

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Тиликина Ивана Николаевича «Исследование динамики гибридных Х-пинчей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов протекающих при взрыве гибридных Х-пинчей. Несмотря на повсеместное внедрение данного типа Х-пинча взамен стандартного до конца не было ясно, какие процессы протекают при взрыве гибридного Х-пинча, а также не было известно почему короткая проволока, помещенная между двумя коническими тугоплавкими электродами, ведет себя как Х-пинч с образованием единственной локализованной в пространстве горячей точки, а не как одиночная проволока у которой образуются несколько горячих точек вдоль ее длины.

По своей структуре диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст иллюстрируют 102 рисунка, библиография содержит 101 наименование. Общий объем работы 155 машинописных страниц.

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, показана научная новизна, сформулированы цели, описана структура работы, изложены положения, выносимые на защиту. Описана практическая и научная ценность работы, а так же описана апробация работы.

В **главе 1** диссертации представлен подробный обзор работ по исследованию Z- и особенно Х-пинчей, начиная от первых экспериментов и по настоящее время. Приведены параметры установок, работающих по всему миру с Х-пинчами. Так же в главе приведены определения основных понятий используемых в диссертации. А так же достаточно обосновано описана актуальность перехода от стандартных Х-пинчей к гибридным.

В **главе 2** представлено описание основных диагностик, используемых в экспериментах: электротехнических датчиков, детекторов рентгеновского излучения, а так же дано описание схем получения рентгеновских изображений. Так же в этой главе дано подробное описание установок, на которых выполнены эксперименты.

В **главе 3** приведено описание численных методов для обработки экспериментальных результатов: метода анализа интерферометрических картин, позволяющего определять параметры плазмы, а также метода расчета дифракционных картин, позволяющего повысить точность определения размера источника рентгеновского излучения по анализу рентгенограмм тест-объекта.

В **главе 4** представлено описание экспериментов по исследованию динамики гибридных Х-пинчей на различных установках. Представление результатов исследований разряда через гибридный Х-пинч разделено на части. Сначала приведены результаты исследований начальной стадии взрыва Х-пинча. Исследования были проведены на слаботочных генераторах ГВП и Микро-4. Показано, что в начальные моменты времени взрыв проволоки в гибридном Х-пинче подобен взрыву обычной одиночной проволоки. При этом на электродах начинается образование приэлектродной плазмы. Далее приведены результаты экспериментов на более сильноточных генераторах, но с относительно большим временем нарастания тока. На них было выявлено, что образование приэлектродной плазмы играет важную роль в работе гибридного Х-пинча. В конце главы описаны эксперименты на сильноточных генераторах, имеющих небольшое время нарастания тока: генераторы БИН и ХР. На этих генераторах была исследована конечная стадия формирования горячей точки при взрыве Х-пинча. Из экспериментов по исследованию динамики гибридных Х-пинчей сделан вывод, что

на ранних этапах развития гибридного X-пинча, происходит процесс взрыва одиночной проволоочки. Происходит взрыв по поверхности проволоочки, образование керны и короны и их расширение. При этом возможно начинается образование нескольких перетяжек. Однако, в то же самое время, под действием УФ излучения проволоочки на поверхности электродов образуется плазма. При этом сокращается эффективный размер межэлектродного промежутка, в котором возможно формирование перетяжек с последующим образованием горячей точки. После чего, движущаяся приэлектродная плазма закорачивает межэлектродный промежуток. Это в свою очередь будет препятствовать возможному вторичному пинчеванию плазмы проволоочки или образованию электронного пучка в межэлектродном пространстве. Таким образом, образование и расширение приэлектродной плазмы играет существенную роль в формировании гибридного X-пинча.

Так же проведено исследование излучения гибридного X-пинча в различных спектральных диапазонах. Показано, что гибридный X-пинч является широкодиапазонным источником как мягкого рентгеновского излучения, так и жесткого. При этом, жесткого излучения наблюдается существенно меньше, чем в случае со стандартным X-пинчем. Жесткое излучение генерируется короткое время из небольшой области, что позволяет его использовать в качестве источника для различных применений. В конце главы описана схема модернизации электродной системы гибридного X-пинча для использования его в качестве источника электронного пучка.

Глава 5 посвящена возможностям использования гибридного X-пинча в качестве источника рентгеновского излучения. Показаны примеры использования гибридного X-пинча в схеме точечной проекционной рентгенографии не только в мягком рентгеновском диапазоне, но и в жестком. В этой главе описаны возможности использования излучения гибридного X-пинча для эмиссионной и абсорбционной спектроскопии. Приведены различные схемы получения изображения и спектра на различных экспериментальных установках.

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы:

1. Взрыв гибридного X-пинча на ранних моментах времени представляет собой взрыв одиночной проволоочки.
2. При взрыве проволоочки гибридного X-пинча происходит образование приэлектродной плазмы, которая со временем сжимает межэлектродное расстояние, приводя к полному закорачиванию межэлектродного промежутка в поздние моменты времени.
3. Расширение приэлектродной плазмы в аксиальном направлении и сжатие электродной плазмой расширяющегося керны проволоочки гибридного X-пинча является основным фактором, приводящим к переходу от взрыва одиночной проволоочки к взрыву гибридного X-пинча.
4. В поздние моменты времени взрыв гибридного X-пинча происходит так же, как и взрыв стандартного X-пинча. Происходит формирование единичной перетяжки, приводящей к образованию горячей точки. После чего происходит обрыв перетяжки и генерация электронного пучка.
5. Гибридный X-пинч является простым и дешевым источником рентгеновского излучения в широком диапазоне энергии излучения с широкими возможностями использования как для проекционной рентгенографии различных объектов, так и для использования в качестве источника для эмиссионной и абсорбционной спектроскопии.
6. Модернизированная конструкция гибридного X-пинча позволяет выводить электронный пучок из высоковольтного диода для дальнейшего использования.

Научная значимость представленных результатов заключается в следующем:

1. Впервые проведено детальное исследование динамики гибридных X-пинчей, включающее исследование начальной стадии взрыва на генераторах с невысокими параметрами (МИНИ-2, Микро-4, ГВП), а также финальной стадии взрыва, во время которой происходит формирование горячей точки и образование минидиода, на сильноточных генераторах (КИНГ, БИН, ХР).
2. Выявлено основополагающее влияние приэлектродной плазмы на процесс формирования горячей точки при взрыве гибридного X-пинча.
3. Метод расчета дифракционных картин впервые применен для определения размера источника мягкого рентгеновского излучения при взрыве гибридного X-пинча на сильноточных генераторах с различными выходными параметрами.
4. Метод определения распределения плотности плазмы с помощью анализа интерференционных картин применен для расчета плотности плазмы взорванных проволочек на начальной стадии взрыва гибридных X-пинчей на генераторах с невысокими параметрами.
5. Исследованы параметры источника мягкого рентгеновского излучения на основе горячей точки гибридного X-пинча. Показано, что параметры такого источника практически не отличаются от параметров источника при взрыве стандартного X-пинча.
6. Жесткое рентгеновское излучение также было зарегистрировано и исследованы параметры источника такого излучения. Показано, что источник жесткого рентгеновского излучения имеет размер в пределах 30-70 мкм при длительности вспышки излучения 2-6 нс, что по некоторым параметрам превосходит источник излучения в том же диапазоне энергий, образующийся при взрыве стандартного X-пинча.
7. Продемонстрирована возможность использования излучения гибридного X-пинча в качестве источника для проекционной рентгенографии, для эмиссионной и абсорбционной рентгеновской спектроскопии, а так же в качестве источника электронного пучка.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, хотя не лишена некоторых недостатков:

1. В параграфе «ВВЕДЕНИЕ» в пункте 6 «Научная новизна работы», автор пишет: *«Метод определения распределения плотности плазмы с помощью анализа интерференционных картин применен для расчета плотности плазмы взорванных проволочек на начальной стадии взрыва гибридных X-пинчей на генераторах с невысокими параметрами.»* В чем заключается новизна, использованного метода определения плотности плазмы интерферометрическим методом?

2. В представленных экспериментах в главе 4 было выявлено, что образование приэлектродной плазмы играет наиважнейшую роль при взрыве гибридного X-пинча (ГХП). Основным механизмом образования приэлектродной плазмы, по мнению автора диссертации, является облучение электродов рентгеновским излучением взорванной проволоки в межэлектродном зазоре ГХП. При этом в работе совершенно не обсуждается взрывной механизм образования приэлектродной плазмы (взрывная эмиссия с отрицательного электрода линии), присущий разрядам на сильноточных электрофизических установках, когда плазма у электродов образуется под воздействием импульса высокого напряжения от сотен киловольт и выше при уровне напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре $\sim 10^5$ В/см. Следует заметить, что выбору вещества

электродов передающих линий при таких уровнях напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре посвящен ряд экспериментальных работ, где было показано, что переключение линии определяется редкой плазмой [Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 291., Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В. и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 627., Грабовский Е.В., Левашов П.Р., Олейник Г.М. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 782.]. Вполне возможно на таких установках взрывной механизм образования приэлектродной плазмы будет определяющим и в работе ГХП.

3. Так в экспериментах на генераторе МИНИ-2 было показано, что межэлектродная плазма вначале разряда через ГХП с некоторой скоростью заполняет межэлектродный зазор, а потом сильно тормозится магнитным полем разрядного тока, протекающего через ГХП. Естественно предположить, что вначале разряда образуется достаточно холодная приэлектродная плазма с плохой проводимостью, способная распространяться в межэлектродном зазоре поперек магнитного поля разрядного тока. В течение разряда данная плазма нагревается, увеличивается ее проводимость и возрастает ее взаимодействие с магнитным полем. Рост проводимости приэлектродной плазмы повлечет за собой перераспределение тока между этой плазмой и областью образования горячей точки (ГТ), что повлияет на финальные параметры плазмы ГТ. Хотя в данной работе не изучались параметры приэлектродной плазмы, образующейся в межэлектродном зазоре ГХП, хотелось бы, чтобы автор работы в дальнейшем проанализировал, как параметры такой плазмы влияют, например, на поглощение рентгеновского излучения из ГТ, а также на протекание тока вблизи области пинчевания и образования ГТ.

4. На рис. 4.7 диссертации представлены временные зависимости средней скорости расширения плазмы алюминиевой и медной проволок в составе ГХП. Из данного рисунка видно, что в промежутке времени от 0 до 200 нс наблюдается различный характер временной зависимости средней скорости расширения плазмы для Al и Cu проволок – скорость расширения плазмы Al-проволоки падает, а медной возрастает. Хотелось бы выяснить, с чем связано такое различие?

5. Автор работы из рентгенограмм рис. 4.2.2 определяет диаметры кернов взорванных проволок из различных веществ в составе ГХП на различных стадиях разряда. Исходя из полученных размеров кернов проволок, делается качественное сравнение индуктивностей кернов взорванных проволок из различных веществ и величин тока, протекающего по ним. Хотя известно, что почти весь разрядный ток протекает по редкой плазме короны, которая плохо регистрируется на рентгенограммах. Хотелось бы прояснить, так все-таки, где по мнению автора протекает ток?

6. В параграфе «Заключение» п. 6. сказано: *«Показано, что ГХП можно использовать в качестве источника рентгеновского излучения для исследования различных объектов, как плазменных, так и биологических. Технология получения таких изображений достаточно простая и не требующая какой-либо оптики. При этом качество изображения превосходит многие аналоги.»* Хотелось бы от автора получить небольшое сравнение с другими известными методами получения рентгенограмм биологических объектов.

Следует заметить, что данные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и являются пожеланием автору выяснить эти вопросы в дальнейшем с использованием разработанных им методик.

Полученные результаты опубликованы в восьми статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и апробированы в докладах на двенадцати отечественных и международных конференциях. В публикациях достаточно подробно и полно изложены полученные И.Н. Тиликиным результаты, а также методы и подходы, использованные им при выполнении работы.

Считаю, что представленная работа соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Тиликин Иван Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составил официальный оппонент, ведущий научный сотрудник АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», кандидат физико-математических наук

Митрофанов Константин Николаевич

03.10. 2016 года

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
ул. Пушкиных, вл.12, г. Москва, г.Троицк, Россия
тел. (915) 249-70-67

Подпись Митрофанова К.Н. заверяю
Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»
к.ф.м.н. Ежов А.А.



Список основных статей, опубликованных за последние 5 лет официального оппонента Митрофанова Константина Николаевича по теме диссертационной работы Тиликина Ивана Николаевича «Исследование динамики гибридных Х-пинчей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

1. В.В. Александров, Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, А.Н. Грибов, А.Н. Грицук, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, И.Н. Фролов, В.А. Барсук, С.Ф. Медовщиков, П.В. Сасоров ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПЛОЗИИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1 ПРИ ТОКЕ ДО 4 МА // Физика плазмы, 2012, Т. 38, № 4, С.345-369.
2. V.I. Krauz, K.N. Mitrofanov, M. Scholz, M. Paduch, P.Kubes, L. Karpinski and E. Zielinska EXPERIMENTAL EVIDENCE OF EXISTENCE OF THE AXIAL MAGNETIC FIELD IN A PLASMA FOCUS // EPL (Europhysics Letters), 2012. V. 98. Issue 4. P. 45001.
3. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Александров В.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Сасоров П.В., Самохин А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1 // Физика плазмы, 2012, Т.38, № 10, С. 866–889.
4. P. Kubes, V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Paduch, M. Scholz, T. Piszarczyk, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, L. Karpinski, D. Klir, J. Kortanek, E. Zielinska, J. Kravarik and K. Rezac CORRELATION OF MAGNETIC PROBE AND NEUTRON SIGNALS WITH INTERFEROMETRY FIGURES ON THE PLASMA FOCUS DISCHARGE // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, V. 54, N. 10. P. 105023.
5. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Александров В.В., Олейник Г.М., Медовщиков С.Ф., Шевелько А.П. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБЛАСТИ ПРИ ТОКОВОМ СЖАТИИ ПЕНОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1 // Физика плазмы, 2013, Т. 39, № 1, С.71-96.
6. В. В. Александров, К. Н. Митрофанов, А. Н. Грицук, И. Н. Фролов, Е. В. Грабовский, Я. Н. Лаухин ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ НА ДИНАМИКУ ИМПЛОЗИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ЛИНЕЙНОЙ МАССОЙ // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 10. С. 905-918.
7. В.И. Крауз, К.Н. Митрофанов, Д.А. Войтенко, Ю.В. Матвеев, Г.И. Астапенко ИССЛЕДОВАНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И СКЕЙЛИНГОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА УСТАНОВКЕ КПФ-4-ФЕНИКС // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С.993-1005.
8. Gritsuk A.N., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Laukhin Y., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Volkov G.S., Frolov I.N. and Shevel'ko A.P. RADIATION ANISOTROPY AT THE IMPLOSION OF MULTIWIRES ARRAYS // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. V. 41. N. 11. NOVEMBER 2013.
9. К. Н. Митрофанов, В. И. Крауз, В. В. Мяслон, В.П. Виноградов, Ю.В. Виноградова, Е. В. Грабовский, С. А.Данько, А. А. Зеленин, С. Ф. Медовщиков, А.Н. Мокеев ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ ПФ-3 // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С.134-159.
10. А. П. Артемов, А. С. Жигалин, И. В. Лавринович, В. И. Орешкин, Н. А. Ратахин, А. Г. Русских, А. В. Федюнин, С. А. Чайковский, А. А. Эрфорт, К. Н. Митрофанов, Е. В. Грабовский, В. В. Александров, В. П. Смирнов

- СИНХРОНИЗУЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР X-ПИНЧА // ПТЭ. 2014. Т. 57. № 4. С. 92-106.
11. К. Н. Митрофанов, В. И. Крауз, П. Кубеш, М. Шольц, М. Падух, Е. Зелинска ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ТПО И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРИОСЕВОЙ ОБЛАСТИ УСТАНОВКИ RF-1000 // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 8. С.721-737.
 12. К. Н. Митрофанов, В. И. Крауз, В. В. Мялтон, Е. П. Велихов, В. П. Виноградов, Ю. В. Виноградова ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ НА УСТАНОВКЕ ПФ-3 // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. Вып. 5(11). С.1035-1050.
 13. К. Н. Митрофанов, В. В. Александров, Е. В. Грабовский, Е. А. Птичкина, А. Н. Грицук, Г. М. Олейник, И. Н. Фролов, Я. Н. Лаухин ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗЫ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ПРОРЫВОВ МАГНИТНОГО ПОТОКА ПРИ ИМПЛОЗИИ ПРОВОЛОЧНОЙ СБОРКИ // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 9. С.779-806.
 14. С. А. Данько, К. Н. Митрофанов, В. И. Крауз, В. В. Мялтон, А. И. Жужунашвили, В.П. Виноградов, А. М. Харрасов, Ананьев С.С., Ю.В. Виноградова, Калинин Ю.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМОФОКУСНОГО РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ ПФ-3 // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 11. С.955-968.
 15. Е.В. Грабовский, П.В. Сасоров, А.П. Шевелько, В.В. Александров, С.Н. Андреев, М.М. Баско, А.В. Браниций, А.Н. Грицук, Г.С. Волков, Я.Н. Лаухин, К.Н. Митрофанов, В.Г. Новиков, Г.М. Олейник, А.А. Самохин, В.П. Смирнов, И.Ю. Толстихина, И.Н. Фролов, О.Ф. Якушев РАДИАЦИОННЫЙ НАГРЕВ ТОНКИХ AL-ФОЛЬГ ИНТЕНСИВНЫМ EUV-ИЗЛУЧЕНИЕМ // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. Вып. 5. С. 394-401.
 16. А. В. Браницкий, Е. В. Грабовский, В. В. Джангобегов, Я. Н. Лаухин, И. Н. Митрофанов, Г. М. Олейник, П. В. Сасоров, С. И. Ткаченко, И. Н. Фролов ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ПРОТЕКАНИИ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА С ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДО 3 МА/см ПО ТОЛСТОСТЕННОМУ ЭЛЕКТРОДУ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 4. С. 342-351
 17. К. Н. Митрофанов, В. В. Александров, А. Н. Грицук, Е. В. Грабовский, И. Н. Фролов, Я. Н. Лаухин, Г.М. Олейник, О.Г. Ольховская ДИНАМИКА СЖАТИЯ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК С РАЗЛИЧНЫМ ПРОФИЛИРОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ МАССЫ // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 9. С. 813-840.

Официальный оппонент, ведущий научный сотрудник АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», кандидат физико-математических наук



Митрофанов Константин Николаевич

03. 10. 2016 года