

ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Целью работы Г.С. Волкова является исследование физических процессов существенных для генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения (МРИ), применяемых в схемах непрямого обжатия сферических термоядерных мишеней.

Актуальность исследования. Несмотря на достижение порога зажигания на лазерной установке NIF в США вопрос о зажигании мишени при непрямом облучении МРИ Z-пинча по-прежнему актуален. Из-за большей, по сравнению с лазерами, эффективности использования электрической энергии Z-пинчи производят большее количество рентгеновской энергии. Однако, плотность энергии в лазерных установках более чем на порядок выше. Поэтому при достижении требуемых для зажигания температур рентгеновского излучения ~ 250 эВ в устройствах на основе Z-пинча энергии в излучении будет больше, чем на лазерных установках. Это даст возможность исследовать мишени с большей массой и получать большие выходы термоядерной энергии - большие усиления.

Научная новизна работы.

Предложены и экспериментально обоснованы:

- цилиндрический лайнер с неоднородным распределением погонной массы для схем непрямого облучения термоядерных мишеней излучением Z-пинчей;
- вариант каскадного Z-пинча с взаимодействием каскадов через магнитное поле тока внутреннего лайнера применительно к схеме статического «хольраума»;
- каскадные многопроволочные вольфрамовые сборки, имеющие уменьшенную индуктивность на конечной стадии сжатия, которые по полной (~ 10 - 11 ТВт) и удельной мощности излучения (10 - 11 ТВт/см) превышают «стандартные сборки» (7 - 8 ТВт и 5 ТВт/см).

Впервые измерены параметры плазмы пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок со сложным атомным составом (Al -W).

Экспериментально обнаружено:

- при сжатии многопроволочных Al-W сборок уменьшение времени передачи энергии от ионов к электронам влияет на излучательную способность плазмы пинчей;
- эффективная (свыше 30%) передача энергии с внешней оболочки композитного Z-пинча во внутренний плотный излучающий «fiber» из вещества с атомным номером сравнимым или превышающим атомный номер вещества оболочки;
- переносимая плазменными потоками Z-пинча в радиальном направлении энергия составляет менее 5% от энергии излучения, а в направлении вдоль оси они сравнимы;
- увеличения вдвое выхода линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия в спектральном интервале 1.5-2.3 кэВ при предионизации многопроволочных алюминиевых сборок за 110-130 нс до основного токового импульса.

Научная и практическая значимость работы.

Разработанные научные приборы и экспериментальные методики использованы в исследованиях плотной высокотемпературной плазмы на лазерно-плазменном источнике тяжелых ионов (ЦЕРН, Швейцария и ТИР-1 АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ), в исследованиях по физике взрывающихся проводников на мощных импульсных наносекундных сильноточных генераторах (Ecole Polytechnique, Франция).

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

Полученные в проведенных исследованиях результаты и выводы привели к появлению новых перспективных вариантов нагрузок сильноточных генераторов для схем непрямого обжатия сферических мишеней.

Личный вклад автора. Автор предложил Z-пинч с высокой

неоднородностью распределения погонной массы, а также с использованием взаимодействия каскадов многопроволочной сборки через магнитное поле внутреннего каскада, что перспективно для схем непрямого облучения термоядерных мишеней. Автор обнаружил, что при сжатии многопроволочныхборок со сложным составом (A1-W) уменьшение времени передачи энергии от ионов к электронам влияет на излучательную способность плазмы пинчей. Автор предложил вариант импульсного радиационного калориметра со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системой регистрации сигнала. Постановка и проведение всех представленных в диссертации экспериментов, их обработка и интерпретация результатов сделаны автором лично или при его определяющем участии.

Достоверность и обоснованность результатов.

Результаты диссертационной работы получены на различных экспериментальных установках с использованием большого количества различных перекрестных и взаимно дополняющих методов диагностики и статистике измерений.

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.

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения.

Во введении рассмотрены перспективы использования МРИ Z-пинчей в схемах непрямого обжата сферических термоядерных мишеней. Изложены актуальные вопросы исследования динамики сжатия и излучения высокотемпературной плотной плазмы Z-пинчевых разрядов. Приведён обзор экспериментальных исследований.

В первых двух главах представлены использованные в экспериментах

методики и приборы для измерений МРИ и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения плазмы, а также потоков разлетающейся плазмы пинча. Описаны источники рентгеновского излучения и методики для проверки работоспособности и калибровки чувствительности детекторов МРИ и рентгеновской аппаратуры, приведены результаты калибровок. Достаточно полный объем используемой в экспериментах современной диагностической базы повышает доверие к получаемым экспериментальным данным.

В третьей главе исследованы динамика сжатия и излучения композитных Z-пинчей. Показана возможность передачи свыше 30% энергии с внешней легкой оболочки композитного Z-пинча во внутренний излучающий «fiber» из тяжелого материала механизмом электронной теплопроводности.

Четвертая глава посвящена исследованию нового варианта Z-пинча с высокой неоднородностью погонной массы сжимаемого вещества. Смоделированы и экспериментально исследованы различные режимы генерации излучения для схем динамического и статического «хольраумов».

В пятой главе исследован пробой по поверхности изолятора в вакууме, как источника УФ-излучения для предионизации нагрузок сильноточных импульсных генераторов. Исследовано влияние токовой предионизации на сжатие многопроволочных лайнеров и на выход К-излучения при сжатии алюминиевых многопроволочных цилиндрических сборок.

В шестой главе рассмотрены результаты исследования параметров пинчей, получаемых при сжатии одиночных и двойных смешанных Al-W многопроволочных сборок. Исследованы режимы излучения при переходе от каскадной нагрузки к композитному Z-пинчу, когда атомный номер материала внутренней сборки (W) существенно превышал атомный номер материала внешней сборки (Al).

В седьмой главе исследована анизотропия мягкого рентгеновского излучения и потоков плазмы мегаамперных Z-пинчей. Для диагностики энергии излучения и энергии ионных потоков Z-пинчей применены термопарные и фольговые быстрые радиационные калориметры.

Глава восемь посвящена исследованию сжатия каскадных многопроволочных вольфрамовыхборок с уменьшенной индуктивностью на конечной стадии сжатия. Получено увеличение полной мощности выхода МРИ в $\sim 1,5$ раза по сравнению со стандартным однокаскадным пинчем.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Ряд замечаний по тексту диссертации.

Во введении на стр. 15 приводятся данные о том, что «В экспериментах на установке Z сравнивался выход и мощность рентгеновского излучения при имплозии цилиндрической многопроволочной сборки из 300 медных проволочек с имплозией сплошной цилиндрической оболочки из медной фольги такого же диаметра и погонной массы. Хотя полные выходы излучения практически не отличаются, на многопроволочной сборке получена мощность излучения вдвое выше при, соответственно, вдвое более коротком импульсе излучения. Рентгеновское просвечивание и измерение индуктивности нагрузки показывают, что сжатие оболочки из фольги менее устойчиво». Здесь было бы уместно привести разнотолщинность используемой фольги, поскольку от нее сильно зависит мощность излучения. В частности, в одномерных РМГД расчетах, в которых фольга однородна, получаемые мощности излучения значительно превышают регистрируемые в опытах с многопроволочными сборками.

В работе (стр. 93) утверждается, что «повысить однородность пинча и мощность его излучения можно в схеме так называемого композитного пинча, в котором роль внешних оболочек заключается в передаче энергии (тока) от электрического генератора к высокоимпедансной нагрузке «файберу», установленному на оси пинча». Но не приведены конкретные сравнительные данные по мощности (или энергии) излучения традиционных и композитных Z-пинчей и исследуемого в работе композитного Z-пинча со средним зарядом ионов «файбера», сравнимым или превышающим средний заряд ионов внешней оболочки. Хотя для каскадныхборок, взаимодействующих через магнитное поле, увеличение мощности излучения по сравнению со стандартной сборкой убедительно продемонстрировано.

Имеется ряд небрежностей в оформлении работы:

- сокращение ВУФ не введено по тексту, полное название «вакуумное ультрафиолетовое излучение» без указания сокращения ВУФ появляется впервые на стр. 31;
- сокращение мягкое рентгеновское излучение (МРИ) впервые введено на стр. 55 и повторно на стр. 71, 75, после этого используется то полное, то сокращенное название, а иногда МР излучение;
- рис. 5.5. - что такое ФЭК - ?;
- сокращение вакуумный рентгеновский фотодиод (ВРД) введено впервые на стр. 159, а используется раньше, например, на стр. 83;
- стр. 178 - что такое FWHM -? и т. д.

Отмеченные замечания не снижают ценности проведенных исследований и не затрагивают ее основных положений.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.9 - Физика плазмы. Тема диссертации соответствует отрасли физико-математических наук.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и является самостоятельной завершённой квалификационной научно-исследовательской работой. На основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научно-техническое достижение в исследованиях физики быстрых Z-пинчей различной конфигурации. Результаты исследований изложены в 30 статьях, в том числе в 29 статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций и 30 докладах на международных и российских симпозиумах и конференциях. Публикации по теме диссертации свидетельствуют об определяющем личном вкладе Г.С. Волкова в материал, представленный в диссертации.

Из вышеизложенного следует, что диссертационная работа «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона

длительности» удовлетворяет требованиям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Волков Георгий Степанович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Заместитель директора института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) - начальник научно-исследовательского отделения ФГУП «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНТ ИЭФ) доктор физико-математических наук

А.В. Ивановский

04.05.2026 г.

Подпись Ивановского А.В. заверяю

Ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНТ ИЭФ» кандидат физико-математических наук

А.О. Бликов

04.05.2026 г.

Сведения об официальном оппоненте

по диссертации Волкова Георгия Степановича на тему «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы

ФИО: Ивановский Андрей Владимирович

Шифр и наименование научной специальности, по которой защищена диссертация: 01.04.02 «Теоретическая физика»

Ученая степень, ученое звание: доктор физико-математических наук.

Место работы, подразделение и должность: Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Институт Лазерно-Физических Исследований (ИЛФИ), заместитель директора ИЛФИ по исследованиям высокотемпературной замагниченной плазмы - начальник научно-исследовательского отделения.

Индекс, почтовый адрес места работы: 607188, г. Саров, Нижегородской области, пр. Мира, д.37.

Рабочий e-mail, рабочий телефон: ivanovsky@elph.vniief.ru, +7 83130 264 36

Даю свое согласие на публикацию предоставленных в настоящем заявлении моих персональных данных на сайте ФГБУН «Объединенный Институт Высоких Температур РАН, а также их хранение и использование в целях, связанных с обеспечением процедуры предстоящей защиты и последующей отчетности о деятельности диссертационного совета.

Список основных публикаций по научной специальности или тематике оппонируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования

1. Ивановский А.В., Мамышев В.И. Возможность достижения термоядерного зажигания при магнетогидродинамическом обжатии твёрдой мишени током дискового взрывомагнитного генератора // Физика плазмы, 2025, Т.51, №2, С. 165-172.
2. Ivanovskiy A.V. Mechanism of a stepped leader in a negative lightning // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2024. 265, pp. 106391-106398
3. Базанов А.А., Ерофеев А.Н., Ивановский А.В., Мамышев В.И., Шаповалов Е.В. Электровзрывной размыкатель тока для быстрого вывода энергии из индуктивного накопителя в нагрузку // Журнал технической физики. 2023. Т.93, № 8. С. 1204-1208

4. Ивановский А.В., Мамышев В.И. Возможность достижения термоядерного зажигания при магнитном обжатии высокотемпературной замагниченной плазмы током дискового взрывомагнитного генератора // Физика плазмы. 2023. Т.49. №7. С. 638-646
5. Базанов А.А., Гриневич Б.Е., Ивановский А.В. Асимметрия полета плоских лайнеров, разгоняемых магнитным полем // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т.63. №5 С.81-87.
6. Галанова Е.А., Долин Ю.Н., Ивановский А.В., Калинычев А.Е., Карпов Г.В., Ломтев С.С., Мерзлов А.Г., Нудиков В.Н., Прохоров Д.С., Салатов Е.А., Туров А.Н., Шаталин А.А. Многоканальный неуправляемый разрядник нового типа для наносекундной коммутации мегаамперных токов // Доклады Российской Академии Наук. Физика, Технические науки, 2022, Т. 506, №10 С. 41-46.
7. Ivanovskiy A.V. On the Mechanisms of Lightning Initiation and Positive Leader Intergrowth // Physics Letters A. 2022. V. 440. pp. 128112-128140.
8. Гаранин С.Г., Ивановский А.В., Куликов С.М., Мамышев В.И., Певный С.Н., Рогачев В.Г. Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т.48. №2. С. 131-140.
9. Гаранин С.Г., Ивановский А.В. Взрывомагнитные генераторы энергии. Академик А.Д. Сахаров, Научные труды, К 100-летию со дня рождения, М. Физматлит, 2021, С. 117-134
10. Ивановский А.В., Калинычев А.Е., Карпов Г.В. Метод улучшения начальной азимутальной однородности токовой оболочки в устройствах с плазменным фокусом // Физика плазмы, 2021, Т.47, №2, С. 109-116.
11. Дудай П.В., Зименков А.А., Ивановский А.В., Климушкин К.Н., Краев А.И., Куделькин В.Б., Мамышев В.И., Полюшко С.М., Шибиков З.С., Шаповалов Е.В. Дисковые взрывомагнитные генераторы нового поколения // Доклады Российской Академии наук. Физика, Технические науки, 2021, Т.498, С.7-10.

Ивановский Андрей Владимирович
доктор физико-математических наук

А.В. Ивановский

10 августа 2026 г.

Подпись Иванковского А.В. заверяю
Ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
кандидат физико-математических наук

А.О. Бликов

10 августа 2026 г.