


УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»  
д.ф.-м.н., профессор

  
В.Е. Черковец  
“ 28 ” — 2016 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" на диссертацию 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.

### Актуальность

Исследования свойств плотной плазмы, формируемой под воздействием мощных наносекундных импульсов тока, представляет значительный научный интерес и имеет множество практических приложений. В настоящее время в мире интенсивно ведутся исследования в направлении реализации управляемого инерциального синтеза на основе плазменных лайнеров. Эти исследования требуют глубокого понимания процессов в начальной стадии сжатия лайнеров различных конфигураций, зарождения и дальнейшего развития неустойчивостей, генерации излучения в финальной стадии сжатия, поведения поверхности электродов в сверхсильных магнитных полях, а также развития диагностических методик с высоким временным и пространственным разрешением. Эти процессы исследованы в рассматриваемой работе, цель которой заключалась в исследованиях формирования плотной поверхностной плазмы вследствие электрического взрыва проводников при погонной плотности тока свыше мегаампера на сантиметр и времени его нарастания 100 нс. Эти исследования нужны для разработки мегаамперных установок для ИТС. Автором исследовались процессы нелинейной диффузии мегагауссных магнитных полей в материал электродов комбинированного состава. Исследования физических процессов при имплозии плазменных лайнеров с каскадированной структурой с целью формирования повышения компактности сжатия плазмы, интенсивно излучающих в спектральном диапазоне выше 1 кэВ, необходимы для создания установок с высокой

эффективностью преобразования электрического импульса в излучение. Автором с сотрудниками создан ряд приборов использующих уникальные свойства X-пинчей для рентгеновской диагностики с высоким временным (менее 1 нс) и пространственным (3-5 мкм) разрешением. Им исследованы характеристики X-пинчей для рентгеновского теневого зондирования. Такие приборы являются примером новой линии диагностических устройств.

## **Структура и содержание работы**

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 показана актуальность исследований, сформулирована цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическая ценность результатов, приведены защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по тематике диссертации и посвящена анализу сложившихся в настоящее время научных представлений в областях электрического взрыва проводников, в том числе, скипового взаимодействия сверхсильных магнитных полей с поверхностью металлов, стабилизации сжатия плазменных лайнеров и эффективности конверсии кинетической энергии лайнера в мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов выше 1 кэВ, механизмов формирования горячей точки в X-пинчах. Обсуждаются вопросы требований к импульсным генераторам тока с точки зрения их использования для питания X-пинчей. На основе проведенного анализа обосновываются цели и задачи работы.

Во второй главе представлены результаты экспериментальной апробации сравнительно нового способа согласования передающей линии мощного сильноточного импульсного генератора тока с низкоимпедансной нагрузкой – использование так называемого трансформатора тока нагрузки. На тераваттном генераторе МИГ при уровне тока до 3 МА продемонстрирована возможность полуторакратного увеличения тока нагрузки за счет использования разработанной конструкции трансформатора тока. Основной особенностью предложенного трансформатора является его компактность и возможность недорогого демонтажа, что позволяет использовать генератор МИГ и в других режимах работы.

Третья глава посвящена описанию ряда малогабаритных импульсных генераторов тока с энергозапасом около 1 кДж со временем вывода энергии 100-200 нс, которые специально разрабатывались для питания X-пинчей. Показано, что такие генераторы при работе с X-пинчами позволяют реализовать методику импульсного теневого рентгеновского зондирования быстропротекающих процессов на основе простой схемы точечного проецирования с пространственным разрешением 4-5 мкм и временным разрешением 1-2 нс. Компактность генераторов позволяет транспортировать их в другие лаборатории и использовать в качестве современного диагностического средства, что успешно продемонстрировано также и в главе 4.

В главе 4 изложены результаты работ по созданию синхронизованного генератора X-пинча и эксперименты по зондированию с помощью такого генератора многопроволочных лайнеров на самом мощном сильноточном генераторе в России (до 6 ТВт) Ангара-5-1. В силу того, что вакуумная камера генератора Ангара-5-1 имеет диаметр 2.5 м, а установка импульсного генератора для питания X-пинча в вакуумную камеру слишком сложна, была разработана низкоиндуктивная передающая линия, соединяющая импульсный генератор тока с узлом нагрузки с X-пинчем. Импульс тока через вакуумное уплотнение по низкоиндуктивной передающей линии НПЛ поступает в узел нагрузки с установленным в нем X-пинчем. Узел нагрузки устанавливается в вакуумной камере генератора Ангара-5-1.

Система коммутации обеспечила синхронизацию зондирующего рентгеновского импульса X-пинча с импульсом тока генератора Ангара-5-1 с точностью не хуже  $\pm 10$  нс. Такой синхронизируемый с мегаамперной установкой генератор X-пинча является уникальным диагностическим прибором.

В пятой главе рассмотрены результаты моделирования динамики формирования так называемой «перетяжки» X-пинча, представлены результаты экспериментов и их сравнение с данными моделирования. Показано, что в достаточно широком диапазоне начальных параметров X-пинчей, наблюдаемая в эксперименте длина «перетяжки» изменяется сравнительно слабо и незначительно увеличивается с ростом начальной погонной массы. Экспериментально определенные значения длины «перетяжек» X-пинчей удовлетворительно согласуются с таковыми, рассчитанными в рамках предложенной модели. Сделан вывод о том, что в X-пинчах момент появления импульса рентгеновского излучения определяется длиной «перетяжки».

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований плазменных лайнеров каскадированной структуры (двух- и трехкаскадных), демонстрирующие преимущества указанной схемы лайнера для повышения компактности финального плазменного пинча, что актуально с точки зрения повышения эффективности генерации мягкого рентгеновского излучения. Предложено два механизма повышения компактности сжатия плазмы лайнеров каскадированной структуры, общим для которых является стабилизирующее влияние сокращения времени сжатия излучающей плазмы по сравнению со временем нарастания тока генератора.

В главе 7 рассмотрены результаты исследований, направленных на изучение проникновения быстронарастающих (около 100 нс) сверхсильных магнитных полей в проводники. Предложена и путем численного моделирования обоснована оригинальная методика измерения скорости нелинейной магнитной диффузии в цилиндрические трубки. С помощью этой методики показано, что при индукции магнитного поля 200-400 Т и времени нарастания поля 100 нс глубина проникновения магнитного поля в проводник удовлетворительно описывается предложенным ранее приближенным аналитическим выражением.

Глава 8 посвящена другому аспекту взаимодействия импульсного сверхсильного магнитного поля с веществом, а именно, образованию поверхностной плазмы за счет скин-эффекта электрического взрыва. Приведены результаты экспериментов с цилиндрическими проводниками из меди, алюминия, титана, стали 3 и нержавеющей стали, в которых регистрировался момент возникновения излучающей плазмы на поверхности проводника, по которому пропускался импульс тока сильноточного генератора МИГ. Анализ результатов экспериментов, сравнение с результатами аналогичных работ на генераторе Zebra, США позволили сформулировать критерий поверхностного взрыва проводников в мегагауссных магнитных полях.

Глава 9 посвящена экспериментальному исследованию одного из способов подавления поверхностного плазмообразования в сверхсильных магнитных полях, позволяющего также снизить степень развития поверхностных неустойчивостей. Конкретно, показано, что нанесение на проводник тонкого слоя материала с меньшей проводимостью позволяет задержать момент плазмообразования.

В заключении приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы (338 наименований) содержит полезную, обширную и вполне достаточную библиографию по тематике диссертации.

### **Достоверность и новизна результатов**

**Достоверность и обоснованность** научных результатов подтверждается воспроизведением экспериментальных результатов, сравнением полученных экспериментальных данных с данными моделирования и результатами, полученными

другими авторами.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

Обоснована и в экспериментах на генераторе МИГ апробирована новая методика измерения толщины скин-слоя магнитного поля мегагауссного диапазона на основе измерений напряженности электрического поля на внутренней поверхности трубчатых проводников.

Получен набор новых экспериментальных данных, характеризующих процесс поверхностного плазмообразования на поверхности проводника, помещенного в сверхсильное магнитное поле, для ряда широко используемых в электротехнике материалов. На основе этих данных сформулирован новый критерий поверхностного скинового взрыва проводников.

Экспериментально показано, что применение двухслойных проводников с внешним (обращенным к магнитному полю) слоем меньшей проводимости позволяет при определенных условиях существенно задержать момент поверхностного плазмообразования вследствие скинового взрыва, а также развития неустойчивостей поверхностной плазмы.

Предложена и реализована опирающаяся на сравнение с экспериментальными данными новая расчетная модель динамики формирования перетяжки и горячей точки X-пинча, в которой ключевую роль играет длина перетяжки X-пинча. Модель позволяет обосновать скейлинг момента генерации рентгеновской вспышки от параметров проводников X-пинча и формы импульса тока.

Разработан ряд малогабаритных импульсных генераторов нового типа тока для работы с нагрузкой в виде X-пинча, которые позволяют в различных лабораториях реализовать методику теневого рентгеновского зондирования плазменных процессов с микронным пространственным разрешением при длительности зондирующего импульса 1-3 нс с высокой точностью синхронизации с исследуемым процессом.

Эти положения изложены в опубликованных автором с сотрудниками работах, доложены на научных конференциях. Работы С. А. Чайковского известны в научном сообществе, занимающемся сильноточной электроникой и физикой пинчей. Автором по теме диссертации с 1996 г по настоящее время опубликованы 15 статей, 12 из которых индексируются РИНЦ, Web of Science и Scopus а также представлен 21 доклад на международных конференциях.

### **Практическая ценность результатов;**

При выполнении работы автором разработан и создан ряд компактных импульсных генераторов тока с амплитудой 200÷300 кА и временем нарастания 150÷200 нс, на которых проведены исследования характеристик источника мягкого рентгеновского излучения на основе X-пинча и показана возможность реализации метода импульсного рентгеновского зондирования с микронным пространственным и наносекундным временным разрешениями.

Автором разработана постановка экспериментальных исследований диффузии азимутального магнитного поля мегагауссного диапазона в цилиндрические проводники и поверхностного скинового на тераваттном импульсном генераторе МИГ при уровне тока до 2.5 МА и временем его нарастания 100 нс и получен набор экспериментальных данных о скорости проникновения быстронарастающего магнитного поля мегагауссного диапазона в проводники с различными свойствами и величине индукции магнитного поля, приводящей к скиновой взрыву поверхности, и проведено их сравнение с результатами других экспериментов, результатами оценок и моделирования.

Автором в широком диапазоне амплитуд тока и параметров каскадированных лайнеров проведены экспериментальные исследования динамики имплодирующей плазмы,

влияния неустойчивостей на компактность финального пинча и его излучательные характеристики. В широком диапазоне параметров импульсов тока генератора определены оптимальные параметры каскадированных лайнеров с точки зрения формирования компактных, интенсивно излучающих в спектральном диапазоне 1-3 кэВ плазменных пинчей, что позволяет повысить эффективность преобразования энергии электрического импульса в рентгеновское излучение сверхкиловольтного диапазона

Предложенные автором и реализованные в работе методики измерений, диагностические устройства, и конструкции узла нагрузки позволили проведение на тераваттном генераторе МИГ физических исследований широкого спектра в области физики высоких плотностей энергии и экстремального состояния вещества.

Получены экспериментальные данные по поверхностному плазмообразованию в быстро нарастающих магнитных полях мегагауссного диапазона, которые обобщены в критерий скин-слоевого взрыва проводников. Полученный критерий позволяет проводить проектирование магнитоизолированных передающих линий генераторов мегаамперного и мультимегаамперного диапазона с учетом стойкости электродов к воздействию сверхсильных магнитных полей.

Разработаны и созданы компактные импульсные генераторы, адаптированные к работе с нагрузкой в виде X-пинча, что дало возможность существенного прогресса в радиографии быстропротекающих процессов с помощью мягкого рентгеновского излучения при наносекундном временном и микронном пространственном разрешениях. За счет высокой точности синхронизации с внешними устройствами имеется перспектива создания многокадровых систем зондирования с варьированной задержкой между снимками.

На основании сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования предложена и обоснована зависимость момента появления рентгеновской вспышки X-пинча от параметров проволочек и параметров импульса тока.

В широком диапазоне параметров импульсов тока генератора определены оптимальные параметры каскадированных лайнеров с точки зрения формирования компактных, интенсивно излучающих в спектральном диапазоне 1-3 кэВ плазменных пинчей.

Таким образом, актуальность тематики, научная значимость и новизна работы, достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Автореферат и сама диссертация дает достаточно полное представление о проведенных автором исследованиях, автореферат полноценно соответствует структуре и содержанию диссертации.

Содержания диссертации соответствует специальности 01.04.13 электрофизика, электрофизические установки.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе Чайковского С. А. можно рекомендовать к использованию в организациях занимающихся проектированием, созданием и эксплуатацией сильноточных ускорителей, генераторов рентгеновского излучения, исследования вещества с высокой плотностью энергии. Этими организациями являются АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ, ИСЭ СО РАН, НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ МИФИ и МФТИ.

## Соответствие диссертации и автореферата требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней”

Диссертация представляет собой законченную научную работу, содержащую новые результаты в области экспериментальных исследований диффузии магнитного поля мегагауссного диапазона в цилиндрические проводники, выяснение механизма и основных характеристик электровзрыва скинированных электродов. В диссертации описаны новые, впервые предложенные типы каскадированных газовых лайнеров и даны предложения по повышению эффективности генерации сверхкиловольтного излучения при их имплозии.

В диссертации описана разработка ряда компактных импульсных генераторов тока с амплитудой 200÷300 кА и временем нарастания 150÷200 нс, на которых проведены исследования характеристик источника мягкого рентгеновского излучения на основе X-пинча и показана возможность реализации метода импульсного рентгеновского зондирования с микронным пространственным и наносекундным временным разрешением. Эти приборы создали новый класс диагностических средств.

Диссертационная работа удовлетворяет критериям установленным Положением «О порядке присуждения ученых степеней»

### Критические замечания

Автором разработан и испытан авторансформатор увеличивающий ток и работающий в условиях магнитной изоляции с током мегаамперного диапазона. Показана возможность достижения расчетного коэффициента увеличения тока. Автором показано, что коэффициент увеличения тока ограничивается утечками в линии с магнитной изоляцией, которые возникают при увеличении напряжения на индуктивной нагрузке. Такой автотрансформатор предполагается для применения для Z пинчевых нагрузок с импедансом меняющимся в несколько раз во время импульса напряжения. К сожалению, автор не провел анализ работы такого трансформатора для переменного импеданса, стартующего с малой индуктивности и увеличивающегося уже после установления тока магнитной изоляции в критических зазорах.

Использование формулы (3) (страница 22 автореферата и ее аналог в диссертации) затруднительно, так как она связывает три величины:  $t_f$ ,  $I_f$  и  $L$ . Чтобы вычислить одну из них, надо знать две другие, которые будут определены в эксперименте.

Автором ничего не сказано о методе решения обратной задачи для нахождения температуры по формуле (8.8) на странице 212 диссертации.

На рис.2а страницы 13 автореферата и на рис. 2.9а страницы 77 диссертации по оси ординат указаны кА и кV, хотя графиков напряжений на этих рисунках нет.

На рисунке 3.1. страницы 84 диссертации в верхней части этого рисунка показана компоновка четырех коммутаторно-конденсаторных сборок (ККС), в нижней части бака, в котором размещаются ККС. В тексте не указано и читателю непросто понять, что на фото ККС установлены в перевернутом положении.

### Заключение

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

Исследования, изложенные в диссертации, проведены на высоком научном уровне и свидетельствуют о высокой квалификации автора. В результате работы создано и развито новое научное направление – рентгеновская радиография импульсных процессов с высоким временным и пространственным разрешениями на основе разработанных компактных, по сути дела переносных, импульсных генераторов тока с нагрузкой в виде X-пинчей. Развита

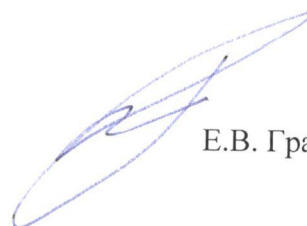
методика расчета электровзрыва поверхности скинированных проводников при высокой погонной плотности тока.

На основании изложенного можно сделать вывод, что диссертация С.А. Чайковского отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв на диссертацию С.А. Чайковского рассмотрен и одобрен на заседании Научного совета Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 5 от 28.06.2016г.).

Отзыв подготовил член Научного совета,  
Директор Отделения физики токонесущей плазмы,

кандидат технических наук



Е.В. Грабовский

Грабовский Евгений Валентинович, почтовый адрес: Россия, 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, телефон: 8(495) 851-89-01, 8(495) 841-56-14.

Адрес электронной почты: [angara@triniti.ru](mailto:angara@triniti.ru), наименование организации: Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"), должность - Директор Отделения физики токонесущей плазмы, кандидат технических наук.