

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Волкова Георгия Степановича на тему
«Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

В работе исследуется широкий круг вопросов, связанных с разработкой методов диагностики и исследованиями физических процессов, протекающих в высоковольтных наносекундных разрядах с токами мегаамперного диапазона.

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.

Общий объем диссертации составляет 247 стр., включая 138 рисунков, 33 таблиц и список литературы из 154 наименований.

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 аннотация диссертационной работы.

В первой главе приведен детальный обзор современных методов диагностики физических процессов в плотной плазме с температурой 50-1000 эВ, использованных в работе. Для измерения потоков рентгеновского излучения с высоким временным разрешением (~ 1 нс) использовались вакуумные рентгеновские фотодиоды или полупроводниковые *p-i-n* детекторы с соответствующими фильтрами. Для измерения спектров излучения плазмы использовались полихроматоры на основе многослойных рентгеновских зеркал. Измерения спектров с высоким разрешением проводились с использованием кристаллических спектрографов с регистрацией спектров на пленку и линейные ПЗС структуры. Для измерения формы светящегося объекта использовались камеры-обскуры. Полные энергетические потери плазмы пинча (энергия излучения и энергия ионных потоков разлетающейся плазмы) измерялись термопарными калориметрами. Для измерения радиационных потерь плазмы пинча и энергии разлетающейся ионной компоненты использовался фольговый радиационный калориметр. Все разрабатываемые методики были адаптированы к проведению измерений в условиях высокого уровня электромагнитных наводок и фона жесткого рентгеновского

Эта глава весьма значительна по объему, что обусловлено широким кругом разнородных объектов и явлений, исследуемых в работе.

Вторая глава посвящена метрологическим аспектам проводимых исследований, в которых важную роль играют современные методы рентгеновской диагностики, обладающие высокими временными, пространственными и спектральными разрешениями для исследования излучающих пинчей. Эффективное использование методик в экспериментах на мощной импульсной установке, требует предварительных отработок и калибровок аппаратуры на более простых установках меньшей мощности, но обеспечивающих подобные размеры источника излучения, широкий спектр излучения и соответствующую длительность импульса излучения.

При этом следует решить основные задачи: абсолютная калибровка чувствительности различных типов детекторов мягкого рентгеновского излучения; проверка их линейности и временного разрешения; относительная калибровка элементов рентгеновской оптики; отработка рентгеновских методик (МКП-ЭОПы, быстрый фольговый радиационный калориметр, термопарные калориметры, ВУФ спектрографы на пропускающих и отражающих решетках); рентгеновское просвечивание плазмы и газовых струй.

Для решения этих задач был разработан стенд, состоящий из различного вида источников рентгеновского излучения и соответствующего

метрологического обеспечения. Спектр излучения источников охватывает широкий интервал от десятков эВ до сотен кэВ, поскольку именно такой широкий спектр излучения реализуется при работе мощных импульсных генераторов тераваттного диапазона мощности.

Третья глава посвящена обсуждению результатов исследований композитного Z-пинча, состоящего из внешней полый газовой оболочки (аргон, пропан) и внутреннего цилиндра («fiber»), изготовленного из пенистого материала. Эксперименты проводились на установке «Ангара-5-1» при токах в нагрузку до 3 МА. Под давлением магнитного поля тока, протекающего через ионизованный газ, оболочка ускорялась и сжималась на «файбер», который располагался на оси газовой струи. Для измерения параметров плазмы использовались методы рентгеновской спектроскопии, позволившие оценить значения электронной плотности и температуры. Рассмотрены различные механизмы нагрева плазмы.

В **четвертой главе** описан новый вариант нагрузки сильноточного Z - пинча для схем непрямого обжата мишеней. Особенностью нагрузки является высокая начальная аксиальная неоднородность распределения массы сжимаемого вещества. В экспериментах в качестве нагрузки сильноточного генератора «Ангара-5-1» использовалась каскадная сборка, состоящая из двойной многопроволочной сборки из вольфрамовых проволочек и внутренней, соосной с ней, пенной цилиндрической оболочкой низкой плотности. Показано, что для динамики сжатия такой нагрузки характерны две стадии: сжатие многопроволочной нагрузки у катода и анода, с образованием двух отдельных пинчей и сжатие, с задержкой, центральной части нагрузки, включающей пенную цилиндрическую оболочку. В предлагаемой схеме можно реализовать облучение пены мягким рентгеновским излучением приэлектродных пинчей, переводящим ее из твердотельного состояния в плазменное еще до начала процесса взаимодействия ускоренной внешней плазменной оболочки с пенным цилиндром. Для этого используется дополнительное, неоднородное по длине сборки, напыление металлических покрытий (Bi) на проволочки внешней сборки на длине, соответствующей длине внутреннего пенного цилиндра, при этом увеличение массы напыления приводит к реализации схемы статического «хольраума» непрямого облучения мишеней.

В **пятой главе** рассмотрены способы предыонизации нагрузок сильноточных генераторов на основе источника ВУФ, возникающего при вакуумном пробое по поверхности диэлектрика, а также влияние предыонизации на сжатие многопроволочных проводящих цилиндрических

сборок. В главе приведены результаты исследования разрядов микросекундной длительности по поверхности диэлектрика с различной геометрией электродов, как в вакууме, так и в воздухе при атмосферном давлении. Вариант системы предыонизации газовых (ксенон) струй был реализован на установке «Ангара - 5 - 1». Показано, что наличие для случая проволочной нагрузки токовой предыонизации, реализуемой путем опережающего на 110 - 130 нс срабатывания одного из восьми модулей приводит к заметному увеличению выхода излучения водородо - и гелиоподобных линий алюминия, хотя сжатие пинча происходит током меньшей амплитуды.

Глава 6 посвящена измерениям спектров излучения вольфрамовой плазмы Z-пинчей, образующихся при сжатии цилиндрических многопроволочных сборок в экспериментах на сильноточной установке «Ангара-5-1». Показано, что основная доля энергии излучения вольфрамовой плазмы находится в интервале энергий квантов 80-300 эВ. Спектроскопия пинчей, составленных из материалов с сильно различающимися атомными номерами (например, Al и W) позволяет определять параметры плазмы по спектру излучения элемента с относительно невысоким Z. Увеличивая долю элемента с большим Z в сборке, состоящей, в основном, из элемента с малым Z, можно существенно уменьшить электронную температуру и интенсивность излучения K - серий [H] и [He] ионов плазмы легкого элемента. Таким образом, используя элемент с высоким Z, можно за счёт снижения температуры регулировать “жесткость” спектра излучения. Показано также, 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

В **главе 7** приведены результаты измерений анизотропии энергетических потерь сильноточных многопроволочных Z – пинчей, проведенных на установке “Ангара - 5 -1” при токах в нагрузку до 4 МА. Измерения энергетических потерь проводились в направлениях перпендикулярно и вдоль оси пинча, с направления анодного электрода. Проведенные измерения радиационным калориметром показали, что плотность потоков энергии разлетающейся плазмы в направлении перпендикулярном оси пинча не превышает 5 % от плотности потока энергии мягкого рентгеновского излучения. В осевом направлении плотность потоков энергии разлетающейся плазмы

пинча сравнимы или превышают плотность потока энергии мягкого рентгеновского излучения.

Последняя **Глава 8** посвящена экспериментам по сжатию каскадных многопроволочных вольфрамовых сборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии образования пинча. В экспериментах получена высокая мощность мягкого рентгеновского излучения $\sim 10\text{-}11$ ТВт с полной энергией излучения порядка 130-140 кДж с пинча длиной 1 см. Удельная и полная мощности излучения пинча, полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью, превышают удельную и полную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной сборки» длиной 16 мм с теми же параметрами.

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. Доказано, что уменьшение индуктивности каскадных цилиндрических многопроволочных вольфрамовых сборок, путем уменьшения их длины с 1,6 см до 1 см позволяет при тех же параметрах разряда существенно повысить полную и удельную мощности излучения пинча в процессе сжатия с $\sim 7\text{-}8$ ТВт и 5 ТВт/см до $\sim 10\text{-}11$ ТВт и 10-11 ТВт/см, соответственно. Эффект достигается за счет увеличения роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду. Результат демонстрирует возможность достаточно простым способом существенно повысить излучательные характеристики пинча.
2. Показана возможность эффективной (свыше 30%) передачи энергии с внешней оболочки композитного Z – пинча во внутренний плотный излучающий «файбер», состоящий из вещества с атомным номером, сравнимым с атомным номером вещества оболочки или превышающим его. Эффективная передача энергии от внешней оболочки на «файбер» объясняется высокой электронной теплопроводностью в отсутствие замагниченности электронов. Данный результат несет важную информацию о механизмах взаимодействия внешней оболочки композитного Z – пинча с внутренним «файбером»

3. Экспериментально измерена анизотропия плотности потоков энергии разлетающейся плазмы мегаамперных Z – пинчей. Показано, что в направлении перпендикулярном оси пинча, энергия переносимая плазменными потоками составляет менее 5% от энергии излучения, а в направлении вдоль оси они сравнимы. Этот результат стимулировал теоретические исследования МГД механизма аксиального ускорения плазмы в сильноточных пинчах
4. Установлена важная роль токовой предыонизации многопроволочныхборок в увеличении выхода линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия в спектральном интервале 1.5 - 2.3 кэВ. Обнаружен эффект увеличения вдвое этого выхода при включении предыонизации за 110-130 нс до основного импульса тока в связи с тем, что уменьшается влияние начальной аксиальной неоднородности распределения плотности плазмы на развитие неустойчивости Рэля–Тейлора. На основе этого результата можно разработать новые подходы к реализации источников мощного рентгеновского излучения кэВ-ного диапазона на основе сильноточных пинчей.

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 наглядными физическими оценками. Здесь автор показал себя не только высококвалифицированным экспериментатором, но и специалистом широкого профиля, способным анализировать также серьезные теоретические модели. Особо следует отметить тщательное обоснование использованных диагностических методик, использование широкого набора 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**.

1. Общие замечания по работе

1.1 Диссертационная работа представляет собой обобщение многолетних исследований большого научного коллектива, поэтому автору следовало указать роль и место этих исследований в общей картине работ по программе ИТС и созданию мощных источников мягкого рентгеновского излучения

1.2. В списке цитируемой литературы присутствуют, в основном, работы до 2010 г. и лишь единичные современные публикации. Автору следовало дать более широкое описание актуальных, в том числе зарубежных, исследований

2. Частные замечания

2.1. На рис.1.3 приведен спектр излучения струи ксенона в экспериментах на установке Ангара-5-1, на котором помимо тепловой части присутствует немаксвелловский высокоэнергичный «хвост». Следовало обосновать утверждение о вкладе линейчатого излучения в эту часть спектра, а не излучения, например пучка ускоренных электронов

2.2. На с. 40 описан рентгеновский спектрометр с детектором на основе ПЗС-линейки. Поскольку использование такого датчика для рентгеновских измерений является нетривиальной задачей, автору следовало дать пояснения по характеристикам датчика: спектральной чувствительности, динамическому диапазону и т.д.

2.3. График спектральной чувствительности детектора на рис.2.5 имеет явный вид насыщения при энергии квантов больше 250 эВ. Каким образом автор пользовался этим детектором?

2.4. Экспериментальные данные на рис. 2.21. имеют очень большой разброс по оси энергий (сотни эВ!). Необходим комментарий автора о причинах этого эффекта.

2.5. На рис. 4.4. приведены осциллограммы сигналов датчиков рентгеновского излучения для энергий квантов > 130 эВ и > 700 эВ, амплитуды и площади под которыми очень близки. Однако соответствующие участки энергетического спектра на рис.4.7. отличаются более чем на порядок. Почему?

Кроме того, спектр излучения на рис.4.7, а также на рис. 6.3 – 6.5 далек от Планковского. Необходимы пояснения, в каких случаях в экспериментах регистрируется именно тепловой спектр, когда в спектре наблюдаются существенные искажения из-за вклада линейчатого спектра и других причин, а когда преобладает линейчатый спектр (например, в обсуждении на с.191)

2.6. Рис.4.5. Требуется пояснение происхождения второго пика на сигнале рентгеновского датчика и отсутствие в этот момент признаков пинчевания плазменного столба на радиальной оптической щелевой развертке.

2.7. С. 169. Необходимы пояснения о физических причинах резкого падения температуры алюминиевого пинча при добавлении в сборку небольшой доли вольфрама

2.8. Почему на рис.8.5, 8.12, 8.16, 8.18. момент максимальной амплитуды рентгеновского излучения регистрируется существенно раньше момента максимального сжатия плазменного столба, наблюдаемого на оптической щелевой развертке?

Сделанные замечания носят, в основном, характер рекомендаций и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

В диссертационной работе представлены результаты создания широкого спектра методов диагностики высокотемпературной плазмы и данные многочисленных экспериментов по исследованию такой плазмы на установках с рекордными параметрами. Автором обсуждаются физические модели наблюдаемых явлений. Представленная в работе оригинальная аппаратура может найти широкое применение в исследовании плазменных объектов различной природы. Полученные результаты являются существенным продвижением в понимании физических процессов, протекающих в плазме с экстремальными параметрами, и служат основой для дальнейших решений в области инерциального термоядерного синтеза. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о соответствии содержания диссертации специальности 1.3.9 – Физика плазмы

Заключение

Диссертационная работа Г.С. Волкова 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 российских и международных конференциях, опубликованы в рейтинговых научных изданиях и широко известны мировой научной общественности.

Таким образом, диссертационная работа «Переходные режимы излучения сильнотоочных разрядов наносекундного диапазона длительности», удовлетворяет требованиям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г. а ее автор Волков Георгий Степанович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы

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: papern@math.irk.ru

09.09.2026 года, г. Иркутск

Подпись Паперного В.Л. удостоверяю
Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ

1 Куранова Н.В.

Сведения
об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Паперный Виктор Львович
Гражданство	РФ
Ученая степень	Доктор наук
Отрасль науки	Физико-математические науки
Специальность	1.3.9. Физика плазмы
Ученое звание	Профессор
Должность	Заведующий кафедрой
Место работы	Иркутский государственный университет
Организационно-правовая форма	ФГБОУ ВО
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Структурное подразделение	Кафедра общей и космической физики
Адрес электронной почты	paperny@math.isu.runnet.ru
Телефон	89149333884

СПИСОК

опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях официального оппонента по защите диссертации Волкова Георгия Степановича на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему: «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности», по специальности 1.3.9 – физика плазмы

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
1	Small-sized bright point-like source of picosecond soft x-ray pulses based on a high-voltage vacuum discharge	Научная статья	Baryshnikov V. I. Chernikh. A. A.	Phys. Plasmas 30, 094501 (2023)	Да
2	Ultrashort pulses of ultraviolet and vacuum-ultraviolet radiation of diffuse high-pressure gas discharges of picosecond duration	Научная статья	Baryshnikov V.I.	Optik. 2022. V. 271. 170067.	Да
3	Emission of anomalously hard x-ray radiation by a target upon exposition with an electron beam, ejected by a low-energy vacuum discharge with laser ignition	Научная статья	Romanov I.V., Kologrivov A.A., Korobkin Y.V., Rupasov A.A.	Physics of Plasmas. 2022. V. 29, N. 6. 063102.	Да
4	Elongated long-lived jet of dense plasma produced by a hollow laser beam	Научная статья	Tsygvintsev I.P., Romanov I.V.	Physics of Plasmas. 2021. V. 28, N. 2. 023104.	Да
5	Beams of abnormally accelerated electrons emitted by a vacuum discharge plasma with laser ignition	Научная статья	I. V. Romanov, , A. A. Kologrivov, Yu. V. Korobkin, A. A. Rupasov	Technical Physics Letters, 2021, V. 47, I.13, P.43 - 46	Да
6	Enhancement of photoluminescence from rare-	Научная статья	A.A. Chernykh , A.S. Ishchenko ,	Journal of Luminescenc	Да

	earth ions in fluoride crystals by ion-implanted silver nanoparticles		S.V. Murzin, S. Myasnikova, E.A. Radzhabov R. Yu Shendrik, E.F. Martynovich, V.P. Dresvyansky	e 279 (2025) 121044	
7	Subnanosecond luminescence of molecular clusters in LiF crystals implanted with silver ions	Научная статья	A. A. Chernich, A. S. Ischenko, S. V. Murzin, V. P. Dresvyanskiy	Technical Physics Letters, 2024, V. 50, I.10, P. 29-32	Да
8	Источник мощных наносекундных импульсов ультрафиолетового излучения на основе сильноточного объемного разряда в ксеноне	Научная статья	В.И. Барышников	Письма в ЖТФ, 2026, том 52, вып. 5, С.14-17	Да
9	Spectral Luminescent Properties of Alkaline Earth Fluoride Crystals Implanted With Silver Ions V.	Научная статья	A. A. Chernykh, A. S. Ishchenko, S. V. Murzin, A. S. Myasnikova, R. Yu. Shendrik, E. F. Martynovich, and V. P. Dresvyanskii	Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, No. 7, pp. 1051–1054	Да

Паперный В.Л.

Дата 20.07.2026

