

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Чайковского Станислава Анатольевича «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13-электрофизика, электрофизические установки

В работе исследуется широкий круг вопросов, связанных с разработкой высоковольтных наносекундных генераторов для создания разрядов с токами мегаамперного диапазона, исследованиями широкого круга физических процессов, протекающих в разрядах различных типов, а также смежных вопросов.

**Актуальность темы.** Исследования физических процессов в мощных импульсных разрядах мегаамперного диапазона токов носят разноплановый характер. Прежде всего, они важны с точки зрения фундаментальной физики, поскольку в таких разрядах температура плазмы достигает кэВ-ного диапазона, магнитные поля – сотен Тесла, давление лежит в мегабарной области, поэтому вещество переходит в экстремальное состояние, где приобретает новые физические свойства. Кроме того, в течение нескольких десятилетий эти исследования направлены на решение важнейшей научно-технической проблемы: реализации процесса инерциального термоядерного синтеза. Еще одним направлением использования таких систем является создание эффективных источников нейтронного и мягкого рентгеновского излучения, представляющего интерес для фундаментальной спектроскопии, микролитографии и изучения радиационной стойкости материалов. Наконец, работы в этой области послужили стимулом для развития мощных сильноточных систем, создания новых классов электрофизических установок, имеющих многочисленные применения в промышленности. Подобные исследования интенсивно развиваются в ведущих мировых научных центрах: Sandia National Laboratory, Livermore National Laboratory и др. Вследствие этого, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и списка литературы, включающего 338 наименований. Общий объем диссертации составляет 277 страниц текста, включая 18 таблиц и 145 рисунков.

**Во введении** автор дает краткий исторический обзор исследований по теме диссертации, на основании которого дано обоснование актуальности темы исследования, формулируются также основные цели и задачи работы., определена научная новизна полученных в работе результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация диссертационной работы.

**В первой главе** приведен детальный обзор современного состояния исследований различных типов сильноточных импульсных разрядов. Эта часть диссертации имеет самостоятельный научный интерес. В частности,



представляется важным, имеющим, по-видимому, универсальный характер, сделанный автором на основании анализа литературных данных, вывод о ключевой роли скорости нарастания тока разряда в эффективности процесса пинчевания плазмы. Эта глава весьма значительна по объему, что обусловлено широким кругом разнородных объектов и явлений, исследуемых в работе.

**Во второй главе** описаны параметры разработанного автором трансформатора тока нагрузки и результаты экспериментов с его использованием на тераваттном импульсном генераторе МИГ. Показана целесообразность использования трансформатора для экспериментов с низкоиндуктивными нагрузками, в которых удалось путем снижения импеданса генератора значительно повысить ток разряда.

**В третьей главе** представлены результаты работ по созданию и исследованию возможных применений малогабаритных импульсных генераторов тока, предназначенных для работы с X-пинчами. Описана оригинальная конструкции импульсного генератора тока, позволившая создать компактный источник для целей рентгенографии в мягком рентгеновском диапазоне спектра, и было проведено теневое рентгеновское зондирование статических объектов, продемонстрировавшее эффективность созданной аппаратуры.

С помощью описанного в главе 3 генератора выполнены эксперименты по зондированию многопроволочных лайнеров на сильноточном генераторе Ангара-5-1 (ТРИНИТИ), результаты которых представлены в **главе 4**. Детально описаны конструктивные особенности используемой экспериментальной схемы, в т.ч. согласование геометрии, особенности синхронизации генератора, защита от помех и др. Приведены результаты измерений, дающие ценную информацию о динамике имплозии проволочной нагрузки.

**Глава 5** посвящена моделированию динамики перетяжки X-пинча и сравнению результатов моделирования с экспериментальными данными. Показано, что разработанная автором, достаточно простая модель правильно качественно описывает эволюцию некоторых важных параметров процесса формирования перетяжки при варьировании характеристик разряда. Кроме того, получено неплохое количественное согласие расчетных данных с результатами выполненных экспериментов.

**В Главе 6** описаны эксперименты с каскадированными газовыми лайнерами и проведен их анализ. Эксперименты проводились в широком диапазоне токов генератора, с одно-, двух- и трехкаскадными лайнерами с различными плазмообразующими газами. Построенные теоретические модели процесса пинчевания лайнеров вполне адекватно описывают наблюдаемые в эксперименте эффекты.

**Глава 7** посвящена изучению процесса нелинейной диффузии магнитного поля в металлы. Теоретический расчет позволил сформулировать предложения по экспериментальной проверке полученных данных. Результаты такой проверки, проведенные с помощью разработанной методики, показали неплохое согласие с выводами модельных расчетов.



Результаты экспериментов по исследованиям интересного явления: поверхностного взрыва проводников в быстронарастающих мегагауссных магнитных полях, - изложены в **Главе 8**. Для различных металлов найдены значения критического магнитного поля, необходимого для поверхностного взрыва проводника вследствие быстрого джоулева нагрева скин-слоя.

В **Главе 9** приведены экспериментальные данные исследования процесса поверхностного плазмообразования в двухслойных проводниках и их интерпретация с помощью модели нелинейной диффузии магнитного поля в проводники, развитой в Главе 7.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Отметим **научную новизну и ценность наиболее существенных результатов**, полученных автором диссертации, и **их значимость для науки и производства**.

1. Разработан ряд малогабаритных, простых в эксплуатации, высоковольтных импульсных генераторов, позволяющих создать комплекс радиографической рентгеновской диагностики на основе X-пинча. С помощью комплекса можно получать теневые изображения объектов, просвечивая их мягким рентгеновским излучением с наносекундным временным и микронным пространственным разрешением. Эти диагностические комплексы используются в нескольких лабораториях, в том числе на генераторе Ангара-5-1, для рентгеновского зондирования имплозии многопроволочных лайнеров. Важным достоинством данного комплекса является высокая точность синхронизации генераторов с внешними устройствами, что позволяет создавать многокадровые системы рентгеновского зондирования.
2. На основе оригинальной достаточно простой модели формирования «горячей точки» X-пинча, получен критерий подобия, связывающий параметры пинча и импульса тока с моментом формирования рентгеновской вспышки. Показано, что ключевым параметром подобия является длина перетяжки, которая, как предположил автор на основе данных эксперимента, слабо зависит от погонной массы пинча. Очень важно, что получено хорошее соответствие предсказаний модельных расчетов с данными выполненных измерений. Этот результат представляет большой интерес для активно ведущихся в настоящее время экспериментов по созданию с помощью X-пинчей локальных областей высокотемпературной плазмы для различных приложений (работы по Программе ИТС, интенсивные источники нейтронов и рентгеновского излучения и др.)
3. Разработана оригинальная методика измерения толщины скин-слоя магнитного поля мегагауссного диапазона путем измерений напряженности электрического поля на внутренней поверхности трубчатых проводников. Методика апробирована в экспериментах на генераторах МИГ с различными материалами, и получены данные о скорости проникновения в проводник



быстронарастающего магнитного поля и величине магнитного поля, приводящей к скиновому взрыву поверхности проводника. Реализованная методика позволяет оценить стойкость электродов и передающих линий к воздействию сверхсильных магнитных полей. Это является важным результатом для существующих и, особенно, для проектируемых генераторов мультимегаамперного диапазона, где эта проблема станет чрезвычайно актуальной.

4. Экспериментально показана перспективность использования двухслойных проводников с внешним слоем меньшей проводимости для существенной задержки момента поверхностного плазмообразования вследствие скинового взрыва, что также представляет практический интерес для конструирования передающих линий генераторов мегамперного диапазона токов.
5. Исследования процесса пинчевания каскадированных газовых лайнеров позволили определить диапазон параметров, обеспечивающих повышение компактности формируемого пинча и повышения за счет этого эффективности генерации мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов  $1\div 3$  кэВ. Этот результат носит фундаментальный характер, а также позволит существенно продвинуть исследования газовых пинчей в прикладную область с целью использования в качестве мощных источников рентгеновского излучения.

**Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций** диссертационной работы определяется, прежде всего, тщательностью подготовки проведения экспериментальных исследований. Автором очень подробно описаны используемые оригинальные физические подходы и конструктивные решения. Поскольку эксперименты, как правило, выполнялись при рекордных значениях разрядных токов, напряжений, малых длительностях процессов, большое внимание в работе уделялось методическому обеспечению исследований (синхронизации аппаратуры, защите от помех и др.) Важным достоинством работы, обеспечивающим достоверность результатов, является сочетание экспериментальных исследований с модельными расчетами. Здесь автор показал себя не только высококлассным экспериментатором, но и специалистом широкого профиля, способным строить серьезные теоретические модели. Кроме того, достоверность результатов работы обеспечивается сопоставлением с данными других авторов. Особо следует отметить широкий набор как традиционных, хорошо апробированных, так и оригинальных, разработанных автором, диагностических средств, используемых в экспериментах.

Как всякое серьезное научное исследование, диссертационная работа не свободна от **недостатков**.

На с.71-76 Главы 2 приведено подробное описание конструктивных особенностей (вплоть до диаметра и числа отверстий для крепежа), а также процесса сборки разработанного трансформатора тока нагрузки. Это, на мой



взгляд, является совершенно избыточным в диссертации на соискание ученой степени д.ф.-м.н. Автору следовало также сравнить полученные параметры трансформатора с аналогичными разработками других авторов, а также привести примеры его применения в экспериментах на генераторе МИГ.

В Главе 3 также следует отметить некоторый перекоп в описание технических деталей экспериментальной аппаратуры, автору следовало больше внимания уделить физическим аспектам исследований. В частности, в разделе 8 упоминается о наблюдаемом эффекте многократного пинчевания плазмы X-пинча, и следовало хотя бы кратко прокомментировать физику этого интересного явления. Кроме того, отсутствуют количественные оценки важнейшей для данного применения характеристики X-пинча: интенсивности генерируемого рентгеновского излучения.

В Главе 5 на с. 139 приведены Табл. 5.1 и 5.2, из которых видно, что рассчитанная по формуле 5.23 длина перетяжки систематически превышает экспериментально измеренные значения. Следует прокомментировать этот результат. Непонятно также, зачем автор приводит для оценки длины перетяжки формулу 5.24, правомерность использования которой, по его же признанию, весьма сомнительна, и которая, действительно, дает большое расхождение с экспериментом.

В Главе 6 детально исследован и оптимизирован процесс сжатия предложенной структуры каскадированных газовых лайнеров, однако не проведено сравнение эмиссионных характеристик одно- двух- и трехкаскадных лайнеров, и остается неясным, достигнута ли поставленная цель исследований: повышение эффективности генерации рентгеновского излучения плазмы пинча, в частности имеются ли количественные оценки эффекта. Кроме того, поскольку подобные исследования ведутся рядом научных групп в России и за рубежом, было необходимо также провести сравнение с их результатами.

Отмеченные недостатки носят, в основном, рекомендательный характер и не снижают, в целом, высокой оценки диссертационной работы.

### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

В диссертационной работе представлены результаты создания и использования электрофизической аппаратуры для исследования плазменных структур, полученных из твердой или газообразной фазы. Большое внимание уделяется развитию существующих и поиску новых методов и принципов создания аппаратуры с рекордными параметрами, использованию исследуемых явлений для технических приложений. Автором также решаются интересные теоретические проблемы электрофизики. Представленные в работе результаты могут служить основой для разработки новых классов электрофизических комплексов, оперирующих в области высоких значений токов и напряжений. В соответствии с паспортом специальности такие работы относятся к специальности 01.04.13-электрофизика, электрофизические установки.



## Заключение

Диссертационная работа С.А. Чайковского выполнена на высоком научном уровне, является завершенным научным исследованием, результаты работы представляют весьма существенный вклад в развитие фундаментальных представлений и прикладных аспектов физики и техники сильноточных высоковольтных разрядов. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных в диссертации результатов несомненны. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором диссертации, является вполне обоснованной. Автор является признанным специалистом в области сильноточных импульсных систем, результаты его исследований докладывались на престижных международных конференциях, опубликованы в рейтинговых научных изданиях и широко известны мировой научной общественности.

Таким образом, диссертационная работа «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона», отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ, а ее автор Чайковский Станислав Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13-электрофизика, электрофизические установки

Официальный оппонент, заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович.

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

Телефон: 8- (3952)-521-254; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

26. 08.2016 г.

 Паперный В.Л.

