

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Гаранина Сергея Флоровича

на диссертационную работу Митрофанова Константина Николаевича

«Экспериментальное исследование особенностей плазмообразования и

токового сжатия плазмы лайнеров различных конструкций», представленную

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по

специальности: 01.04.08 – Физика плазмы.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию проволочных плазменных лайнеров различных конструкций (лайнеры, изготовленные из разных материалов, одиночные и вложенные сборки, конические и квазисферические сборки), а также разработке средств диагностики, применяемых для получения экспериментальных данных о динамике сжатия этих лайнеров, в первую очередь магнитных зондов, измеряющих магнитные поля в плазме при высоких плотностях энергии.

Актуальность темы работы

В настоящее время физика высоких плотностей энергии (ВПЭ) бурно развивается во всем мире, и электрофизические подходы играют в этом развитии ведущую роль. Создаются новые мощные электрофизические установки, предназначенные для исследований физики ВПЭ; разрабатываются методы диагностики процессов, происходящих при ВПЭ; исследуются методы получения ВПЭ, и использования ВПЭ для создания мощных источников рентгеновского излучения. Особую роль в этих исследованиях принадлежит термоядерным проектам, таким как МАГО-MTF и MagLIF. Сохраняются перспективы получения термоядерного зажигания в системах, использующих энергию рентгеновского излучения, получаемую при сжатии проволочныхборок в схемах с вакуумным или динамическим хольраумом, для непрямого сжатия термоядерной мишени. В этом подходе достигнуты определенные успехи: на установке ZR США получены мощные импульсы мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с энергией около 2 МДж. Однако процесс имплозии многопроволочныхборок, использующийся в

этом подходе, является сложным, неустойчивым, турбулентным, и его описание в настоящее время является в значительной степени феноменологическим. Поэтому получение экспериментальной информации о протекающих при имплозии многопроволочных лайнеров процессах, таких как интенсивность плазмообразования, развитие неустойчивостей, получение данных о распределении магнитных полей и токов, является критически важным для этого подхода. Эти данные до определенной степени точности позволяют предсказывать результаты экспериментов и прогнозировать работу плазменных многопроволочных нагрузок для планирующихся более мощных установок, нацеленных на получение термоядерного зажигания. Кроме исследований по термоядерному синтезу, получение экспериментальной информации о процессах имплозии многопроволочных лайнеров важно для создания импульсных источников МРИ для многочисленных приложений, относящихся к физике ВПЭ.

Можно указать также ряд принципиальных физических вопросов, относящихся к более широкому кругу задач, в которые экспериментальные исследования процессов имплозии многопроволочных лайнеров могут вносить и вносят вклад. Сюда относятся вопросы рэлей-тейлоровской неустойчивости, различных МГД неустойчивостей, включая «сосисочную» и азимутально-несимметричные моды, и др.

Таким образом, тема данной диссертации и вопросы, которые в ней рассматриваются, безусловно, актуальны.

В диссертационной работе решается ряд важных для исследований физики имплозии многопроволочных плазменных лайнеров задач, среди которых можно отметить следующие:

- Экспериментально подтвержден сценарий динамики имплозии многопроволочных лайнеров, в основу которого положено представление о затянутом плазмообразовании с генерацией массы на радиусах расположения лайнеров. В некотором приближении этот сценарий можно представлять как одномерный (по радиусу) процесс;

- Исследованы интенсивности плазмообразования проволочныхборок, изготовленных из проволок (волокон) различных веществ (Al, нерж. сталь, Cu, Mo, W, капрон, лавсан, In, Sn и Bi). Получены количественные данные об интенсивности плазмообразования как функции тока и радиуса сборки;

- Исследована имплозия проволочных и волоконныхборок различных конструкций (одиночные, вложенные, конические и квазисферические) и проведено сравнение с результатами компьютерного моделирования;

- В исследованиях имплозии проволочных лайнеров не было выявлено существенной азимутальной асимметрии (которую, вообще говоря, можно было бы ожидать), и поэтому эту имплозию можно моделировать с помощью осесимметричных (r - z) МГД-расчетов;

- Измерены распределения азимутального магнитного поля по радиусу, азимуту и оси, оценены плотности тока в плазме многопроволочной сборки;

- Исследованы режимы имплозии плазмы проволочных и металлизированных волоконныхборок, в которых наличие отставшей плазмы на периферии создает условия для устойчивого сжатия, что можно использовать для профилирования импульса рентгеновского излучения.

Для решения этих задач разрабатывались новые типы плазменных нагрузок (лайнеры смешанного состава с заданными свойствами плазмообразования и динамикой сжатия). В экспериментах применялись современные диагностические средства. Часть диагностических методик развиты самим автором и его коллегами. Основное внимание уделено применению магнитозондовой методики измерения магнитных полей в плазме с высокой плотностью энергии (вплоть до 1 кДж/см^3), разработанной автором для условий эксперимента на установках типа Ангара-5-1 и установках типа плазменный фокус мегаджоульного уровня запасаемой энергии (ПФ-3 в НИЦ «Курчатовский институт», КПФ-4-Феникс в Абхазии и PF1000U в Польше). Впечатляет работа, проделанная автором для разработки магнитозондовой методики. В свое время мы пытались измерить магнитные поля в камере МАГО при близких плотностях энергии с помощью помещенных в плазму магнитных зондов. Хотя некоторые оценки динамики магнитных полей (не только азимутальных, но и полоидальных) были получены, однако точность этих оценок оставляла желать лучшего, да и возмущения плазмы представлялись большими. В итоге, мы отказались от этих измерений. Здесь же измерения были доведены до ума, зонды были миниатюризированы, так что не возмущали плазму, и методика оказалась важным источником информации. **Усовершенствование и разработка**

магнитозондовой методики (включая ее испытание на мощных электрофизических установках) является существенным достижением автора диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Все научные положения, выводы и рекомендации диссертации обоснованы. Работа основана на экспериментальной информации, полученной на различных электрофизических установках (Ангара-5-1, ПФ-3, КПФ-4-Феникс, PF-1000U) при помощи комплекса современных средств диагностики, и использует надежные опубликованные работы, включая самые современные.

Оценка новизны и достоверности.

Представленные в диссертации результаты являются новыми и оригинальными.

На установке Ангара-5-1 экспериментально измерены распределения азимутального магнитного поля по радиусу, азимуту и оси (чего ранее нигде не делалось) для вольфрамовых, алюминиевых, молибденовых и волоконных сборок с пространственным разрешением 0.5-1 мм (при общих сантиметровых масштабах) в процессе их имплозии. Для этого использованы разработанные автором уникальные микрозонды. Эта диагностика является весьма информативной для определения свойств плазменных потоков внутриборок. Кроме того, качественные электротехнические измерения, щелевые развертки изображения пинча, кадровые рентгеновские изображения сжимающейся плазмы, использование камер-обскур, спектральные измерения рентгеновского импульса, лазерное теневое зондирование с высоким разрешением и кадровые изображения плазмы с пространственным и спектральным разрешением позволили получить новую информацию об имплозии многопровлочных лайнеров и изучить структуру излучающей области сжатого состояния в цилиндрических и квазисферических сборках.

Новые экспериментальные данные об устойчивом сжатии плазмы внутреннего каскада вложенныхборок способствуют пониманию физики процессов: взаимодействия плазмы каскадов друг с другом, переключения тока на внутренний каскад, финального сжатия плазмы и образования компактного Z-

пинча с высокой мощностью излучения. Впервые для двухкаскадныхборок экспериментально продемонстрирована реализация нескольких режимов движения плазмы вложенныхборок в пространстве между каскадами (доальфвеновский, сверхальфвеновский и режим с формированием переходной области - ударной волны между каскадами). Показано, что реализация того или иного режима движения плазмы между каскадами зависит от перераспределения разрядного тока между каскадами, которое само зависит от отношения интенсивностей плазмообразования внешнего и внутреннего каскадов, что определяется веществом проволок (волокон). Используя информацию о динамике движения плазмы между каскадами, удалось получить импульсы МРИ амплитудой 4-5 ТВт и длительностью ~5 нс.

Достоверность результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей. Полученная величина интенсивности плазмообразования проволочныхборок в экспериментах на установке Ангара-5-1 подтверждена в экспериментах по токовой имплозии проволочныхборок в условиях плазмофокусного разряда на установке ПФ-3. Экспериментальные результаты, в основном, согласуются с результатами численного моделирования. Некоторые из важных результатов, полученных в диссертационной работе, были подтверждены результатами других исследовательских лабораторий в России и за рубежом: в США, КНР и Великобритании. Так, в настоящее время признано, что явление затянутого плазмообразования является общим для имплозии многопроволочных лайнеров, используемых для получения мощных импульсов МРИ на установках мегаамперного класса – Ангара-5-1, С-300 (Россия), MAGPIE (Англия), Z (США), PTS (Китай).

Диссертация К. Н. Митрофанова написана четким и понятным языком, она легко читается. Дополнительное удобство чтения обеспечивается подробными подписями под рисунками и объяснением в тексте. Автор демонстрирует хорошее понимание теоретических вопросов и умеет понятно и правильно их изложить и оставляет хорошее впечатление, как творческий и понимающий физик. Отличительной особенностью работы является стремление объяснить, хотя бы на

качественном уровне, полученные экспериментальные результаты, хотя это не всегда просто, так как имплозия многопроволочных лайнеров является турбулентным многомерным течением. Представляется, что огромный объем информации, содержащейся в диссертации, представляет интерес для большого круга физиков, и не только вовлеченных в исследования многопроволочных лайнеров. Поэтому хочется порекомендовать автору написать на основе диссертации или каких-то ее разделов монографию или одну или несколько обзорных статей.

В качестве замечаний к работе (а недостатки в любой творческой работе, тем более такой большой, неизбежны), можно отметить следующее:

1. Во Введении схему ИТС под названием “MagLIF” автор относит к схемам, предназначенным «для сжатия мишеней непрямого облучения». На самом деле в этой схеме (также как в предложенной ранее схеме МАГО, идеологически эквивалентной MagLIFy) не предполагается генерация мягкого рентгена и она не предполагается для сжатия мишеней непрямого облучения; термоядерное зажигание в ней должно происходить при непосредственном сжатии D-T топлива. Далее во Введении, когда говорится о содержании четвертой главы, снова упоминается MagLIF в контексте со вложенными проволочными сборками, хотя в MagLIFe лайнер сплошной, а не проволочный.
2. Во Введении при изложении содержания работы говорится, что в первой главе описаны технические параметры и характеристики электрофизической установки КПФ-4-Феникс. Однако этих сведений в первой главе найти не удалось.
3. В подразделе 1.1.4 в приведенной формуле, связывающей оптическую плотность и экспозицию H , не указаны единицы измерения H и не говорится, для какой пленки приведена эта формула. К тому же эта формула явно противоречит кривым рис. 5 б.
4. В квазиодномерных моделях плазмообразования (14) и (15) имеется некоторая неопределенность, которая далее становится более важной, когда речь пойдет о вложенных сборках. Автор пишет, что в этих формулах величина I является полным током по проволокам (или через проволочную сборку). Но в квазиодномерном подходе в стационарном разряде, если течение внутри сборки не успевает испытать отражение от оси, магнитное поле испытывает (как правильно пишет автор в разделе 4.1, см. также соотношение (30)) скачок, и внутри становится

равным $1/\sqrt{3}$ от наружного. Таким образом, на самом деле ток по проволочкам равен в этом случае $(1-1/\sqrt{3})$ от полного тока (или меньше при влиянии отражения от оси или внутреннего проволочного набора). Здесь, по-видимому, автор имеет в виду полный ток по системе. Однако после того, как на сборку придет отражение от оси, возникает вопрос, что будет означать величина I в моделях плазмообразования (14) и (15). Возможен, например, случай (в частности это может происходить для вложенныхборок в режиме II, который, как показано в подразделе 4.1.1, реализуется в экспериментах), когда ток через проволочки будет очень мал. Стоит ли тогда пользоваться формулами (14) и (15), где I – полный ток в системе? Может быть, стоило этот вопрос выяснить экспериментально?

5. Неясно, почему на графиках профилей магнитного поля рис. 92 нет скачка магнитного поля в $\sqrt{3}$ раз на радиусе генерации плазмы $r = 1$ см, как это следует из закона сохранения импульса (соотношение (30), а также раздел 4.1 и рис. 115 б), если, конечно, в расчетах нет магнитной диффузии. Если же она есть, то ее следовало бы указать, поскольку она была ответственна за размытие скачка.

6. В подразделе 4.2.3 сравниваются импульсы МРИ вложенных капрон-вольфрамовыхборок и одиночных проволочныхборок. По контексту этих сравнений и по представленному на рис. 134 а профилю излучения одиночной сборки делается вывод, что капрон-вольфрамовые сборки лучше для создания импульсов МРИ, и исследования надо продолжать в этом направлении. Однако максимальная мощность МРИ, полученная в одиночныхбороках, представленная на рис. 134 б, намного превышает максимальную мощность, полученную во вложенныхбороках (а также и представленную для одиночной сборки на рис. 134 а). Профиль импульса для одиночной сборки, представленный, например, на рис. 95, также показывает гораздо большую максимальную мощность МРИ, чем для вложенныхборок. Это никак не комментируется, а ведь, казалось бы, максимальная мощность – главный параметр для приложений проводимых исследований. Следующий вопрос, который здесь возникает, это то, как зависит величина импульсов МРИ от параметровборок, и насколько они стабильны от выстрела к выстрелу, и следовало бы информацию по этому поводу иметь в диссертации. С точки зрения физики, казалось бы также, что сосисочная неустойчивость Z-пинча может приводить к высокой концентрации энергии и соответственно к большой мощности МРИ. Во вложенныхбороках развитие этой

неустойчивости может быть затруднено, и они могут уступать одиночным сборкам по выходу МРИ.

7. Неясно, зачем в 3 D задаче подраздела 4.2.5 моделирование испарения проволок выполнялось по полуэмпирической модели с затянутым плазмообразованием. Казалось бы, бери и честно считай. Получается, что плазмообразование затягивается дважды: один раз по полуэмпирической модели (которая соответствует квазиодномерному сценарию и дает генерацию плазмы уже вниз по радиусу цилиндрической сборки), а второй раз уже в соответствии с абляцией проволочек. Неясно также, где происходило выделение этой массы, а также, какой ток подставлялся в формулу (15) (см. замечание 4).

8. В подразделе 5.3.2 сравниваются плотности потока энергии мощности и перенесенные через единицу поверхности энергии излучения (в терминологии автора плотности потока мощности и плотность потока энергии), полученные в экспериментах по сжатию вложенных квазисферических-цилиндрических и одиночныхборок. Однако не указано, как получены оценки этих величин: в каких направлениях, на каких расстояниях, при каких предположениях об источнике. Неясно, насколько полезна эта информация для приложений (например, для создания хольраума).

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Представленные в данной работе исследования являются актуальными и удовлетворяют требованиям научной новизны и достоверности. Полученные результаты работы уже используются и в дальнейшем могут быть использованы для проектирования новых экспериментов в области физики высоких плотностей энергии, в том числе на установке «Гамма» во ВНИИЭФ, расчета и проектирования крупных установок, генерирующих импульс рентгеновского излучения для ИТС и других приложений, проверки физических моделей и расчетных схем, описывающих сжатие проволочныхборок различных конструкций для создания излучателей с большим выходом рентгеновского излучения.

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Результаты диссертации прошли серьезную апробацию, будучи представлены на многих конференциях, и изложены в целом ряде публикаций и трудах международных конференций. По материалам диссертации опубликовано 37 статей, многие из

которых широко цитируются в мировой литературе. Автореферат соответствует содержанию диссертации, отвечает требованиям ВАК РФ.

Диссертационная работа и ее автореферат соответствуют всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям в соответствии с п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, **Митрофанов Константин Николаевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Отзыв составил официальный оппонент, главный научный сотрудник Научно-теоретического отдела фундаментальных исследований и перспективных наукоемких разработок Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), доктор физико-математических наук



Гаранин Сергей Флорович

« 13 » сентября 2019 г.

Адрес: 607188, г. Саров, Нижегородская обл., пр. Мира, д. 37, Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

тел.: (831-30) 431-97, e-mail: SFGaranin@vniief.ru

Подпись Гаранина С.Ф. заверяю

Ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», кандидат физ.-мат. наук



/ Хижняков В.В.