

## ОТЗЫВ

Официального оппонента д.ф.-м.н. Пикуза С.А. на диссертационную работу Волкова Г.С. «ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИТЕЛЬНОСТИ», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

*Актуальность исследований* вещества с высокой плотностью энергии связано со стремлением к достижению условий термоядерного синтеза в лабораторных условиях, с созданием сверхмощных источников излучения для практических применений, а также с возможностью моделирования процессов в космическом пространстве. Сильноточные наносекундные Z-пинчи, появление которых связано с развитием ускорительной техники, оказались эффективными инструментами для создания высокотемпературной плотной плазмы с концентрацией энергии в диапазоне гигаджоулей в кубическом сантиметре. В Z-пинчах, основанных на сжатии многопроволочных нагрузок, получена генерация коротковолнового излучения с мощностью более 300 ТВт в 10-наносекундном импульсе, что является рекордом для лабораторных условий. Установки для проведения таких экспериментов очень сложны и дороги, поэтому существуют лишь в нескольких странах, в том числе в России. В частности, на установке Ангара 5-1, действующей в г.Троицке была выполнена работа, представленная к защите. Работа направлена на исследование излучения и плазменной динамики сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности. Рассмотрены задачи связанные с повышением эффективности схем непрямого обжатия сферических мишеней мягким рентгеновским излучением сильноточных Z – пинчей. Исследованы спектрально-энергетические характеристики излучающих Z – пинчей, получаемых при имплозии различных нагрузок сильноточными 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.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, восьми глав, Заключения и списка литературы.

Во *введении* приведен обзор экспериментальных исследований по сильноточным разрядам высокой мощности. Рассмотрены актуальные вопросы исследования динамики сжатия и излучения высокотемпературной плотной плазмы Z – пинчевых разрядов и задачи, решаемые в представленных исследованиях.

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 пропускающих решеток, 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 потоков мягкого рентгеновского излучения. Описаны источники рентгеновского излучения, разработанные для проверки и калибровки рентгеновской аппаратуры в диапазоне энергий квантов от 0.05 до 100 кэВ. Приведен анализ выхода линейчатого и тормозного излучения возбуждаемого, как в вакуумных диодах со взрывоземиссионным 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, изготовленного из пенистого материала (агар-агар с добавлением солей KCl или NaCl) с начальной плотностью  $\sim 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Продемонстрировано, что электронная плотность в пинче в конечной фазе сжатия определяется массой внутреннего цилиндра. Показано, что большая часть вещества цилиндра прогревается до высокой температуры ( $\sim 1$  кэВ).

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования схемы пинча с начальной аксиальной неоднородностью массы сжимаемого вещества. В качестве нагрузки сильноточного генератора «Ангара-5-1» использовалась каскадная сборка, состоящая из внешней многопроволочной сборки из вольфрамовых проволочек и внутренней 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 K – излучения [H] и [He] ионов Al при сжатии многопроволочных цилиндрическихборок из алюминиевых проволочек.

В шестой главе рассмотрены результаты исследования параметров пинчей, получаемых при сжатии одиночных и двойных многопроволочныхборок. Исследовано излучение пинчей со сложным атомным составом, а именно влияние добавки вольфрама на излучение плазмы, получаемой при сжатии многопроволочныхборок. Исследованы переходные режимы излучения от каскадной нагрузки к композитному Z – пинчу. С применением методов рентгеновской спектроскопии исследовано взаимодействие каскадов многопроволочной сборки при имплозии.

В седьмой главе приведены результаты исследования анизотропии мягкого рентгеновского излучения и потоков плазмы Z - пинчей с использованием термопарных калориметров и фольговых быстрых радиационных калориметров. Полученные результаты сопоставлены с данными радиационных потерь, полученных методом фильтров.

В восьмой главе приведены результаты экспериментов 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 выходом рентгеновского излучения порядка 130–140 кДж с пинча длиной 1 см. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует об увеличении роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду.

*В заключении сформулированы основные результаты и выводы.*

*Научная новизна работы* определяется тем, что все эксперименты выполнены на уникальной установке, а решаемые в ней задачи могли быть решены только с использованием новых, специально разработанных приборов и методик. В частности, получены впечатляющие результаты по сжатию проволочных сборок и комбинированных нагрузок с переменной погонной массой.

*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, важной информации о степени анизотропии энергии плазменных потоков сильноточных Z - пинчей. Полученные экспериментальные данные стимулировали развитие детальных РМГД методов расчета спектральных характеристик излучения плотной высокотемпературной плазмы Z – пинчей.

*Личный вклад автора* заключается в постановке всех рассмотренных в работе задач, разработке соответствующих исследовательских методик, проведении экспериментов и анализе полученных результатов.

*Достоверность и обоснованность результатов*, полученных в диссертационной работе, основаны на комплексном подходе к исследованиям, строгом соблюдении метрологии измерений, использованию большого количества перекрестных и взаимно дополняющих методов диагностики и статистике измерений. Полученные автором результаты там, где это возможно, согласуются с данными, полученными в других работах или другими методиками.

Результаты проведенных исследований опубликованы в российских и зарубежных реферируемых журналах с высокими рейтингами и полностью отражают содержание работы.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По представленной диссертационной работе необходимо сделать ряд замечаний:

1. Название работы кажется не слишком удачным. Нигде в тексте не определено, что означает «Переходные режимы излучения». Название с одной стороны сужает реально представленную тематику, а с другой стороны неоправданно расширяет её, так как основные достижения и защищаемые положения связаны с экспериментами с проволочными сборками.

2. Каждая глава имеет своё введение и ряд глав содержит краткое описание одной и той же установки «Ангара 5-1» и использованных средств регистрации излучения. Отсюда имеют место ряд повторов. Например, рисунок 6.1 полностью идентичен рисунку 1.13.

3. В тексте диссертации нет определения границ диапазонов излучения, названия которых используются в работе (ВУФ, мягкий рентген и др.)

4. В главе 3 из подписей к рисункам 3.2 – 3.4 непонятно, в каком порядке отражения получены спектры. Длины волн гелиоподобных ионов алюминия и аргона (калия, хлора)

отличаются примерно вдвое, так что это либо первый и второй порядки, либо второй и четвертый.

5. В главе 6 утверждается, что «При заданной геометрии измерений спектральное разрешение спектрографа определялось шириной кривой отражения кристалла и составляло  $E/\Delta E \sim 400$ », что не может быть верно, так как кривая отражения использованных кристаллов значительно уже.

Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на моей общей, весьма 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, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Волков Г.С. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., высококвалифицированный главный научный сотрудник Отдела физики высоких плотностей энергии, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, +7(499)132-66-68, pikuzsa@lebedev.ru

С. А. Пикуз

Помощник директора по научной работе, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53, +7(499)132-66-22, savinov@lebedev.ru  
д.ф.-м.н., профессор

С. Ю. Савинов

**Сведения**  
об официальном оппоненте

|                               |                                                               |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Фамилия, имя, отчество        | Пикуз Сергей Александрович                                    |
| Гражданство                   | РФ                                                            |
| Ученая степень                | Доктор наук                                                   |
| Отрасль науки                 | Физико-математические науки                                   |
| Специальность                 | 01.04.08 Физика плазмы                                        |
| Ученое звание                 |                                                               |
| Должность                     | Высококвалифицированный главный научный сотрудник             |
| Место работы                  | Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН                     |
| Организационно-правовая форма | ФГБУН                                                         |
| Ведомственная принадлежность  | Министерство науки и высшего образования Российской Федерации |
| Структурное подразделение     | Отдел физики высоких плотностей энергии                       |
| Адрес электронной почты       | <a href="mailto:pikuzsa@lebedev.ru">pikuzsa@lebedev.ru</a>    |
| Телефон                       | +7(499) 132-66-68 вн. 66-68                                   |

**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 | Experimental evidence of radiative collapse in hybrid $X$ pinches from time-resolved x-ray spectroscopy of Ti plasma | Научная статья | Shelkovenko T. A.,<br>Pikuz S. A.,<br>Tilikin I. N.,<br>Elshafiey E.,<br>Hammer D. A.                      | Physical Review E,<br>Vol. 112,<br>p. 055203,<br>2026          | Web of Science |
| 2 | Hot spot generation in hybrid $X$ pinches on a portable low-inductive KING generator                                 | Научная статья | Shelkovenko T. A.,<br>Tilikin I. N.,<br>Mingaleev A. R.,<br>Romanova V. M.,<br>Pikuz S. A.                 | Physical Review E,<br>Vol. 112,<br>p. 015207,<br>2025          | Web of Science |
| 3 | Когерентные свойства излучения сильноточных наносекундных разрядов                                                   | Научная статья | Тиликин И.Н,<br>Пестовский Н. В.,<br>Цхай С. Н.,<br>Шелковенко Т.А<br>Пикуз С.А.,<br>Савинов С. Ю.         | Успехи физических наук,<br>Т. 194, № 8,<br>с. 866–880,<br>2024 | Да             |
| 4 | Электрический взрыв тонких проводников (смена парадигмы)                                                             | Научная статья | Романова В.М.,<br>Тиликин И.Н.,<br>Тер-Оганесян А.Е.,<br>Мингалеев А.Р.,<br>Шелковенко Т.А.,<br>Пикуз С.А. | Физика плазмы,<br>Т. 50, № 9,<br>с. 1062–1075,<br>2024         | Да             |

**Сведения**  
об официальном оппоненте

|                               |                                                               |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Фамилия, имя, отчество        | Пикуз Сергей Александрович                                    |
| Гражданство                   | РФ                                                            |
| Ученая степень                | Доктор наук                                                   |
| Отрасль науки                 | Физико-математические науки                                   |
| Специальность                 | 01.04.08 Физика плазмы                                        |
| Ученое звание                 |                                                               |
| Должность                     | Высококвалифицированный главный научный сотрудник             |
| Место работы                  | Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН                     |
| Организационно-правовая форма | ФГБУН                                                         |
| Ведомственная принадлежность  | Министерство науки и высшего образования Российской Федерации |
| Структурное подразделение     | Отдел физики высоких плотностей энергии                       |
| Адрес электронной почты       | pikuzsa@lebedev.ru                                            |
| Телефон                       | +7(499) 132-66-68 вн. 66-68                                   |

**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 | Experimental evidence of radiative collapse in hybrid $X$ pinches from time-resolved x-ray spectroscopy of Ti plasma | Научная статья | Shelkovenko T. A.,<br>Pikuz S. A.,<br>Tilikin I. N.,<br>Elshafiey E.,<br>Hammer D. A.                      | Physical Review E,<br>Vol. 112,<br>p. 055203,<br>2026          | Web of Science |
| 2 | Hot spot generation in hybrid $X$ pinches on a portable low-inductive KING generator                                 | Научная статья | Shelkovenko T. A.,<br>Tilikin I. N.,<br>Mingaleev A. R.,<br>Romanova V. M.,<br>Pikuz S. A.                 | Physical Review E,<br>Vol. 112,<br>p. 015207,<br>2025          | Web of Science |
| 3 | Когерентные свойства излучения сильноточных наносекундных разрядов                                                   | Научная статья | Тиликин И.Н,<br>Пестовский Н. В.,<br>Цхай С. Н.,<br>Шелковенко Т.А<br>Пикуз С.А.,<br>Савинов С. Ю.         | Успехи физических наук,<br>Т. 194, № 8,<br>с. 866–880,<br>2024 | Да             |
| 4 | Электрический взрыв тонких проводников (смена парадигмы)                                                             | Научная статья | Романова В.М.,<br>Тиликин И.Н.,<br>Тер-Оганесян А.Е.,<br>Мингалеев А.Р.,<br>Шелковенко Т.А.,<br>Пикуз С.А. | Физика плазмы,<br>Т. 50, № 9,<br>с. 1062–1075,<br>2024         | Да             |

|   |                                                                                                                   |                |                                                                                                            |                                                           |                |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|
| 5 | Features of the formation of hot dense plasma in x-pinchs on current generators based on low-inductive capacitors | Научная статья | Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Pikuz S.A.                                  | Journal of applied physics, Vol. 136, p. 105903, 2024     | Web of Science |
| 6 | Exploding foils with artificial structure as a source of ultraviolet radiation                                    | Научная статья | Tilikin I.N., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Oginov A.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Ter-Oganesyan A.E. | Journal of applied physics, Vol. 134, p. 033302, 2023     | Web of Science |
| 7 | Methods of controlled formation of instabilities during the electrical explosion of thin foils                    | Научная статья | Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Oginov A.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Pikuz S.A.                     | Matter and radiation at extremes, Vol. 8, p. 055601, 2023 | Web of Science |
| 8 | Исследование наносекундного взрыва тонких фольг с искусственно нанесенной на поверхность структурой               | Научная статья | Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Огинов А.В., Перваков К.С., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А.       | Физика плазмы, Т. 48, № 11, с. 1075–1085, 2022            | Да             |
| 9 | Explosion dynamics of thin flat foils at high current density                                                     | Научная статья | Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Pikuz S.A., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Atoyan I., Hammel               | Matter and radiation at extremes, Vol. 7, p. 055901, 2022 | Web of Science |

Пикуз С.А.

Помощник директора по научной работе  
д.ф.-м.н., профессор

Савинов С. Ю.