



«УТВЕРЖДАЮ»

д.т.н. _____

д.т.н.

А.А. Жерлицын

09 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, на диссертационную работу Волкова Георгия Степановича «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Рассмотрена диссертационная работа Волкова Георгия Степановича «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности», выполненная в Акционерном обществе «Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Актуальность темы диссертации

Изучение фундаментальных свойств материи при высокой плотности энергии обусловлено, как стремлением к достижению в лабораторных условиях управляемого инерциального термоядерного синтеза, так и возможностью моделирования процессов, происходящих в звездах и космическом пространстве. В настоящее время для создания в веществе высокой плотности энергии используется пространственная концентрация потоков энергии, генерируемых мощными источниками энергии – энергетическими драйверами. В середине 90-х годов 20 века в СССР и США на основе развития технологии электрических генераторов высокой импульсной мощности была высказана идея такого драйвера: создание мощного источника рентгеновского излучения на базе Z - пинчевого разряда с применением многомодульных сильноточных высоковольтных электромагнитных генераторов. Одной из конечных целей этого направления является создание источников мягкого рентгеновского излучения с мощностью свыше 500 ТВт и длительностью импульса порядка 10 нс, которые можно было бы использовать в схемах непрямого обжата сферических термоядерных мишеней.

Наиболее существенным фактором, стимулирующим данные исследования, является возможность получения мощности мягкого рентгеновского излучения при токовом сжатии многопроволочных цилиндрических сборок в несколько раз превышающую электрическую мощность используемых электрических сильноточных генераторов тока.

Для создания импульсного термоядерного реактора с использованием излучения Z-пинчей требуются генераторы с током длительностью порядка 100 нс и амплитудой свыше 50 МА. Генераторы такого диапазона находятся на грани возможностей существующих технологий, поэтому большое значение имеет понимание зависимости энергии и мощности получаемого рентгеновского излучения, как от тока генератора, так и от выбора характеристик используемых нагрузок.

Работа направлена на исследование излучения и плазменной динамики сильнотоочных разрядов наносекундного диапазона длительности. Рассмотрены задачи связанные с повышением эффективности схем непрямого обжатия сферических мишеней мягким рентгеновским излучением сильнотоочных Z – пинчей. Исследованы спектрально-энергетические характеристики излучающих Z – пинчей, получаемых при имплозии различных нагрузок сильнотоочными генераторами и энергия, переносимая ионной компонентой разлетающейся плазмы пинча. Эксперименты проводились в ГНЦ РФ ТРИНИТИ при разрядах с токами 3 – 4 МА и длительностью порядка 100 нс (генератор «Ангара - 5 -1").

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы.

Во введении приведен обзор экспериментальных исследований по сильнотоочным разрядам высокой мощности. Рассмотрены актуальные вопросы исследования динамики сжатия и излучения высокотемпературной плотной плазмы Z – пинчей. Приведена постановка задач.

В первой главе рассмотрены использованные в экспериментах методики измерений мягкого рентгеновского и ВУФ излучений плазмы, а также приборы для их измерений. В экспериментах использовались методики, обладающие высоким временным и спектральным разрешениями: полихроматор мягкого рентгеновского излучения на основе многослойных рентгеновских зеркал, кристаллические рентгеновские спектрографы и спектрографы на основе пропускающей решетки, вакуумные рентгеновские фотодиоды с соответствующими фильтрами, радиационный фольговый калориметр с временным разрешением ~1 мкс для измерения полных радиационных потерь плазмы.

Во второй главе рассмотрено метрологическое обеспечение измерений спектрально-энергетических потоков мягкого рентгеновского излучения. Описаны источники рентгеновского излучения, разработанные для проверки и калибровки рентгеновской аппаратуры. Источники позволяют проводить измерения в спектральном диапазоне энергий квантов от 0.05 до 100 кэВ. Приведен анализ выходов линейчатого и тормозного излучения возбуждаемого, как в вакуумных диодах со взрывоэмиссионным катодом, так и в источнике мягкого рентгеновского излучения на основе газового Z - пинча. Описаны методики проверки работоспособности и калибровки чувствительности детекторов мягкого рентгеновского излучения, приведены результаты калибровок различных типов детекторов (МКП детекторы, кремниевых p-i-n диоды). Методом рентгеновского просвечивания проведены исследования параметров газовых струй, создаваемых электромагнитным клапаном со сверхзвуковым соплом.

В третьей главе рассмотрены результаты исследования динамики сжатия и излучения композитных Z - пинчей на установке «Ангара-5-1». Композитный Z-пинч состоял из внешней газовой оболочки (аргон или пропан) и внутреннего цилиндра («fiber»), изготовленного из пенистого материала (агар-агар с добавлением солей KCl или NaCl) с начальной плотностью 10^{-2} г/см³. Продемонстрировано, что электронная плотность в пинче определяется массой внутреннего «файбера». Показано, что большая часть материала вещества «файбера» прогревается до высокой температуры (~ 1 кэВ). Такая температура достигается как в оболочке, так и в «файбере», что возможно за счет высокой электронной теплопроводности в отсутствие замагниченности электронов плазмы «файбера».

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования схемы пинча с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения массы сжимаемого вещества. В качестве нагрузки сильнотоочного генератора «Ангара-5-1» использовалась каскадная сборка, состоящая из внешней многопроволочной сборки из вольфрамовых проволок и внутренней, соосной с ней, укороченной пенной цилиндрической оболочки, расположенной симметрично относительно высоковольтных электродов.

В зависимости от степени неоднородности распределения погонной массы внешней многопроволочной нагрузки (10-30%) смоделированы режимы применимые, как для схем динамического и статического «хольраумов», так переходные режимы, с возможностью повысить однородность облучения мишени, если подобрать время взаимодействия внешней оболочки с пеной, совпадающее с моментом сжатия и излучения приэлектродных пинчей.

В пятой главе приведены результаты исследования пробоя по поверхности изолятора в вакууме, как источника УФ – излучения для предыонизации нагрузок сильноточных импульсных генераторов. Рассмотрено влияние токовой предыонизации на сжатие многопроволочных лайнеров на установке «Ангара-5-1» и на выход К – излучения [H] и [He] ионов Al при сжатии многопроволочных цилиндрических сборок из алюминиевых проволок.

В шестой главе рассмотрены результаты исследования параметров пинчей, получаемых при сжатии одиночных и двойных многопроволочных сборок. Исследовано излучение пинчей со сложным атомным составом, а именно влияние небольшой (от 7 до 27% по массе от массы многопроволочной сборки) добавки вольфрама, на излучение плазмы, получаемой при сжатии смешанные Al - W многопроволочных сборок.

Исследованы переходные режимы излучения от каскадной нагрузки к композитному Z – пинчу в условиях, когда атомный номер материала внутренней сборки (W) существенно превышал атомный номер материала внешней сборки (Al). При этом диаметр внутренней многопроволочной сборки W (4 мм) был порядка диаметра пинча (2.5-3 мм), получаемого при сжатии одиночной внешней многопроволочной сборки Al диаметром 12 мм, а погонные массы сборок были сравнимы (330-350мкг/см). С применением методов рентгеновской спектроскопии исследовано излучение и взаимодействие каскадов двухкаскадной многопроволочной сборки при имплозии таких сборок.

В седьмой главе приведены результаты исследования анизотропии мягкого рентгеновского излучения и потоков плазмы Z - пинчей. Анизотропия энергии излучения и энергии ионных потоков сильноточных Z –пинчей исследована с использованием термопарных калориметров и фольговых быстрых радиационных калориметров. С учетом расстояния (~ 2 м) от пинча до радиационного фольгового калориметра его временное разрешение позволяло проводить измерения полного выхода излучения без вклада энергии, переносимой плазменными потоками. Полученные выходы мягкого рентгеновского излучения сравнивались с данными радиационных потерь, полученных методом фильтров с использованием в качестве детекторов вакуумных фотодиодов.

В восьмой главе приведены результаты экспериментов по сжатии каскадных многопроволочных вольфрамовых сборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии образования пинча. В экспериментах получена высокая мощность мягкого рентгеновского излучения ~10-11 ТВт с выходом рентгеновского излучения порядка 130-140 кДж с пинча длиной 1 см. Удельная и полная мощности излучения пинча, полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью (~10-11 ТВт/см, 10-11 ТВТ), превышают удельную и полную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной каскадной сборки» длиной 16 мм (~ 5 ТВт/см, 7.6ТВт) с теми же параметрами. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует об увеличении роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду (магнитный компрессор). Предложен вариант использования взаимодействия оболочек каскадной сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума» для непрямого облучения сферических мишеней.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Научная новизна работы заключается в том, что

1. Предложен и экспериментально исследован новый тип двухкаскадной нагрузки с высокой аксиальной неоднородностью распределения погонной массы вещества внешнего каскада для схем непрямого облучения термоядерных мишеней излучением сильноточных Z – пинчей. В зависимости от степени неоднородности распределения погонной массы нагрузки (10-30%) смоделированы режимы применимые, как для схем динамического и статического «хольраумов», так переходные режимы, позволяющие повысить однородность облучения мишени.
2. Впервые предложен и экспериментально обоснован новый вариант каскадной нагрузки сильноточных Z – пинчей с использованием эффекта усиления взаимодействия каскадов сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума».
3. Впервые была показана возможность эффективной передачи энергии с внешней оболочки композитного Z – пинча во внутренний плотный излучающий «fiber», имеющий атомный номер выше или сравнимый с атомным номером вещества оболочки.
4. Впервые показано, что в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному Z - пинчу внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии, а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) высокую излучательную способность.
5. Впервые количественно измерены параметры плазмы пинчей, образующихся при сжатии многопроволочныхборок со сложным атомным составом (Al – W), в зависимости от массовой доли вольфрама в сборке. Показано, что при увеличении доли W в сборке электронная плотность растет, а интенсивность линейчатого излучения [H]- и [He]- ионов Al существенно падает. Когда массовая доля вольфрама в сборке превышает 14%, линейчатое излучение Al регистрируется из небольших, плотных и сильно нагретых областей с электронной температурой порядка 700 эВ.
6. Впервые обнаружен эффект влияния уменьшения времени передачи энергии от ионов, нагреваемых в ударной волне, к электронам и увеличения электронной концентрации на излучательные способность плазмы пинчей, образующихся при сжатии многопроволочныхборок со сложным атомным составом (Al – W). При содержании по массе вольфрама в сборке не более 25-30% достигается практически такая же мощность излучения и его длительность, как и при сжатии чисто вольфрамовыхборок с теми же параметрами.
7. Впервые экспериментально измерена анизотропия плотности потоков энергии разлетающейся плазмы мегаамперных Z – пинчей. Показано, что в направлении перпендикулярном оси пинча, поток энергии излучения мегаамперных Z - пинчей существенно превышает энергию ионных потоков разлетающейся плазмы, а в направлении оси они сравнимы.
8. Впервые обнаружен эффект увеличения выхода линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия в спектральном интервале 1.5 - 2.3 кэВ при токовой предыонизации многопроволочныхалюминиевыхборок за 110-130 нс до основного импульса тока.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что

полученные в проведенных исследованиях результаты привели к появлению новых перспективных вариантов нагрузок сильноточных генераторов для схем непрямого обжатия сферических мишеней; новых данных об излучательных способностях высокотемпературной плотной плазмы сложного атомного состава; представлениям о степени анизотропии энергии плазменных потоков сильноточных Z - пинчей.

Разработанные научные приборы и экспериментальные методики использованы в исследованиях плотной высокотемпературной плазмы на лазерно-плазменном источнике тяжелых ионов (ЦЕРН, Швейцария), в исследованиях по физике взрывающихся проводников на мощных импульсных наносекундных сильноточных генераторах (Ecole Polytechnique, Франция) и при создании источников для рентгеновской литографии (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).

Полученные экспериментальные данные стимулировали развитие детальных РМГД методов расчета спектральных характеристик излучения плотной высокотемпературной плазмы Z – пинчей.

Личный вклад автора

Автором предложены новые варианты нагрузок сильноточных Z-пинчей, перспективные для схем непрямого облучения термоядерных мишеней. Автором обнаружена существенная анизотропия энергии ионных потоков в сильноточных импульсных разрядах. Автором предложен вариант импульсного радиационного калориметра со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системой регистрации сигнала. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его определяющем участии.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, основаны на комплексном подходе к исследованиям, использованию большого количества различных перекрестных и взаимно дополняющих методов диагностики и статистике измерений. Результаты получены в экспериментах на различных экспериментальных установках. Полученные автором экспериментальные данные в пределах погрешностей измерений совпадают с результатами полученными другими методиками.

Часть полученных результатов согласуется с данными работ других экспериментальных групп и исследователей. Результаты проведенных исследований опубликованы в российских и зарубежных реферируемых журналах с высокими рейтингами и полностью отражают содержание работы.

Замечания по диссертационной работе

1. Встречаются фразы, структура которых режет слух. Например, 23 страница раздел «Цель работы и задачи исследований». Предложение: «В качестве задач исследования рассматриваются задачи, связанные с применением сильноточных излучающих Z - пинчей для задач инерциального термоядерного синтеза» 3 одинаковых слова в одном предложении — это перебор.

В тексте диссертации есть некоторые неточности (опечатки).

2. В списке литературы (ссылка [15]) неверно указан год публикации. Конференция проходила в 2004 году, а публикация материалов конференции состоялась в 2005 году.

3. Текст на странице 40: "Высокая отражающая способность слюды в первом, втором и третьем порядках [62] расширяет эффективный наблюдаемый спектральный диапазон". Кристалл слюды имеет высокую отражающую способность только в нечетных порядках. В цитируемой статье авторы используют для регистрации 1 и 3 порядки.

4. Стр. 51. «Проверка работы быстрого радиационного калориметра проводилась на установке «Ангара-5-1» [69].» А основное использование после проверки где проводилось?

5. В разделе 1.2. Стр.55. Подписи к Рис.1.14. Схема измерения потока плазмы. Сделаны пояснения до третьего элемента на рисунке, оставлена в конце предложения запятая и остальные элементы перечислить забыли.

6. В этом же разделе автор приводит много данных по скорости, времени распространения плазменного потока, дает величину скорости ионов $\sim 2 \cdot 10^7$ см/с, но ни слова о том, что за вещество? Из чего состоит исследуемая плазма? Поэтому невозможно оценить за счет каких процессов получается такая скорость разлёта плазмы.

7. Основные выводы по главе 1. Первое предложение: «Автором разработаны современные методики измерений мягкого рентгеновского излучения плотной высокотемпературной плазмы и параметров плазменных потоков сильнооточных Z - пинчей.». Возможно, автор хотел сказать что-то типа: «Автором разработаны ряд методик измерений мягкого рентгеновского излучения плотной высокотемпературной плазмы и параметров плазменных потоков сильнооточных Z – пинчей отвечающих современным требованиям»? Вроде тоже самое, а смысл всё-таки другой.

8. На странице 90 написано: «Пространственное разрешение при просвечивании струи на пленку определялось размером источника (~ 2 мм) и геометрией эксперимента и составило ~ 0.2 мм по радиусу струи и 0.4 мм по ее высоте». Как при размере источника зондирующего излучения 2 мм можно получить пространственное разрешение в 0.2 мм?

Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на моей общей, положительной оценке данной диссертационной работы.

Результаты исследований изложены в печатных трудах, среди которых 29 статей в рекомендованных ВАК периодических изданиях для диссертаций, докладах на Международных и Российских симпозиумах и конференциях, препринтах. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам. Волков Г.С. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Волкова Георгия Степановича «Переходные режимы излучения сильнооточных разрядов наносекундного диапазона длительности», выполненная в Акционерном обществе «Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы, по своей актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов полностью отвечает критериям, установленным п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Тема и содержание диссертации соответствуют заявленной специальности 1.3.9 – физика плазмы. Материал изложен грамотным техническим языком с использованием терминологии, принятой среди специалистов в рассматриваемой области.

Диссертация является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой и выполнена автором на высоком научном и техническом уровнях. Работа хорошо структурирована, отличается логикой изложения и четкой взаимосвязью её отдельных частей, удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор диссертационной работы Волков Георгий Степанович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Диссертационная работа обсуждена и одобрена на открытом экспертном научном семинаре отдела высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (протокол № 7 от 10.09.2026 г.), на котором присутствовало 35 специалистов (в том числе 6 докторов, 8 кандидатов наук, 1 академик РАН) в области электрофизики и электрофизических установок, физики плазмы, пучков заряженных частиц и их применения.

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН). Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, тел.: +7(3822)900321 (доб. 2201) e-mail: contact@hcei.ru, адрес в интернете: <https://www.hcei.ru>

Отзыв составил:

главный научный сотрудник, заведующий отделом высоких плотностей энергии, доктор физико-математических наук, Владимир Иванович Орешкин, тел.: +7(3822)900321 (доб. 6200), e-mail: vi.oreshkin@hcei.ru.

Главный научный сотрудник,
заведующий отделом высоких
плотностей энергии, д.ф.-м.н.

В.И. Орешкин

Подпись Орешкина В.И. удостоверяется

Ученый секретарь ИСЭ

О.В. Крысина

Сведения
о ведущей организации

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование	ИСЭ СО РАН
Организационно-правовая форма	ФГБУН
Тип организации	Научная организация
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый адрес	634055 г. Томск, проспект Академический, 2/3
Адрес сайта	www.hcei.ru
Адрес электронной почты	contact@hcei.ru
Телефон	+7(3822)900-321 (доб. 2201)

СПИСОК

опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях
ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
1	Foil explosion in megagauss magnetic fields: Non-uniform expansion and instabilities	Научная статья	S.A. Chaikovsky, I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, E.V. Oreshkin, V.I. Oreshkin, N.A. Ratakhin, A.G. Rousskikh, V.A. Vankevich, A.S. Zhigalin, R.B. Baksht	Physics of Plasmas, 2022, vol.29, No.10, 3.103501	Web of science
2.	Electric Explosion of Flat Copper Conductors in the Current Skinning Mode	Научная статья	I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, V.A. Van'kevich, S. A. Chaikovskii, V.I. Oreshkin, E.V. Oreshkin	Plasma Physics Reports, 2025, V. 51, No. 7, P. 763–772	Web of science
3	Effect of tailored density profiles on the stability of imploding Z-pinches at microsecond rise time megaampere currents	Научная статья	R.K. Cherdizov, R.B. Baksht, V.A. Kokshenev, V.I. Oreshkin, A.G. Rousskikh,	Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, vol.64, No. 1, P. 015011	Web of science

4	Formation of Directed Plasma Jets During the Combustion of a High-Current Vacuum-Arc Discharge	Научная статья	A.G. Rousskikh, A.S. Zhigalin, V.I. Oreshkin, N.A. Labetskaya, and A.M. Kuzminykh	Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 7, P. 800-809	Web of science
5	Implosion of heavy metal liners driven by megaampere current pulses	Научная статья	V.I. Oreshkin, R.B. Baksht, S.A. Chaikovsky, R.K. Cherdizov, V.A. Kokshenev, N. E. Kurmaev, G. A. Mesyats, E. V. Oreshkin, N. A. Ratakhin, A.G. Rousskikh, A. A. Zherlitsyn, A.S.Zhigalin	Physics of Plasmas, 2024, vol.31, No.10, P.102706	Web of science
6.	Studies on the implosion of pinches with tailored density profiles	Научная статья	V.I. Oreshkin, R.B. Baksht, R.K. Cherdizov, E.V. Oreshkin, N.A. Ratakhin	Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, vol.63, No.4, P.045022	Web of science
7.	Effect of the plasma self-radiation on the growth of thermal filamentation instabilities in imploding Z pinches	Научная статья	V.I. Oreshkin, E.V. Oreshkin	Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, vol.63, No.12, P.125013	Web of science
8.	Impact of the radial density profile on the Z-pinch stability at a microsecond rise time of the driving current	Научная статья	R.K. Cherdizov, R.B. Baksht, V.A. Kokshenev, A.G. Rousskikh, A.V. Shishlov	Physics of Plasmas, 2023, vol.30, No.4, P.042711,	Web of science
9.	Effect of the geometrical parameters of an X-pinch on the characteristics of the soft x-ray source	Научная статья	A. P. Artyomov, V. I. Oreshkin, A. G. Rousskikh, D. V. Rybka, A. V. Fedyunin, S. A. Chaikovsky, and N. A. Ratakhin	Physics of Plasmas, 2024, vol. 31, P. 082706	Web of science

Ученый секретарь ИСЭ
К.Т.Н.

О.В. Крысина

