

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 003.031.02, созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, извещает о результатах состоявшейся 30 сентября 2016 года публичной защиты диссертации Чайковским Станиславом Анатольевичем на тему: «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.

Время начала заседания: 15.00

Время окончания заседания: 17.50

На заседании диссертационного совета присутствовали 18 человек из 21 члена диссертационного совета, из них 9 докторов наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки:

1. Ковальчук Б.М. – председатель диссертационного совета	д.т.н.	01.04.13
2. Коваль Н.Н. – зам. председателя диссертационного совета	д.т.н.	01.04.13
3. Юшков Г.Ю. – ученый секретарь	д.т.н.	01.04.13
4. Абдуллин Э.Н. – член совета	д.т.н.	01.04.13
5. Бурдовицин В.А. – член совета	д.т.н.	01.04.13
6. Ким А.А. – член совета	д.т.н.	01.04.13
7. Королев Ю.Д. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
8. Кошелев В.И. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
9. Кривобоков В.П. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
10. Лосев В.Ф. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
11. Озур Г.Е. – член совета	д.т.н.	01.04.13
12. Орловский В.М. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
13. Панченко А.Н. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
14. Пегель И.В. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
15. Ратахин Н.А. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
16. Ростов В.В. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
17. Тарасенко В.Ф. – член совета	д.ф.-м.н.	01.04.13
18. Ушаков В.Я. – член совета	д.т.н.	01.04.13

**Заседание вел председатель диссертационного совета доктор технических наук, академик РАН Ковальчук Борис Михайлович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Чайковскому С.А. учёную степень доктора физико-математических наук.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.031.02  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА СИЛЬНОТОЧНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК, ПОДВЕДОМСТВЕННОГО ФЕДЕРАЛЬНОМУ  
АГЕНСТВУ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 30.09.2016 № 6

О присуждении **Чайковскому Станиславу Анатольевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени **доктора физико-математических наук**.

Диссертация **«Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона»** по специальности **01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки** принята к защите 17.05.2016 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 003.031.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций России, Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3, приказ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель **Чайковский Станислав Анатольевич**, 1964 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук **«Экспериментальное исследование имплозии двухкаскадных плазменных лайнеров»** защитил в 2004 году, в диссертационном совете, созданном на базе Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), работает директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения

Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций России (г. Екатеринбург).

Диссертация выполнена в отделе высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций России (г. Томск).

**Научный консультант** - доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН **Ратахин Николай Александрович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, директор, заведующий отделом высоких плотностей энергии.

**Официальные оппоненты:**

**Бурдаков Александр Владимирович** – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, зам. директора по научной работе,

**Паперный Виктор Львович** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный университет", кафедра общей и космической физики, заведующий кафедрой,

**Ремпе Николай Гербертович** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", кафедра физики, профессор

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

**Ведущая организация** Акционерное общество "Государственный научный центр Российской федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"(АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва) в своем **положительном заключении**, подписанном Грабовским Евгением Валентиновичем, кандидатом технических наук, директором Отделения физики токонесущей плазмы АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ" и утвержденном Черковцом Владимиром Евгеньевичем, доктором физико-математических

наук, профессором, генеральным директором АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", указала, что диссертация С.А. Чайковского отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Соискатель имеет 171 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 35 работ, из которых 15 опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, рекомендованных для публикации результатов диссертаций. Общий объем публикаций – 10,6 п.л., из них личный вклад автора диссертации – 9,2 п.л..

Наиболее значимые работы по диссертации:

1. Чайковский, С. А. Применение двухкаскадного лайнера для генерации К-излучения на микросекундном генераторе / С. А. Чайковский, С. А. Сорокин // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27, № 11. – С. 1003–1008.
2. Chaikovsky, S. A. The K-shell radiation of a double gas puff z-pinch with an axial magnetic field / S. A. Chaikovsky, A. Yu. Labetsky, V. I. Oreshkin, A. V. Shishlov, R. B. Vaksht, A. V. Fedunin, A. G. Rousskikh // Laser Particle Beams. – 2003. – V. 21. – P. 255–264.
3. Chaikovsky, S. A. Electrical explosion of metals in fast-rising megagauss magnetic fields / S. A. Chaikovsky, V. I. Oreshkin, G. A. Mesyats, N. A. Ratakhin, I. M. Datsko, B. A. Kablambaev // Phys. Plasmas. – 2009. – V. 16. – 042701.
4. Месяц, Г. А. Источник субнаносекундных импульсов мягкого рентгеновского излучения на основе X-пинча и малогабаритного низкоиндуктивного генератора тока / Г. А. Месяц, Т. А. Шелковенко, Г. В. Иваненков, А. В. Агафонов, С. Ю. Савинов, С. А. Пикуз, И. Н. Тиликин, С. И. Ткаченко, С. А. Чайковский, Н. А. Ратахин, В. Ф. Федущак, В. И. Орешкин, А. В. Федюнин, А. Г. Русских, Н. А. Лабецкая, А. П. Артемов, Д. Хаммер, Д. Б. Синарс // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138, Вып. 3. – С. 411–420.
5. Chaikovsky, S. A. Skin explosion of double-layer conductors in fast-rising high magnetic fields / S. A. Chaikovsky, V. I. Oreshkin, I. M. Datsko, N. A. Labetskaya, N. A. Ratakhin // Phys. Plasmas. – 2014. – V. 21. – 042706.

На диссертацию и автореферат поступили **отзывы:**

1. Отзыв на автореферат доктора физико-математических наук, начальника лаборатории Научно-теоретического отдела фундаментальных исследований, и перспективных наукоемких разработок ФГУП Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) Сергея Флоровича Гаранина. Отзыв положительный, имеются замечания:

«Название диссертации не вполне ясное и, кажется, не охватывает всю тематику диссертации (из 12 основных результатов, по крайней мере, 3 не относятся к формированию плазмы, да еще в диодах)... Называть генераторы, имеющие характерные времена 0,1-1 мкс, наносекундными тоже кажется несколько странным.

В нескольких местах автореферата диссертации фигурирует утверждение, что сокращение времени сжатия плазмы является стабилизирующим фактором по отношению к развитию рэлей-тейлоровской (РТ) неустойчивости. Естественно, возникает вопрос: сокращение времени по сравнению с чем? Ведь степень развития РТ неустойчивости (например, интегральный инкремент) это безразмерная величина, и она должна определяться безразмерными комбинациями других величин. Но время - величина размерная, поэтому она должна входить в комбинации с какими-то другими величинами. Какими - неясно. Причем автор, например, правильно говорит, что важной для РТ неустойчивости величиной является степень радиального сжатия плазмы, т.е. безразмерная величина. Здесь же допущена несуразность. В разделе апробация работы имеется неточность: конференция ICOPS в Санкт-Петербурге (да и вообще в России) никогда не проводилась.

В главе 4 имеется утверждение, что Ангара-5-1 является самым мощным сильноточным генератором в России (до 6 ТВт). Это не так. Мощность, передаваемая в нагрузку, для дисковых взрывомагнитных генераторов ВНИИЭФ с узлом обострения превышает 10 ТВт (энергия >10 МДж за время 1 мкс).

В главе 4 при получении теневого рентгеновского изображения многопроволочного лайнера в режиме работы установки Ангара-5-1 указано со ссылкой на рис. 10а, что длительность импульса излучения X-пинча составила 2нс, тогда как на рис. 10а можно видеть импульс  $P_x$ , состоящий из

нескольких пиков и длящийся в общей сложности десятки нс. Правда, на врезке виден только первый пик, длящийся 2 нс, а остальная часть импульса отрезана. Вероятно, все же, что импульс был не слишком длинный, иначе бы не удалось получить теневого рентгеновского изображения периферийной части многопроволочной сборки (рис. 10б). Но какой был импульс на самом деле, неизвестно.»

**2.** Отзыв на автореферат профессора физического факультета Израильского Института Технологий Технион, кандидата физико-математических наук Красика Якова Евсеевича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«При прочтении автореферата у меня возник ряд вопросов, которые возможно отражены в тексте диссертации, но, тем не менее, считаю необходимым их изложить. Первое, известно, что при электрическом взрыве проводников в вакууме на их поверхности формируется плазма, которая может переносить существенную часть тока. Как этот эффект учитывается при анализе результатов экспериментов? Второе, известно, что проводимость вещества зависит не только от температуры, но также от плотности и внутренней энергии вещества. Как это обстоятельство учитывается в моделировании процесса нелинейной диффузии? Третье, какие предположения и данные использовались при моделировании переноса излучения в плотной плазме?»

**3.** Отзыв на автореферат главного научного сотрудника ФГБУН Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, доктора физико-математических наук, Пикуза Сергея Александровича. Отзыв положительный, имеется замечание:

«Исследования собственно X-пинча демонстрируют высокую квалификацию автора, однако выводы, сделанные на основе проведенных экспериментов, не кажутся надежно обоснованными, так как базируются на слишком простой модели.»

**4.** Отзыв на автореферат заведующего отделом "Математические модели и численные методы высокотемпературной гидродинамики" Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктора физико-математических наук Гасилова Владимира Анатольевича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«1. Одним из несомненных достижений диссертационной работы является создание компактных генераторов для X-пинчей на основе низкоиндуктивной

конденсаторной батареи. Здесь достигнуты малый размер "яркого" источника рентгеновского излучения (2-4 мкм) и синхронизация с внешним устройством на уровне 10 нс. В тексте диссертации упоминаются аналогичные предшествующие разработки, например, генератор "ПИАФ", созданный Л. А. Аранчуком в Политехнической школе (Франция, г. Палезо). Однако было бы целесообразно уделить больше внимания сравнительному анализу таких разработок.

2. Автором собран обширный экспериментальный материал, позволяющий составить достаточно полное описание имплозии двухкаскадных лайнеров. Тем самым открылась бы возможность построения новых математических моделей, и проведения вычислительных экспериментов в новых постановках задачи имплозии электродинамически ускоряемых составных лайнеров. Это необходимо для развития количественной теории имплозии, в частности, для надежного прогнозирования результатов будущих экспериментов. Однако, автор в ряде случаев не решается делать однозначные утверждения о характере физических процессов при сжатии лайнера. В результате соответствующие пункты разделов автореферата "научная новизна" и "научная ценность" имеют несколько расплывчатые формулировки.»

5. Отзыв на автореферат профессора кафедры «Техника высоких напряжений» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктора технических наук, Кривошеева Сергея Ивановича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«К замечаниям следует отнести перегруженность некоторых рисунков мелкими обозначениями, что затрудняет понимание излагаемого материала.

По автореферату может быть сформулирован следующий вопрос. На рис. 18 приведены осциллограммы, полученные при исследовании процесса диффузии магнитного поля в проводник. Как диссертантом трактуется поведение производной напряжения в момент времени 35-45 нс? Аналогично ведет себя эта зависимость и для других материалов (см. диссертацию).»

6. Отзыв на автореферат профессора Лаборатории электрических разрядов и плазмы Тель-авивского университета, доктора физико-математических наук Исака Иойлевича Бейлиса. Отзыв положительный, замечаний нет.

7. Отзыв на автореферат профессора ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», доктора физико-математических наук, Ткаченко Светланы Ивановны. Отзыв положительный, имеются замечания:

«1. Почему в автореферате речь идет об исследовании процесса нелинейной диффузии магнитного поля; ведь таковой можно было бы ее назвать в том случае, если бы в исследуемых процессах сопротивление материала зависело от магнитного поля, т.е. в случае заметного эффекта магнеторезистивности.

2. Кроме того, в автореферате не сказано, почему по приходу именно максимума радиального распределения плотности тока на внутреннюю поверхность полой трубки необходимо оценивать скорость проникновения магнитного поля в полые проводники.»

8. Отзыв профессора кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (национального исследовательского университета), доктора физико-математических наук Яловца Александра Павловича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«1. На с. 24 автореферата написано: "Эксперименты показали, что, несмотря на достаточно широкий диапазон изменения характеристик X-пинчей, наблюдаемая длина перетяжки изменяется достаточно слабо (от 200 мкм до 450 мкм) и растет с ростом начальной погонной массы. Наблюдаемые в экспериментах значения длины перетяжек X-пинчей достаточно хорошо согласуются с длинами перетяжек, рассчитанных в рамках разработанной модели." Однако простой анализ таблицы 1 на с. 23, в которой приведены условия экспериментов и полученные экспериментальные и расчетные значения длин перетяжек, усредненных по числу выстрелов: наилучшее совпадение получено в опыте с 2 проволочками с начальной массой 30.5 мкг/см (первая строчка таблицы). Уже вторая строчка таблицы (4 выстрела) показывает, что расчетное значение длины перетяжки превышает экспериментальное примерно в 1.7 раза; третья (4 выстрела) - в 1.61 раза; четвертая (4 выстрела) - в 1.24 раза. Поэтому вывод соискателя о том, что "в X-пинчах момент появления импульса рентгеновского излучения определяется длиной перетяжки" излишне категоричен. На основе данной



таблицы в силу малости числа выстрелов и отсутствия указания на форму импульса тока, для которого получены расчетные значения длины перетяжки, можно говорить лишь о возможном влиянии длины перетяжки на момент появления импульса рентгеновского излучения.

2. На с. 28 - 30 соискатель говорит о процессах нелинейной диффузии магнитного поля в проводники. Непонятно, на основании чего соискатель называет процесс диффузии магнитного поля в проводники, описываемой при интерпретации экспериментов системой дифференциальных уравнений (4)-(5) с линейной эмпирической зависимостью удельного сопротивления проводника от плотности энергии джоулева тепловыделения и не содержащей явной зависимости от индукции (6), нелинейным. О системе уравнений (4)-(6) можно лишь сказать, что она представляет собой систему уравнений с переменными, неявно зависящими от времени, коэффициентами.»

9. Отзыв ведущего научного сотрудника Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, доктора физико-математических наук, профессора Лигачева Александра Егоровича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«Как утверждается в автореферате, на первом этапе (в процессе формирования «перетяжки») проводник плавится и нагревается до такой температуры, при которой он взрывается, превращаясь в пар и частицы размером от единиц нм до нескольких мкм. В связи с этим:

- Были ли выполнены исследования продуктов взрыва электрического проводника?

- Какое влияние оказывает элементный состав электрического проводника на параметры его взрыва и процесс развития «перетяжки» в X-пинчах?»

В целом, сделанные замечания не ставят под сомнение научную новизну и актуальность диссертационной работы. На все замечания диссертантом даны исчерпывающие и обоснованные ответы.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается известностью их достижений в исследовании проблем электрофизики и электрофизических установок, их компетентностью, наличием публикаций в данной области науки и способностью определить научную и практическую

ценность диссертации, а так же дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

**Диссертационный совет отмечает,** что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** новая экспериментальная методика импульсной теневой диагностики в мягком рентгеновском диапазоне исследования процессов с микронным пространственным и наносекундным временным разрешениями на основе созданных компактных генераторов с нагрузкой в виде X-пинчей;

**предложены** оригинальная научная гипотеза о ключевой роли длины перетяжки в формировании «горячей точки» источника излучения на основе X-пинча, критерий скин-эффекта электрического взрыва проводников в быстронарастающем магнитном поле; новый подход к измерению скорости проникновения мегагауссного магнитного поля в проводники;

**доказана** перспективность использования каскадированных лайнеров в качестве мощных импульсных источников излучения в мягком рентгеновском диапазоне спектра;

**введено** новое понятие «волна нелинейной диффузии магнитного поля».

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

**доказаны** положения, обосновывающие физические особенности формирования «горячей точки» X-пинча и распространение волны нелинейной диффузии магнитного поля в проводник.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)**

**использован** комплекс существующих методик исследований электрофизических и радиационных измерений процессов, протекающих в веществе, находящемся при экстремально высоких температурах и давлениях;

**изложены** тенденции, обуславливающие современные направления исследований и применения на практике электрического взрыва проводников в режиме «скинирования» тока;

**раскрыто** существенное проявление теории, заключающееся в выявлении неизвестной ранее проблемы – снижения порогового магнитного поля плазмообразования при уменьшении проводимости металла;

**изучены** факторы, определяющие связь диффузии магнитного поля мегагауссного диапазона с плазмообразованием на поверхности проводника;  
**проведена модернизация** методики расчета волны нелинейной диффузии, распространяющейся в двухслойных проводниках с существенно различными удельными электрическими сопротивлениями слоев.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** универсальные методики теневого рентгеновского зондирования, основанные на разработанных автором компактных импульсных генераторах тока;

**определен** диапазон параметров двухкаскадных лайнеров, обеспечивающих повышение эффективности генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов 1 - 3 кэВ, что может быть использовано при выработке практических рекомендаций по их дальнейшему применению;

**создана** система практических рекомендаций, основанная на обширной базе экспериментальных данных, позволяющая определить диапазон параметров двухкаскадных лайнеров, в котором обеспечивается формирование компактных сильноизлучающих пинчей;

**представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию критерия подобия для X-пинчей, предложенного на основе развитой автором модели, описывающей динамику перетяжки.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** показана воспроизводимость результатов исследований, для получения которых использовались методы диагностики быстропротекающих электрофизических и плазменных процессов, адаптированные с учетом поставленных в диссертации задач;

**теория** исследованных процессов построена на известных, проверяемых фактах, ее результаты согласуются с другими экспериментальными и теоретическими данными, полученными как в диссертации, так и в других исследованиях;

**идея базируется** на анализе и обобщении передового опыта исследований X-пинчей и плазменных лайнеров;

**использовано** сравнение данных автора диссертации с данными, полученными ранее в других подобных исследованиях;

**установлено** качественное и количественное согласие результатов диссертации с результатами, представленными в независимых источниках;

**использованы** современные методы сбора и обработки информации, опирающиеся на использование диагностической аппаратуры, специально разработанной для проведения исследований, представленных в диссертации.

**Личный вклад соискателя состоит** в его определяющей роли в формулировании целей и задач, постановке экспериментальных и теоретических работ, их проведении, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций по результатам исследований. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

На заседании 30.09.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Чайковскому С.А. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
академик РАН



Ковальчук Б.М.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Юшков Г.Ю.

«30» сентября 2016 г.