двух установках Курчатовского института: установке "Модуль А-5" (~2 МА, 100 нс), установке "С-300" (~3.2 МА, 100 нс), - и на установке "Ambiofix", С.Е.С.Т.А., Франция, (1.2 МВ, ток - 2.4 МА), длительность импульса на полувысоте 30 нс. В экспериментах фаза максимального сжатия, в которой происходил нагрев конвертора и преобразование им полученной энергии в рентгеновское излучение, длилась ~10 нс. Приосевая горячая часть плазмы нагревалась до  $T_e > 1000$  эВ при  $N_e \sim 5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>; внешняя "стенка" лайнера нагревалась до 200 эВ, при  $N_e \sim 5 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. При отсутствии спектроскопических примесей (Ne, Ar) температура горячей плазмы возрастает до 2000 эВ; правда, при этом на обскурограммах плазма выглядела менее стабильной. Для конвертора диаметром 6 мм измеренная цветовая температура составляла 30-40 эВ, но излучающая поверхность была во много раз меньше, чем площадь конвертора. Возможное объяснение этого факта можно дать, если учесть, что в прианодную гелиевую плазму с электрода поступают ионы с зарядом  $Z = 13-26$ . Они способствуют быстрому локальному остыванию плазмы за счет излучения и ее пережатию вблизи анода вместе с вмороженным продольным магнитным полем. Тем самым сужается канал электронной теплопроводности и уменьшается нагреваемая площадь конвертора. Этот эффект проявляется в меньшей степени, если конвертор имеет меньший диаметр, при котором в плазму успевают попасть меньше охлаждающих ионов с анода, и она не так сильно пережимается. Для конвертора диаметром 3 мм цветовая температура составляла 15 эВ, и она уменьшалась при увеличении толщины конвертора. Излучающая поверхность приблизительно равнялась всей площади конвертора. Эти величины хорошо согласуются с численными результатами, полученными в двумерном моделировании при нагреве.

Оценки показывают, что при использовании плазмы с малым значением  $Z$  (H, He) процесс передачи энергии от ионов к электронам является самым медленным и лимитирует эффективность всей схемы. Улучшить ситуацию может создание плазмы с промежуточным значением  $Z$ , которая создаётся при испарении тонких волокон подходящего химического состава, натянутых параллельно оси и располагающиеся на цилиндрической поверхности с радиусом, в несколько раз меньшим, чем начальный радиус газового столба.



Испарение волокон будет происходить под действием фронта температурной волны, генерируемой ударной волной в цилиндре из легкого газа под действием "магнитного поршня". Размещая тонкие нити достаточно плотно, можно сконструировать сплошной плазменный цилиндр с необходимым значением  $Z$ . Заметим, что такой способ образования плазмы из нитей не сопряжен с развитием неустойчивостей, обычно возникающих при протекании тока, а также возможного перемешивания газов на стадии формирования гетерогенной струи. Влияние примесей с высокими значениями  $Z$  на нагрев электронов и на теплопроводность определялось в эксперименте путем регистрации спектральных линий гелиеподобных ионов хлора от NaCl, нанесенного на катод-конвертор высоковольтного диода генератора. Использовался спектрограф на выпуклом кристалле слюды, который располагался в радиальном направлении от лайнера. Пространственное разрешение вдоль оси лайнера создавалось установленной перед спектрографом узкой щелью. В спектре наблюдаются рентгеновские линии водородо- и гелиеподобных ионов элементов, входящих в состав стекла (Al, Si, Ca и др.), с энергией возбуждения до  $\sim 4$  кэВ. Электронная температура, определенная по соотношению их интенсивностей, составляет более 600 эВ. На спектрограмме отчетливо видна резонансная линия гелиеподобного хлора, в виде яркой точки на катоде с радиальными размерами не более 3 мм. Без стеклянных волокон интенсивность этой линии на порядок меньше, что является свидетельством существенного увеличения теплопроводности в присутствии примесей.

Схема «лайнер-мишень», благодаря разделению функций "накопителя энергии" и "излучателя" между наполнением лайнера и конвертором, имеет возможность трансформировать спектр рентгеновского излучения, изменяя материал конвертора, от сотен электроновольт при использовании Pb и W до десятков килоэлектронвольт в случае Kг и Mo. Эта схема при электрических токах  $\sim 10$  МА может оказаться более эффективной, чем столкновительная схема для генерации относительно жёсткого рентгеновского излучения ( $10 \div 30$  кэВ).

Во третьем параграфе главы 3 исследовались механизмы образования и нагрева плазмы сильноточного  $Z$ -пинча на основе гетерогенных, т.е. разнородных по геометрической форме и материалу, многопроволочных нагрузок. Одной из задач экспериментов было изучение влияния химического состава проволочных сборок на динамику и устойчивость сжатия. Второй задачей было изучение влияния особенностей геометрии и материала вложенных проволочных сборок на генерацию излучения.

Известно, что при взрыве проволочек, составляющих лайнеры, всегда наблюдается аксиальная неустойчивость с пространственным масштабом, зависящим от их материала. Так, для вольфрама период струй 0.2-0.3 мм, для алюминия 0.3-0.5 мм. Эти неустойчивости отражаются как на неоднородностях Z-пинча в конечном состоянии, так и на возможности достижения высокой степени сжатия. Первоначальная идея экспериментов состояла в том, что, изготовив сборки из проволочек близкой массы, но различных материалов, эти нестабильности можно было бы сгладить и тем самым повлиять на уровень развития возмущений и достичь большей степени сжатия.

Эксперименты проводились на импульсном генераторе С-300, позволяющем развить в индуктивной нагрузке  $L \sim 10$  нГн электрический ток до 3.5 МА со временем нарастания  $\tau \sim 100$  нс. Одиночные лайнеры имели одну и ту же геометрию: диаметр 12 мм, высота 10 мм. Лайнерные сборки состояли из алюминиевых или вольфрамовых проволочек или из их комбинаций. Алюминиевые проволочки имели диаметр 18 или 15 мкм, а вольфрамовые 5 или 6 мкм. На стадии плазмообразования к 50 нс (при текущем значении тока  $\sim 1.6$  МА) проволочки из вольфрама и алюминия успевают наработать слой плазмы до размера 0.3 мм и 0.8 мм, соответственно. Характерный пространственный период мелкомасштабной неустойчивости к этому моменту времени для обоих материалов составляет 0.1-0.2 мм. Вне ожидания, период оказался одинаковым для обоих материалов во всех экспериментах. Этот факт свидетельствует о том, что характерный период осевой неустойчивости типа стратификации в сборках, составленных из разных материалов, существенным образом определяется периодом элемента с наибольшим атомным номером. Этот период распространяется на все проводники и определяется, по-видимому, конфигурацией общего магнитного поля токонесящих проводников.

Одной из особенностей, выявленных по теневым изображениям, оказалось появление прозрачных для лазерного излучения областей. Это были светлые полосы, параллельные оси лайнера, на фоне непрерывной полутени от разреженной плазмы. Данный эффект проявляется наиболее отчетливо на нагрузках, состоящих из большого числа (80 и более) проволочек. Вместо последовательного уменьшения просветов в процессе сжатия, их ширина часто увеличивается. Во-первых, эффект может быть объяснен перемещением, группированием и слипанием несущих параллельные токи соседних плазменных проводников, образовавшихся из проволочек. В этом случае увеличение ширины просветов можно было бы объяснить просто

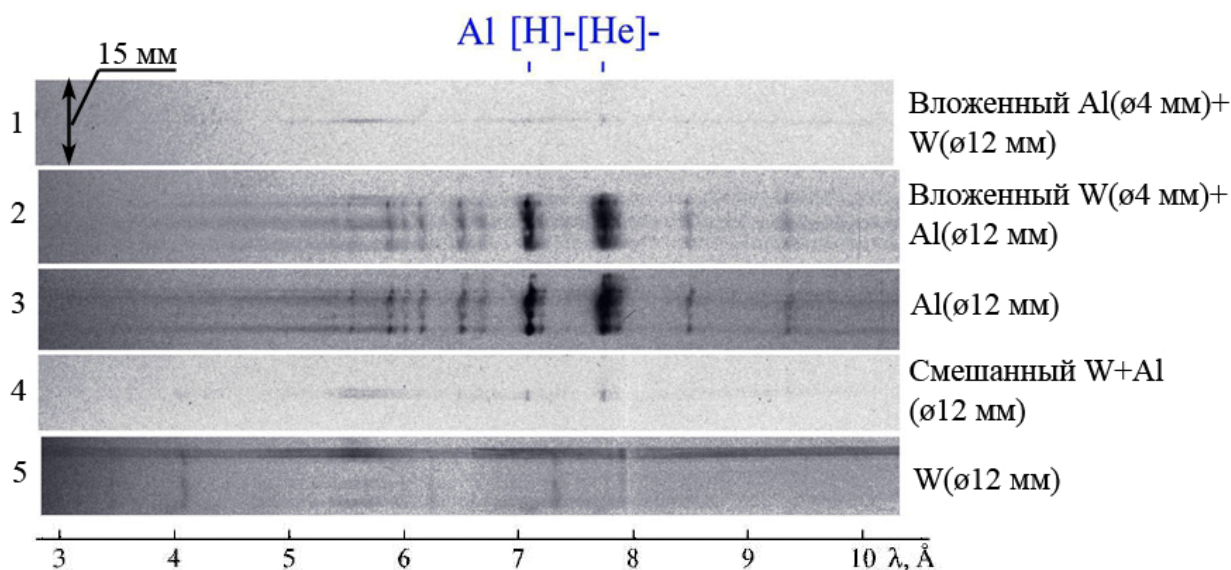
оптической экранировкой. Во-вторых, тот же эффект может быть обусловлен филаментацией тока в общей плазменной короне, окружающей проводники. Первый сценарий даёт характерное время  $\delta/V_A > 30$  нс ( $\delta$  - толщина слоя,  $V_A$  - альфвеновская скорость), а перестройка конфигурации имплодирующей сборки происходит, как следует из наших экспериментов, быстрее, чем за 10 нс. При токовой филаментации величина  $V_A$  возрастает лишь вдвое, но процесс может начинаться в разреженной плазме на периферии короны, попадающей в окно параметров электронной магнитной гидродинамики (ЭМГ). Тогда изменение числа просветов во времени может означать зависимость от времени периода нелинейной ЭМГ/МГД неустойчивости. Наиболее вероятным механизмом объяснения нерегулярных просветов в плазме в процессе сжатия представляется филаментация тока в относительной разреженной плазменной короне.

Измерены спектры излучения трех разных по составу лайнеров, полученные в моменты времени, соответствующие максимальным значениям импульсов МР-излучения, зарегистрированных в различных каналах рентгеновского полихроматора. Основная доля энергии излучается в интервале (50-270) эВ, а максимум излучения лежит в диапазоне (120-180) эВ. Энергия и мощность в экспериментах со смешанными, алюминиевыми и вольфрамовыми лайнерами в различных опытах соответственно были равны: (8.6-16) кДж и (0.2-0.8) ТВт; (13-18) кДж и (0.3-1.0) ТВт; (7.5-25) кДж и (0.2-1.5) ТВт. В диапазоне энергий  $\sim 1$  кэВ имеется тенденция к формированию второго локального максимума, что, по-видимому, связано с образованием горячей короткоживущей плазмы, излучающей в узком спектральном энергетическом диапазоне, соответствующем линейчатому рентгеновскому излучению высокоионизованных ионов.

Для измерения мощности излучения в интервале энергий квантов 100-5000 эВ также использовались вакуумные рентгеновские диоды с золотым фотокатодом и выравнивающим фильтром ( $PbO_2$ +Нитроцеллюлоза). Максимальный выход излучения при электрическом токе до 2.8 МА был получен для вольфрамовых нагрузок с массой 350-400 мкг/см. В указанном диапазоне он составил 20 кДж при максимальной мощности излучения, достигающей до 1.5 ТВт. Длительность импульса составляла 15 нс. Алюминиевые нагрузки при той же оптимальной погонной массе произвели рентгеновский импульс, мощность которого была в полтора раза меньше. Эти измерения хорошо согласуются с измерениями, сделанными с использованием полихроматора.

Анализ осциллограмм тока и напряжения на лайнерном узле и вычисленное по их значению увеличение индуктивности на стадии сжатия позволяют

определить эффективный радиус, по которому протекает электрический ток через нагрузку:  $L(t) = \int_0^t U dt / I(t)$ , где  $L(t)$  [нГн] =  $2 \cdot \ln(R_0/R(t))$ . Диаграмма сжатия двух вложенных сборок (20 вольфрамовых проволок на диаметре 6 мм и 20 алюминиевых на диаметре 12 мм), синхронизованная с изображением щелевой развертки, показывает, что скорость сжатия эффективной токовой оболочки в 1.5-3 раза меньше скорости сжатия, определенной по движению границы оптического изображения лайнера на щелевой развертке. Оптическая диагностика отслеживает положение внешней границы плазмы с наибольшей концентрацией, которая долго привязана к начальному положению проволок. Ток же начинает "проваливаться" к оси существенно раньше - вместе с плазменными струями. В экспериментах с двойными вложенными сборками по изгибу диаграммы тока видно, что внутренняя еще неподвижная вольфрамовая сборка перехватывает электрический ток у пролетающей мимо алюминиевой сборки. Количество приобретенной кинетической энергии каждой изборок зависит от дистанции, на которой происходит их разгон. Другого, в частности, столкновительного взаимодействия между плазменными оболочками не наблюдалось. Показательными в этом отношении были



*Рис.1. Пять рентгеновских спектров, полученных в разных экспериментах.* проведенные измерения рентгеновских спектров излучения Z-пинча в приосевой области в фазе максимального сжатия в интервале 1-3 кэВ. Эти спектры были ярким отражением динамики плазмы при использовании разных материалов в составе многопроволочныхборок. Оказалось, что спектр излучения Z-пинча на оси в экспериментах с вложенными лайнерами соответствовал материалу внешнего лайнера, т.е., несмотря на перехват тока внутренним лайнером, сжатое горячее образование формировалось из

плазмы материала внешней сборки. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены пять рентгеновских спектров К-оболочки алюминия для разных экспериментов с двумерным пространственным разрешением в линиях. В случае, когда внешняя сборка ( $\varnothing 12$  мм) изготовлена из вольфрамовых проволочек, а внутренняя ( $\varnothing 4$  мм) - из алюминиевых, картина практически не отличается от спектров, полученных при сжатии одиночных вольфрамовых лайнеров (спектры 1, 5). Их характерной особенностью является наличие некоторого непрерывного спектра со слабо выраженными линиями средних оболочек вольфрама, при этом К-линии ионов алюминия практически отсутствуют. В противоположном случае, когда внешняя оболочка была набрана из алюминиевых проволочек, а внутренняя - из вольфрамовых, спектр (2), напротив, мало отличался от спектров, зарегистрированных при сжатии чисто алюминиевыхборок (спектр 3). В экспериментах с нагрузкой из одной оболочки, изготовленной из чередующихся по окружности проволочек вольфрама (6 микрон) и алюминия (16 микрон), спектр алюминия практически исчезал в измеряемом спектрографом диапазоне длин волн (спектр 4). Сильное отличие в линейчатых спектрах, полученных при перестановке материалов внешней и внутренней оболочки вложенныхборок, продемонстрировало, что движение каждой из двухборок, составленных из относительно далеко расположенных (1.5-2 мм) друг от друга проволочек разного химического состава, происходит независимо от другой. Получается, что плазма от двухборок и в конечной излучающей стадии образуют геометрические конфигурации, которые слабо взаимодействуют и практически не пересекаются между собой: отсутствует теплосброс горячей плазмы алюминия на вольфрамовую плазму. Плазма в сжатом состоянии, по-видимому, обычно состоит из алюминиевой спирали, обвивающей вольфрамовый почти прямолинейный жгут. Таким образом, был обнаружен эффект "провала" внешней сборки сквозь внутреннюю, хотя ранее плазменным сообществом полагалось, что взаимодействие двух оболочек настолько велико, что они после столкновения продолжают двигаться вместе.

Эксперименты по регистрации рентгеновских спектральных линий с временным разрешением были проведены на сильноточном генераторе С-300 при сжатии вложенных алюминиевыхборок. Использовались цилиндрические сборки высотой 15 мм из проволочек диаметром 15 мкм. Внешняя оболочка диаметром 12 мм состояла из 48 проволочек, внутренняя – при диаметре 6 мм состояла из 24 проволочек; полная масса сборки составляла 348 мкг. В экспериментах были получены развёртки двух отрезков спектра вблизи резонансной линии водородоподобного иона

алюминия, а также резонансной и интеркомбинационной линий гелиеподобного иона алюминия. На всех развёртках К-спектров линии вспыхивают практически одновременно (точность временной привязки не хуже 2 нс, и в момент резкого роста интенсивности временное разрешение регистрации спектра определяется преимущественно сцинтиллятором  $\sim 2.5$  нс), при этом передний фронт хода интенсивности линии [H]-подобного иона круче, чем [He]-подобного. При такой динамике спектра к началу регистрации излучения ионизационная температура алюминиевой плазмы, должна превышать 0.5 кэВ. Но если следовать общепринятой модели, в которой кинетическая энергия ионов при сжатии на оси столкновительным образом переходит в тепловую энергию и, затем, в энергию электронов, то должна происходить последовательная ионизация ионов алюминия, сначала сопровождающаяся появлением линий [He]- и, затем, [H]-подобного иона. В экспериментах за время около 50 нс электронная температура  $T_e$  изменяется в пределах от 1000 до 400 эВ,  $T_i$  – от 30 до 130 кэВ,  $n_e = 3 \times 10^{19} \div 1.8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Минимальный рассчитанный радиус плазменного цилиндра составляет порядка миллиметра, что совпадает с размерами, полученными на рентгеновских изображениях. Отметим, что в момент максимального сжатия лайнера тепловое давление плазмы ( $n_i T_i + n_e T_e$ ) на оси за счёт ионной компоненты превосходит магнитное давление  $B^2/8\pi$  протекающего тока. Вследствие этого находящаяся на оси горячая относительно разреженная плазма создаёт противодействие, которое способно препятствовать сжатию основной массы лайнера, в результате чего формируется часто наблюдаемая трубчатая структура сжатого пинча. Времяразрешающая спектральная диагностика демонстрирует высокую локальную скорость преобразования энергии плазмы в сжатом состоянии в рентгеновское излучение.

Четвёртая глава представляет работы по экспериментальному исследованию развития перетяжки в плазме Z-пинча, образованной при протекании импульсного тока 1-3 МА через нагрузки из легких элементов с заранее намеченной шейкой. Целью этих экспериментов была проверка возможности нагрева плазмы в результате развития перетяжечной неустойчивости в водородном Z- пинче для перспективного инициирования волны термоядерного горения в цилиндрическом шнуре. Для локализации места перетяжки в середине цилиндрической нагрузки с начальным диаметром 3-5 мм и высотой 8-10 мм, в нагрузке делалась шейка диаметром менее 1 мм. В качестве плазмообразующего вещества использовалась агар-агаровая пена с плотностью  $0.05 \div 1 \text{ г/см}^3$ , в которую вводился дейтерированный полиэтилен и спектроскопические добавки калия и хлора. Исследования динамики сжатия

плазмы в веществе, содержащем дейтерий и моделирующем конденсированный водород, показали, что в перетяжке пинча достигаются температура и плотность плазмы достаточные для того, чтобы диагностировать ядерную реакцию синтеза. Оценки, сделанные по интенсивностям рентгеновских спектральных линий в рамках столкновительно-излучательной модели, дают значения для температуры  $T_e = 1-1.5$  кэВ,  $T_i = 1-12$  кэВ и для электронной плотности  $n_e = (0.3-1) \times 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. При формировании высокотемпературной плазмы в перетяжке Z-пинча возникало рентгеновское и нейтронное излучение с длительностью от 4 до 50 нс. Энергия нейтронов, измеренная методом времени пролета в трех направлениях относительно оси нагрузки 0°, 90° и 180°, соответствует D-D-реакции:  $2.5 \pm 0.3$  МэВ. Полный нейтронный выход при развитии одной перетяжки с характерным размером 100 мкм достигал  $10^8$  нейтронов за импульс. Измерения указывают на присутствие как термоядерного механизма реакции, соответствующего ионной температуре плазмы в перетяжке; так и на механизм, связанный с нетепловым распределением дейтронов. Полученные при токах 1-3 МА результаты не противоречат простой модели динамики плазмы, предложенной Колбом-Вихревым, которая предсказывает существенное приближение к параметрам плазмы, требующимся для зажигания самоподдерживающейся волны горения, при электрическом токе порядка 30 МА.

Пятая глава представляет результаты исследований динамики плазмы и параметров горячей точки в многопроволочных X-пинчах при токах через нагрузку до 2.3 МА со временем нарастания 150 нс, проведенные на сильноточном генераторе С-300. Эксперименты с X-пинчами при таких высоких токах впервые проведены автором с коллегами. В экспериментах исследовалась динамика нагрузок длиной 10–12 мм с разным количеством – от 2-х до 20 – скрещенных под углом 60° проволочек различного диаметра  $d = 55-300$  мкм из вольфрама, молибдена, нихрома и нержавеющей стали. Это обеспечило широкий диапазон исследуемых погонных масс  $m_l = 3.6 \div 40$  мг/см и отношения погонной массы к квадрату величины максимума тока  $m_l/I^2 = (1.6 \div 15.5)$  мг/(см·МА<sup>2</sup>). В диагностический комплекс входили датчики по измерению тока и напряжения в различных точках установки, детекторы рентгеновского излучения в различных диапазонах, а также электронно-оптические регистраторы в видимом и рентгеновском излучении. Временное разрешение быстрых каналов, так же как и точность синхронизации, составляли ~1 нс. Для измерения излучающих объектов малых размеров, использовалась величина ширины полутени краев [225] рентгеновских

обскурограмм и изображений щели, участки которых закрыты разными фильтрами. В качестве детектора в обоих случаях обычно использовались две расположенные одна за другой фотопленки, перед которыми устанавливались различные фильтры. Ближе к объекту располагалась пленка “Микрат”, обладающая низкой чувствительностью к рентгеновскому излучению, но высоким пространственным разрешением; она также служила дополнительным фильтром для излучения, регистрируемого расположенной за ней рентгеновской фотопленкой Kodak CX. Пространственное разрешение по объекту в описываемых экспериментах было порядка 15 мкм. Регистрация

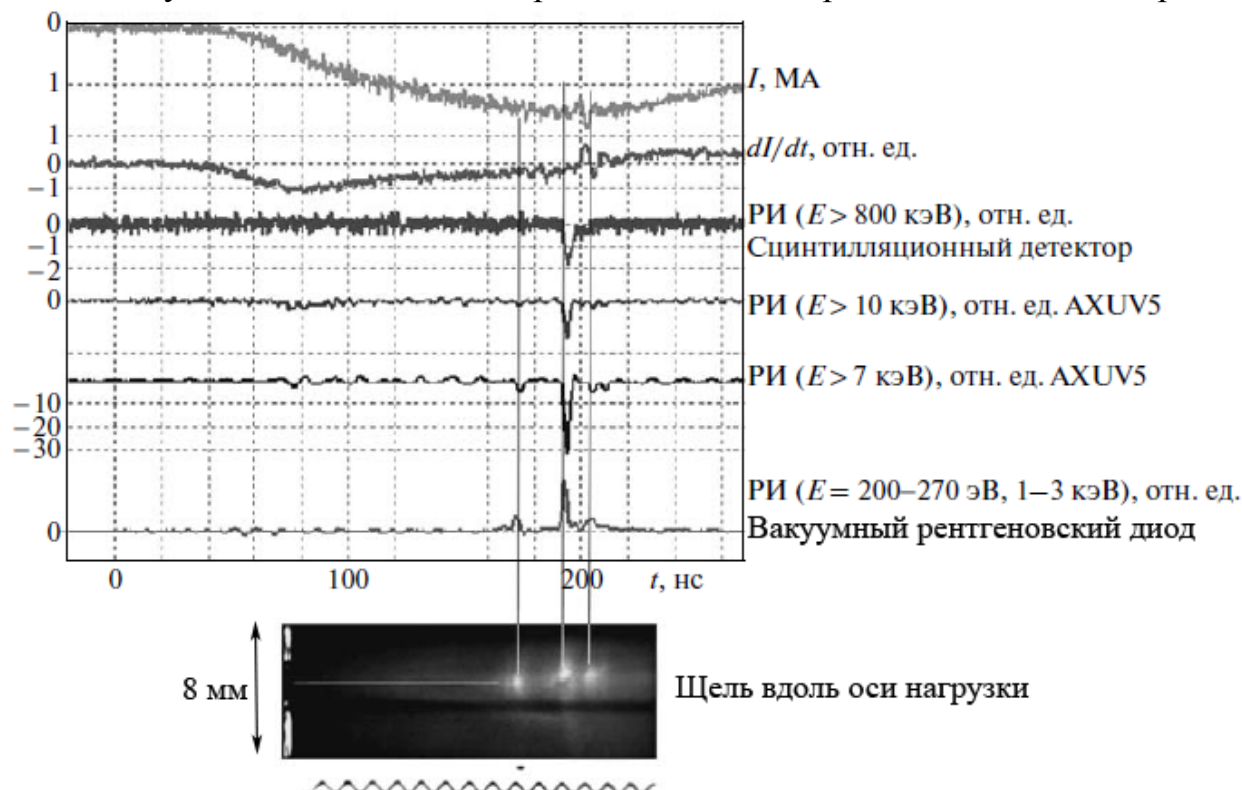


Рис.2. Временные зависимости тока, его производной и рентгеновского излучения  $16 \times 100$  мкм X-пинча из нихрома  $m/I^2 = 3.46$  мг/(см·МА<sup>2</sup>),  $I = 1.7$

МА. Внизу – хронограмма в видимом свете, синхронизованная с током.

мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергии от сотен электронвольт до нескольких килоэлектронвольт производилась калиброванными фотопроводящими диодами AXUV-5 и вакуумными рентгеновскими диодами с катодом из никеля и набором различных фильтров. Характерный временной ход излучения представлен на Рис.2. Жесткое рентгеновское излучение в области  $E \geq 200$  кэВ измерялось сцинтилляционными детекторами с быстрыми пластмассовыми сцинтилляторами СПСБ18 размером  $\varnothing 50 \times 50$  мм и фотоумножителями типа 1828-01 фирмы Hamamatsu; детекторы были абсолютно прокалиброваны на энергии 1.25 МэВ. Временное разрешение этих детекторов составляло (3–4) нс; они размещались перпендикулярно оси нагрузки и снабжались



свинцовыми фильтрами различной толщины от 5 до 70 мм. От рассеянного жесткого рентгеновского излучения детекторы экранировались свинцовой защитой толщиной не менее 12 см. В экспериментах устойчивая генерация X-пинча зарегистрирована в диапазоне значений параметра  $m_{\text{exp}}/m_{\text{scale}}$  от 0.63 до 1.5 (скейлинг  $m_{\text{scale}} \sim m_s \cdot I^2$ , где  $m_s = 3$  мг/см и  $I$  в МА). Значение энергии, излученной молибденовым X-пинчем в диапазоне 2.5–3 кэВ, превосходило 10 Дж. Максимальное значение выхода, полученное ранее в экспериментах с меньшими токами, составляет 1–2 Дж в диапазоне энергий квантов  $>1.7$  кэВ. Непосредственные измерения размеров и мощности показали, что формируется плазменный объект яркостью излучения выше  $10^{15}$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср) в мягком рентгеновском диапазоне при размере горячей точки  $\sim 20$  мкм и мощности излучения  $\sim 120$  ГВт, что в несколько раз превосходит полученные ранее значения. Сравнением экспериментальных и расчетных интенсивностей и форм спектральных линий гелиеподобных Cr и Fe для X-пинча из нержавеющей стали были определены параметры плазмы в горячей точке: температура  $T \sim 1200$ – $1400$  эВ, ионная плотность  $n_i \sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>, электронная плотность  $n_e \sim 2.5 \times 10^{23}$  см<sup>-3</sup>. Радиус излучающего объекта составлял  $R_{\text{rad}} \sim 15$  мкм. Экспериментальное значение энергии в линиях позволило по рассчитанной мощности установить характерное время излучения этого источника:  $t \sim 10$  пс. То есть показано, что в действительности мощность в области мягкого рентгеновского излучения существенно превосходит зарегистрированную диодами, временное разрешение которых было ограничено  $\sim 1$  нс. Зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение X-пинча в диапазоне энергий квантов выше 800 кэВ.

Проведенные экспериментальные исследования многопроволочных X-пинчей из нержавеющей стали, никрома, молибдена и вольфрама при токах 1.7–2.3 МА подтвердили основные закономерности динамики X-пинчей, сформулированные при существенно меньших токах, и тем самым указывают на дальнейшую перспективу создания источника излучения с уникальными свойствами на установках с токами мультимегаамперного диапазона.

Шестая глава посвящена исследованиям работоспособности вакуумной передающей линии с магнитной самоизоляцией при экстремальных токовых нагрузках. Лаборатории "Сандия" (США) представили концептуальный проект инерциального УТС реактора на основе быстрого Z-пинча. Один из ключевых узлов данного проекта – уничтожаемые и возобновляемые

вакуумные транспортирующие линии (ВТЛ) с магнитной самоизоляцией. В проекте предполагается их использование при потоке энергии и плотности тока столь высоких, что какой-либо опыт работы при таких параметрах на то время отсутствовал. В частности, полный ток предполагается порядка 60-90 МА, а время функционирования – не менее 160 нс. Взрыв электродов в заменяемой передающей линии может приводить к потере передающих свойств по следующим причинам:

1. Потеря проводимости электродов или неприемлемое увеличение эффективного сопротивления ВТЛ при их взрыве;
2. Увеличение ионных утечек тока с положительного электрода через вакуумный зазор ВТЛ из-за формирования на нем плазменного слоя;
3. Перекрытие вакуумного промежутка плазмой.

Серия экспериментов по исследованию работы короткого отрезка магнитоизолированной вакуумной линии при токах

мегаамперного диапазона с требуемой проектом погонной плотностью тока до 7 МА/см была выполнена на установке С-300. Схема экспериментов с линией и с низкоиндуктивным шунтом на её выходе представлена на Рис.3. Анодом вакуумной линии длиной 1 см служили два плоских параллельных наружных электрода, расстояние между которыми изменялось от 8 до 12 мм. Внутренний отрицательный электрод ВТЛ располагался между наружными электродами симметрично относительно них. В экспериментах в качестве катода, испытываемого рекордной плотностью электрического тока, использовались трубочки или стержни. ВТЛ пристыковывалась к выходу мишенного узла генератора С-300. Токи на входе и на выходе ВТЛ регистрировались магнитными петлями и низкоиндуктивным шунтом, соответственно. Обобщенные данные лазерного зондирования в экспериментах, где центральным электродом служила стальная нержавеющая трубочка с внешним диаметром 1.2 или 1.5 мм и толщиной стенки 100 или 200 мкм, свидетельствуют, что вплоть до времен 240 нс от начала тока плотная плазма с концентрацией электронов, превышающей  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,

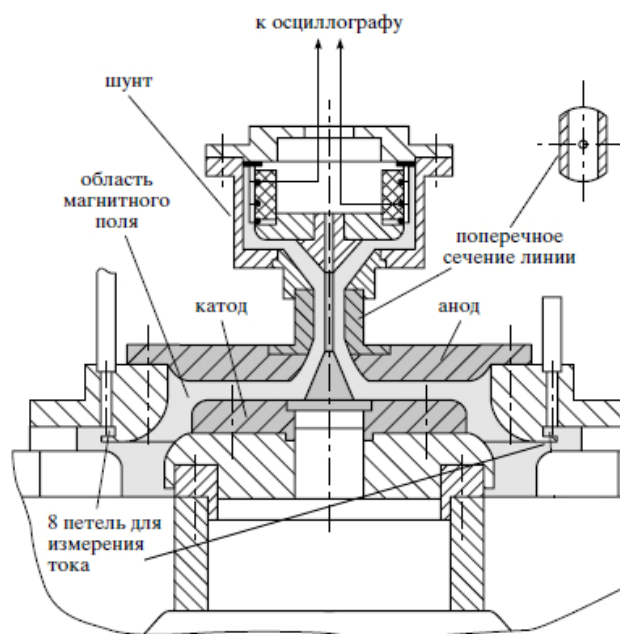


Рис.3. Схема выходного устройства с отрезком линии и с шунтом.

разлетается по диаметру не более чем на 3.2 мм. В серии экспериментов исследовалось влияние чистоты поверхности катода (никелевая трубочка диаметром 0.75 мм и толщиной стенки 100 мкм) на динамику перезамыкания промежутка плазмой. Так как откачка камеры осуществляется паромасляным диффузионным насосом, то на всех внутренних поверхностях электродов может оставаться масляная пленка. При прохождении тока 1.7 МА (время нарастания 160 нс) по катоду на нем образуется плазма из легких элементов (С, О, Н, N), быстрый разлет которой может привести к ухудшению токопередающих свойств линии. Чтобы устранить масляную плёнку на поверхности, из которой может образовываться плазма, внутренний токопровод (катод) поддерживался в нагретом состоянии (при температуре до 600°C) с момента начала высоковакуумной откачки и вплоть до подачи рабочего импульса тока генератора. В сравнительных экспериментах: с прогревом и без прогрева, - временные зависимости выходного и входного токов совпадают с точностью не хуже 10% вплоть до момента 220-230 нс. Хронограммы катодной плазмы также демонстрируют очень похожую динамику ее разлета в обоих вариантах эксперимента. Некоторое отличие заключается в том, что на хронограммах разлетающаяся плазма нагрузок, которые не были предварительно прогреты, имеет более выраженную диффузную границу. По мягкому рентгеновскому излучению была оценена температура разлетающейся катодной плазмы, на основании которой сделана количественная интерпретация параметров её видимой внешней границы. Поскольку наблюдаемое на хронограммах перезамыкание зазора катод-анод плазмой происходит в более поздние моменты, можно сделать вывод, что ВТЛ начинает терять свои токопередающие свойства в момент замыкания зазора редкой плазмой ( $n_e < 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), которая имевшимися средствами не могла быть зарегистрирована. Аналогичные эксперименты с преднагревом и без него, проведенные с алюминиевым катодом, также не показали существенной разницы ни в динамике плазмы, ни во времени перезамыкания линии. В таблице приведены итоговые данные по работоспособности передающих линий для всех испытанных материалов. Кроме экспериментальных исследований динамики катодной плазмы было проведено математическое моделирование электрического взрыва трубочек мегаамперными токами. В результате были получены пространственно-временные распределения электрофизических параметров (плотность, температура, проводимость и т.д.) электродной плазмы. Расчёты показали, что даже плазма с плотностью  $\sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , самой низкой в расчёте, перезамыкает межэлектродный зазор в более поздний момент времени ( $\sim 400$  нс), чем начинают расходиться входной и выходной токи ( $\sim 320$  нс) в

указанных экспериментах. Естественно предположить, что токовые утечки обусловлены динамикой еще более разреженной плазмы. Для объяснения этого эффекта для параметров плазмы в условиях эксперимента наиболее подходит быстрая неустойчивость, возникающая с учетом эффектов ЭМГ/МГД.

*Таблица. Работоспособность передающих линий из разных материалов.*

Материал(Z)	Продолжительность работы, нс
Алюминий (13)	250-260
Никель (28)	220-230
Золото (79)	<b>320-340</b>
Вольфрам (74)	250-260
Свинец (82)	270-280

Экспериментально установлено, что фазовые превращения и электрический взрыв электродов на конечном уничтожаемом участке транспортирующей линии не являются препятствием для передачи энергии к реактору на основе быстрого Z-пинча.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Разработан ряд диагностических методик:

а). Для прямого измерения мощности вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения в широком спектральном интервале:

-была предложена и осуществлена схема выравнивания спектральной характеристики вакуумного рентгеновского диода за счёт применения специально подобранного фотокатода и компенсирующего фильтра, располагающегося перед детектором;

-предложен алгоритм расчёта многодырочной диафрагмы для равномерного ослабления освещённости детектора, который позволяет определить геометрию такой системы по простым формулам с малой погрешностью;

-предложен новый способ и разработано устройство для равномерного уменьшения освещённости детектора мягкого рентгеновского излучения на основе свойства полного внешнего отражения при скользющем падении.

б). Создана активационная и времяпролётная методики для регистрации нейтронного излучения в D-D реакции ядерного синтеза. Проведена абсолютная градуировка активационного детектора.

в). Разработана и создана помехоустойчивая методика регистрации рентгеновских K-спектров алюминия с наносекундным временным разрешением для плазменных экспериментов на мощных импульсных генераторах тока.

г). Создана модель и численные коды для определения параметров горячей оптически плотной плазмы по К-спектрам [H]- и [He]- подобных ионов.

д). Разработана и апробирована оригинальная методика определения импульсного напряжения высоковольтного генератора с плазменным прерывателем тока в диапазоне 2÷5 МВ. Основной методики является измерение высокоэнергичной границы тормозного спектра излучения электронного пучка, возникающего в вакуумном диоде генератора, с помощью пороговых фотонейтронных реакций. Метод обладает высокой точностью, не требует абсолютных калибровок и, благодаря растянутой во времени регистрации, не чувствителен к импульсным электромагнитным помехам и рентгеновскому излучению.

2. Предложены, разработаны и изготовлены сложные экспериментальные нагрузки, в том числе тонкостенные двухоболочечные пластиковые лайнеры с газовым наполнением, мишенные узлы и нагрузки для различных Z- и X-пинчей.

3. В исследованиях динамики Z-пинчей:

а). Характерный период осевой неустойчивости типа стратификации в сборках, составленных из разных материалов, существенным образом определяется периодом элемента с наибольшим атомным номером. Этот период распространяется на все проводники. Влияние неустойчивости не удаётся уменьшить за счет комбинации разных материалов в сборке, поскольку пространственный период для них устанавливается один и тот же.

б). На этапе ускорения сборок многопроволочных лайнеров были обнаружены теньевым лазерным зондированием нерегулярные светлые полосы, параллельные оси лайнера. Наиболее вероятным механизмом "просветления" является филаментация тока в общей для всех проводников плазменной короне.

в). В экспериментах по имплозии двухкаскадных многопроволочных лайнеров на генераторе С-300, впервые обнаружен эффект "провала" внешней сборки сквозь внутреннюю сборку в процессе магнитного обжатия. Оказалось, что в процессе сжатия ток перехватывается внутренним лайнером, а спектр излучения Z-пинча в экспериментах с вложенными сборками, отличающихся материалом (W и Al) проволочек, соответствует материалу внешнего лайнера. Сильное отличие в линейчатых рентгеновских спектрах, полученных при перестановке материалов внешней и внутренней сборок, продемонстрировало, что плазма от двух сборок и в конечной излучающей стадии образуют геометрические конфигурации, которые слабо взаимодействуют и практически не пересекаются между собой.

г). С помощью созданной методики впервые в экспериментах по имплозии многопроволочных сборок мегаамперными токами на сильноточном генераторе С-300 зарегистрированы линейчатые спектры [H]- и [He]-подобных ионов алюминия с наносекундным временным разрешением. Динамика спектров демонстрирует многократные резкие изменения параметров плазмы, что говорит о неодновременности имплозии по длине нагрузки и демонстрирует высокую локальную скорость преобразования тепловой энергии электронов в излучение в сжатом состоянии. Зарегистрированное одновременное разгорание резонансных линий [H]- и [He]- ионов алюминия дает основание полагать, что до сжатия основной массы лайнера на оси уже существует горячая плазма, электронная температура которой превосходит 0.5 кэВ.

д). В экспериментах по имплозии лайнеров из легких элементов ( $Z \leq 8$ ) для достижения устойчивого сжатия предложен и экспериментально проверен на работоспособность двухоболочечный лайнер, состоящий из двух тонких герметичных пластиковых оболочек с газовым наполнением и позволяющий организовать равномерно распределённое по азимуту протекание электрического тока на старте. Продемонстрировано устойчивое десятикратное сжатие таких лайнеров с массой более 200 мкг.

е). В экспериментах на установках "Модуль А-5" и "Ambiorix" продемонстрировано стабилизирующее влияние поля  $B_z$  на имплозию лайнера и работоспособность схемы "лайнер-конвертор", позволяющей получить яркий рентгеновский источник за счет теплового потока электронов из горячей плазмы вдоль оси. Измерены параметры плазмы по её рентгеновскому изучению, которые хорошо согласуются с основополагающей моделью и с результатами численного моделирования. В экспериментах на установке С-300 спектроскопически показано, что наличие в гелиевом Z-пинче локальных примесей, состоящих из элементов со средними порядковыми номерами, ускоряет обмен энергией между ионами и электронами. Это приводит к лучшему нагреву электронов и увеличению выделения энергии на конверторе.

ж). Исследование динамики сжатия плазмы в веществе из лёгких элементов, содержащем дейтерий и моделирующем конденсированный водород, показали, что в выделенной точке пинча с начальной плотностью  $10^{-1}$  г/см<sup>3</sup> при сжатии достигаются температура и плотность плазмы, достаточные для того, чтобы диагностировать ядерную реакцию синтеза. Измерения указывают как на присутствие термоядерного механизма реакции, соответствующего ионной температуре плазмы в перетяжке, так и на механизм, связанный с нетепловым распределением дейтронов. При токах 1-

3 МА динамика плазмы не противоречит простой модели динамики плазмы, предложенной Колбом-Вихревым и заключающейся в развитии перетяжечной неустойчивости под действием нарастающего в процессе сжатия давления магнитного поля в режиме близком к равновесию Беннета.

4. Впервые проведены экспериментальные исследования многопроволочных X-пинчей из нержавеющей стали, нихрома, молибдена и вольфрама на уровне тока 1.7-2.3 МА. Они подтвердили основные закономерности динамики X-пинчей, сформулированные при существенно меньших токах, и, тем самым, указали на реальную перспективу создания источника излучения с уникальными свойствами на установках с токами мультимегаамперного диапазона. Непосредственные измерения размеров и мощности источника показали, что формируется плазменный объект яркостью излучения выше  $10^{15}$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср) в мягком рентгеновском диапазоне при размере горячей точки ~20 мкм и мощности излучения ~120 ГВт, что в несколько раз превосходит полученные ранее значения на генераторах с током 1-1.2 МА. Следует отметить, что приведённая величина яркости имеет статус оценки снизу, определяемой временным разрешением детекторов излучения.

5. На установке С-300 была выполнена серия экспериментов по исследованию работы короткого отрезка магнитоизолированной вакуумной транспортирующей линии (ВТЛ) при токах мегамперного диапазона. ВТЛ начинает терять свои токопередающие свойства в момент замыкания зазора редкой плазмой  $N_i < 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Сильное расхождение осциллограмм входного и выходного токов происходит в момент времени близкий к заполнению зазора плотной плазмой.

Экспериментально показано, что при пропускании тока с линейной плотностью до 7 МА/см по модели линии с магнитной изоляцией входной и выходной токи отличаются менее чем на 10% достаточно длительное время (не меньше 230 нс от момента начала тока, максимум которого достигается на 200 нс) вне зависимости от материала и степени очистки электрода. Продолжительней всех (320-340 нс) транспортирующие свойства сохраняют линии, центральный электрод которых изготовлен из золота.

Тем самым продемонстрирована пригодность уничтожаемых и возобновляемых вакуумных транспортирующих линий с магнитной самоизоляцией в проекте УТС реактора на основе быстрого Z-пинча.

## Публикации

автора в реферируемых изданиях, наиболее существенные по теме диссертации и достаточно полно отражающие её содержание:

1. Боголюбский С.Л., Гордеев Е.М., Данько С.А., Каленский В.А., Калинин Ю.Г., Киселёв В.Н., Коба Ю.В., Королёв В.Д., Куксов П.В., Ликсонов В.И., Лукин А.А., Рудаков Л.И., Смирнова Е.А., Тулупов М.В., Фанченко С.Д., Черненко А.С., Чикин Р.В., Шашков А.Ю., Шестаков Ю.И. Исследование динамики сжатия лайнера на установке «Ангара-5-01». Письма в ЖТФ, 1985, т.11, вып.20, с.1271-1277.
2. Боголюбский С.Л., Волкович А.Г., Гордеев Е.М., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Коба Ю.В., Королёв В.Д., Куксов П.В., Ликсонов В.И., Лукин А.А., Рудаков Л.И., Смирнова Е.А., Степанов В.Е., Уруцкоев Л.И., Фанченко С.Д., Чесноков А.В., Шашков А.Ю., Ярцева О.Н. Обжатие газовой струи на установке «Модуль-А5-01». Письма в ЖТФ, 1987, т.13, вып.15, с.901-906.
3. Данько С.А., Шестаков Ю.И. Термоядерное устройство. Авт. свидетельство СССР № 1134022, 1983.
4. Данько С.А., Шестаков Ю.И. Устройство и вещество для изготовления тонких диэлектрических плёнок. Авт. свидетельство СССР № 1153723, 1983.
5. Данько С.А., Ярцева О.Н. Детектор мягкого рентгеновского излучения. Приборы и техника эксперимента, 1988, №2 с.186-187.
6. Боголюбский С.Л., Данько С.А., Ликсонов В.И., Лукин А.А., Куксов П.В., Смирнова Е.А. Динамика и излучательные характеристики наносекундных мегаамперных Z-пинчей. Письма ЖТФ, 1989, т.15, вып.10, с.88-91.
7. Аранчук Л.Е., Данько С.А., Копчиков А.В., Королев В.Д., Чуватин А.С., Яньков В.В. Экспериментальное исследование плазмы в перетяжке быстрого Z-пинча. Физика плазмы, 1997, т.23, 3, с.215-221.
8. Гаск А.-М., Грюа П., Ромари Ф., Фриар Д., Назе К., Зентер П., Жаке Л., Порне Ж., Горбулин Ю.М., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С. Эксперимент «лайнер-конвертор» на установке «Ambiorix». Физика плазмы, 1998, т.24, №8, с.726-730.
9. Гордеев Е.М., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Копчиков А.В., Королев В.Д., Куксов П.В., Рупасов А.А., Саркисов Г.С., Смирнова Е.А., Шашков А.Ю., Шиканов А.С., Яньков В.В. Исследование динамики сжатия Z-пинчей промежуточной плотности. Физика плазмы, 1998, т.24, №11, с.982-988.
10. Bakshaev Yu.L., Blinov P.I., Chernenko A.S., Dan'ko S.A., Kalinin Yu.G., Korolev V.D., Tumanov V.I., Shashkov A.Yu., Chesnokov A.V., Ivanov M.I. Diagnostic arrangement on S-300 facility. Review of Scientific Instruments.v.72, №1, p.1210-1213 (2001).
11. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Вихрев В.В., Гордеев Е.М., Данько С.А., Королев В.Д., Медовщиков С.Ф., Недосеев С.Л., Смирнова Е.А., Туманов



- В.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю. Исследование плазмы в предварительно созданной перетяжке Z-пинча. Физика плазмы, 2001, т.27, №12, с.1101-1109.
12. Баринов Н.У., Будков С.А., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Карпов В.Е., Лобанов А.И., Масленников Д.Д., Ходеев И.А. Модернизированная установка РС-20 для исследования характеристик плазменного прерывателя тока. ПТЭ, 2002, т.45, №2, стр.112-119.
13. Данько С.А., Долгачёв Г.И., Калинин Ю.Г., Масленников Д.Д. Измерение высокого напряжения в вакуумном диоде сильноточного генератора с помощью фотонейтронных реакций. Физика плазмы, 2002, т.28, №8, с.652-656.
14. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Вихрев В.В., Данько С.А., Королев В.Д., Мещеров Б.Р., Недосеев С.Л., Смирнова Е.А., Устроенов Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю. Измерение нейтронного излучения в перетяжке Z-пинча. Физика плазмы, 2006, т.32, №7, с.579-587.
15. Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Смирнов В.П., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Дубас Л.Г., Корельский А.В., Королёв В.Д., Мижирицкий В.И., Устроенов Г.И., Черненко А.С., Чикин Р.В., Шашков А.Ю., Ли Дзэнхон, Хуа Синьшен, Пен Сяньцзю, Фен Шупин, Гуо Цун, Цзян Шилун, Нинь Чен, Сон Фенджун, Сюй Жонкун, Сюй Цзэпин, Ян Ченли, Ян Цзюньлун, Ян Либин. Эксперименты по имплозии гетерогенных многопроволочных сборок на установке С-300. Физика плазмы, 2006, т.32, №8, с.714-726.
16. Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Черненко А.С., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Шашков А.Ю., Сасоров П.В., Ткаченко С.И. Исследование динамики приэлектродной плазмы в сильноточной магнитоизолированной транспортирующей линии. Физика плазмы, 2007, т.33, №4, с.291-303.
17. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Черненко А.С., Ткаченко С.И. Транспортирующие свойства сильноточной магнитоизолированной передающей линии и динамика приэлектродной плазмы. Физика плазмы, 2008, т.34, №7, сс.627-640.
18. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Брызгунов В.А., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Зеленин А.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Пикуз С.А., Романова В.М., Смирнов В.П., Ткаченко С.И., Устроенов Г.И., Черненко А.С., Шелковенко Т.А., Щагин В.А. Исследования мегаамперного многопроволочного X-пинча. Письма в ЖЭТФ, 2008, Т. 87, No. 7, 426-432.

19. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Устроев Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю., Ткаченко С.И. Моделирование сильноточных линий с магнитной самоизоляцией в рамках концептуального проекта импульсного термоядерного реактора на Z-пинче. Вопросы атомной науки и техники (научно-технический сборник). Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып.4, с.3-24.
20. Fan Ye, Yi Qin, Shuqing Jiang, Feibiao Xue, Zhenghong Li, Jianlun Yang, Rongkun Xu, Anan'ev S. S., Dan'ko S. A., and Kalinin Yu. G. A time-resolved spectroscopic diagnostic based on fast scintillator and optical fiber array for Z-pinch plasmas. Review of scientific instruments 80, 106105 (2009).
21. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Брызгунов В.А., Данько С.А., Зеленин А.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Пикуз С.А., Смирнов В.П., Соколов М.М., Ткаченко С.И., Устроев Г.И., Черненко А.С., Шелковенко Т.А. Исследования динамики плазмы в X-пинчах мегаамперного диапазона. Физика плазмы, 2009, том 35, № 6, с. 507–519.
22. Ананьев С.С., Данько С.А., Калинин Ю.Г. Регистрация рентгеновских спектров ионов алюминия с временным разрешением при сжатии проволочныхборок мегаамперными токами. ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез 2009, вып.2, с.43-51.
23. Брызгунов В.А., Данько С.А. Расчет системы ахроматического ослабления мягкого рентгеновского излучения на основе многодырочной диафрагмы. Приборы и техника эксперимента, 2010, № 6, с. 111–116.
24. Ананьев С.С., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Фань Е (Fan Ye), И Цинь (Yi Qin), Шуцин Цзян (Shuqing Jiang), Фэйбао Сюэ (Feibiao Xue), Чжэнхун Ли (Zhenghong Li), Цзяньлунь Ян (Jianlun Yang), Жункунь Сюй (Rongkun Xu). Регистрация спектров многозарядных ионов с временным разрешением и определение параметров горячей компоненты плазмы при магнитном сжатии многопроволочныхборок. Письма в ЖЭТФ, 2010, т.92, вып. 11, с.817-822.
25. Данько С.А. Способ измерения мощности мягкого рентгеновского излучения и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2422854. Бюллетень «Изобретения и полезные модели» Роспатента №18 от 27.06.2011.