

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации ЧАЙКОВСКОГО Станислава Анатольевича «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

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 и термоядерных проектов, таких как МАГО-MTF и MagLIF; исследуются процессы, происходящие при ВПЭ, например, такие как взаимодействие мегагауссных магнитных полей с проводниками, изоляторами и плазмой. Поэтому задачи, которые рассматриваются в диссертации:

- использование трансформатора тока нагрузки для тераваттного генератора МИГ, позволяющее существенно увеличить ток в нагрузке генератора;
 - создание компактных установок для импульсной радиографии на основе X-пинча и исследование процессов, происходящих в X-пинче;
 - исследование сжатия двухкаскадных газовых лайнеров с целью получения интенсивных источников рентгеновского излучения на основе плазменного пинча;
 - исследование взаимодействия мегагауссного магнитного поля с проводниками из разных металлов;
- безусловно актуальны.

При решении этих задач автором получен целый ряд интересных и практически полезных результатов, к числу которых можно отнести

1. Демонстрация работы трансформатора тока нагрузки для сильноточного генератора МИГ, что может обеспечить полуторакратное увеличение тока в нагрузке.
2. Разработка малогабаритных импульсных генераторов тока для радиографической рентгеновской диагностики на основе X-пинча. Созданный радиографический комплекс позволяет получать теневые изображения объектов, просвечивая их мягким рентгеном (с широким спектром, простирающимся от 1 до 10 кэВ и выше) с наносекундным временным и микронным пространственным разрешением. Эти генераторы с нагрузкой в виде X-пинча используются в нескольких лабораториях, в том числе на генераторе «Ангара-5-1», для рентгеновского зондирования сжатия многопроволочных лайнеров.
3. Исследование параметров двухкаскадных и трехкаскадных лайнеров с целью нахождения максимального выхода мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов 1-3 кэВ. Показано, что, несмотря на потери энергии при соударении лайнеров, каскадирование лайнеров при оптимальном

соотношении радиусов и масс позволяет получить компактные, интенсивно излучающие в мягком рентгене пинчи. Автор разумно объясняет это тем, что возмущения внешнего лайнера, формирующиеся в результате развития рэлей-тейлоровской неустойчивости, не передаются (на самом деле, передаются но, возможно, не полностью) внутреннему лайнеру. Определенную стабилизирующую роль при этом, как указывает автор, может играть «прокладка» из азимутального магнитного поля, которая к тому же может способствовать упругости столкновения каскадов, хотя в полной упругости столкновения каскадов имеются сомнения. Для полной упругости столкновения при соизмеримых массах лайнеров энергия сжатого магнитного поля «прокладки» должна быть порядка массы лайнера. Магнитный же поток между лайнерами вряд велик, и поэтому, чтобы сжать этот поток до столь высоких энергий необходимо сжать его в очень тонкий зазор между лайнерами. Исследованная нами в свое время схема «магнитной подушки» показала, что даже для специально вводимого магнитного потока, упругое соударение лайнеров очень трудно обеспечить. Однако компромисс между потерями энергии при соударении каскадов и некоторой стабилизацией роста рэлей-тейлоровских возмущений вполне возможен, что показывают эксперименты с проволочными лайнерами в каскадной (nested) конфигурации. Поэтому опыт автора для каскадных газовых лайнеров и результаты оптимизации рентгеновского выхода являются полезными и пригодятся другим исследователям, работающим с такими лайнерами.

4. Изучение диффузии мегагауссного магнитного поля через трубчатые проводники, которое осуществлялось автором с помощью измерений напряжения на внутренней поверхности трубки. Результаты таких измерений могут иметь ценность для сравнения с результатами расчетов и определения данных по совокупности уравнение состояния/проводимость (в расчетах участвуют также, в основном, в плазменной области теплопроводность и перенос излучения). Такого рода расчеты использовались ранее для описания плазмообразования на поверхности проводников¹. Теперь же, используя эти измерения можно получать дополнительные данные. Что касается оценки глубины проникновения магнитного поля в проводник, она может быть полезной как оценка по порядку величины, хотя, конечно надо иметь в виду некоторую ее условность (численный коэффициент при ней автор определяет из сравнения с измеряемым максимумом производной напряжения внутри трубки, при некоторой зависимости магнитного поля от времени, так что и время, фигурирующее в оценке, и величина поля, условны). Столь же условен и введенный автором критерий поверхностного плазмообразования при диффузии мегагауссного поля. Он определяется автором по сигналу вакуумного рентгеновского диода для некоторой зависимости магнитного поля от времени, причем само поле на поверхности проводника определяется по измеренному току и начальному радиусу, который на самом деле в этот момент может уже измениться. Кроме того, как показывают эксперименты², начало плазмообразования и степень одномерности эксперимента при образовании плазмы очень чувствительны к тщательности эксперимента и таким деталям, как степень вакуумирования, форма подводящих электродов и тщательность их изготовления (иначе есть риск образования неоднородных

¹ S. F. Garanin, S. D. Kuznetsov, W. L. Atchison, et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, p. 1815, 2010.

² T. J. Awe, B. S. Bauer, S. Fuelling, and R. E. Siemon, *Phys. Rev. Lett.* vol. 104, p. 035001, 2010.

разрядов и соответствующей неоднородной генерации плазмы). Однако, поскольку зависимость происходящих процессов от величины магнитного поля весьма сильная, полученные автором результаты и эмпирический критерий плазмообразования, с некоторой точностью (точность здесь можно оценить, сравнивая величины магнитного поля, приводящие к «плазмообразованию» для алюминия, полученные автором 2.7 MG и в работе² 2.2 MG), правильны. Что касается экспериментов с двухслойными проводниками, то здесь надо отметить, что делается одно: сравниваются эксперименты со сплошным цилиндрическим титановым проводником и с двухслойным со вставкой из более проводящего материала - меди, и наличие этой вставки задерживает плазмообразование; а вывод сделан совсем другой: что внешний слой меньшей проводимости задерживает плазмообразование. Этот вывод, пожалуй, следует отнести к недостаткам диссертации.

В качестве замечаний к работе (а недостатки в любой творческой работе неизбежны), судя по автореферату, можно отметить еще следующее:

Название диссертации не вполне ясное и, кажется, не охватывает всю тематику диссертации (из 12 основных результатов, по крайней мере, 3 не относятся к формированию плазмы, да еще в диодах). Причины этого можно понять: автор занимается и техникой и экспериментом и диагностикой, да и проводит некоторые расчеты. Называть генераторы, имеющие характерные времена 0.1-1 мкс, наносекундными тоже кажется несколько странным.

В нескольких местах автореферата диссертации фигурирует утверждение, что сокращение времени сжатия плазмы является стабилизирующим фактором по отношению к развитию рэлей-тейлоровской (РТ) неустойчивости. Естественно, возникает вопрос: сокращение времени по сравнению с чем? Ведь степень развития РТ неустойчивости (например, интегральный инкремент) это безразмерная величина, и она должна определяться безразмерными комбинациями других величин. Но время – величина размерная, поэтому она должна входить в комбинации с какими-то другими величинами. Какими – неясно. Причем автор, например, правильно говорит, что важной для РТ неустойчивости величиной является степень радиального сжатия плазмы, т.е. безразмерная величина. Здесь же допущена несуразность. Хотя автор и экспериментатор, но в общих вещах не стоит путаться. Отчасти происхождение подобных несуразностей связано с отсутствием толковых обзоров по РТ неустойчивости.

В разделе «апробация работы» имеется неточность: конференция ICOPS в Санкт-Петербурге (да и вообще в России) никогда не проводилась.

В главе 4 имеется утверждение, что Ангара-5-1 является самым мощным сильноточным генератором в России (до 6 ТВт). Это не так. Мощность, передаваемая в нагрузку, для дисковых взрывомагнитных генераторов ВНИИЭФ с узлом обострения превышает 10 ТВт (энергия >10 МДж за время 1 мкс).

В главе 4 при получении теневого рентгеновского изображения многопроволочного лайнера в режиме работы установки Ангара-5-1 указано со ссылкой на рис. 10а, что длительность импульса излучения X-пинча составила 2 нс, тогда как на рис. 10а можно видеть импульс P_x , состоящий из нескольких пиков и длящийся в общей сложности десятки нс. Правда, на врезке виден только первый пик, длящийся 2 нс, а остальная часть импульса отрезана. Вероятно, все же, что импульс был не слишком длинный, иначе бы не удалось получить теневого рентгеновского

изображения периферийной части многопроволочной сборки (рис. 10б). Но какой был импульс на самом деле, неизвестно.

Приведенные замечания не меняют положительного впечатления от работы в целом.

Автореферат дает достаточное представление о полученных автором результатах, а также о структуре и содержании диссертации. В целом изложение хорошее и оставляет хорошее впечатление об авторе, как о творческом и понимающем физике.

Результаты диссертации прошли серьезную апробацию, будучи представлены на многих конференциях, и изложены в целом ряде публикаций и трудах международных конференций. По материалам диссертации опубликовано 15 статей, многие из которых уже широко цитируются в мировой литературе.

Таким образом, по актуальности темы, научной новизне, научной и практической значимости результатов, представленная работа отвечает требованиям ВАК. Считаю, что ее автор Чайковский Станислав Анатольевич достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Начальник лаборатории Научно-теоретического отдела фундаментальных исследований и перспективных наукоемких разработок
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

доктор физ.-мат. наук
С. Ф. Гаранин

 14.06.2016

Сергей Флорович Гаранин

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

Лаборатория 87/2 Научно-теоретического отдела фундаментальных исследований и перспективных наукоемких разработок

Россия, 607188, г. Саров, пр. Мира, д. 37

E-mail: sfgar@vniief.ru

Тел. (83130) 431-97

Подпись начальника лаборатории Научно-теоретического отдела фундаментальных исследований и перспективных наукоемких разработок

С. Ф. Гаранина заверяю:

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

В. В. Хижняков

