ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 14 октября 2026 г. (протокол № 8)

Защита диссертации Волкова Георгия Степановича
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
«Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности»
Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Москва – 2026

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).
Протокол № 8 от 14 октября 2026 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 25 человек, из них 11 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) академик РАН д.ф.-м.н., профессор Петров Олег Федорович.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев Алексей Владимирович

1.	Петров О.Ф.	д.ф.-м.н. профессор, академик РАН	1.3.9, техн. Науки	Присутствует
2.	Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат. науки	Отсутствует
3.	Храпак А.Г.	д.ф.-м.н. профессор	1.3.14, физ.-мат. науки	Присутствует
4.	Тимофеев А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат. науки	Присутствует
5.	Агранат М.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
6.	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9, физ.-мат. науки	Присутствует
7.	Апфельбаум Е.М.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
8.	Беляев И.А.	к.т.н.	1.3.14, физ.-мат. науки	Присутствует
9.	Вараксин. А.Ю.	д.ф.-м.н. профессор, академик РАН	1.3.14, физ.-мат. науки	Присутствует
10.	Васильев М.Н.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Подключен
11.	Васильем М.М.	д.т.н., профессор	1.3.14, техн. науки	Присутствует
12.	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, техн. науки	Присутствует
13.	Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Отсутствует
14.	Голуб В.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14, техн. науки	Присутствует
15.	Грязнов В.К.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14, физ.-мат. науки	Подключен
16.	Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
17.	Еремин А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14,	Присутствует

			физ.-мат. науки	
18.	Зеленер Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
19.	Зобнин А.В.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
20.	Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат. науки	Подключен
21.	Киверин А.Д.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14, физ.-мат. науки	Присутствует
22.	Лагарьков А.Н.	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН	1.3.9, физ.-мат. науки	Отсутствует
23.	Левашов П.Р.	к.ф.-м.н.	1.3.14, физ.-мат. науки	Присутствует
24.	Ломоносов И.В.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. профессор	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
25.	Норман Г.Э.	д.ф.-м.н. профессор	1.3.9, физ.-мат. науки	Присутствует
26.	Пикуз С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат. науки	Подключен
27.	Савватимский А.И.	д.т.наук	1.3.14, техн. науки	Подключен
28.	Стегайлов В.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Подключен
29.	Трухачев Ф.М.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
30.	Филиппов А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат. науки	Присутствует
31.	Яньков Г.Г.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14, физ.-мат. науки	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника Отделения физики токамаков реакторов и токонесущей плазмы АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» Волкова Георгия Степановича на тему «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в Отделения физики токамаков реакторов и токонесущей плазмы АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, дом 12, triniti.ru).

Официальные оппоненты:

- главный научный сотрудник отдела физики высоких плотностей энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53, стр.4, тел.: +7(495)135-4264, lebedev.ru, e-mail: postmaster@lebedev.ru) доктор физико-математических наук Пикуз Сергей Александрович;
- заведующий кафедрой общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д.1, тел.; +7(395)252-1931, isu.ru, e-mail: office@admin.isu.ru) доктор физико- математических наук Паперный Виктор Львович;
- руководитель отдела физики высоких плотностей энергий Федерального государственного унитарного предприятия «Российского федерального ядерного центра - Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики» (607188, Нижегородская обл., г. Саров, проспект Мира, д.37, тел: +7(831)302-48-02, vniief.ru, e-mail: staff@vniief.ru) доктор физико-математических наук Ивановский Андрей Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3, (382)-249-1544, hcei.tsc.ru, e-mail: contact@hcei.tsc.ru).

На заседании присутствуют официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Пикуз С.А. (удаленное подключение, д.ф.-м.н. Ивановский А.В., д.ф.-м.н. Паперный В.Л.

СТЕНОГРАММА

Председатель
Добрый день, уважаемые члены совета и все присутствующие. Мы начинаем заседание нашего диссертационного совета. На повестке дня защита диссертации **Волкова Георгия Степановича** на тему: **«Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности»,** представленной на соискание ученой степени **доктора физико-математических наук** по специальности **1.3.9. -физика плазмы. Слово предоставляется ученому секретарю, который** ознакомит нас сейчас необходимыми документами.

Ученый секретарь:
(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель:
Есть вопросы? Требуются уточнения? Если нет, тогда давайте перейдем к существу дела. Георгий Степанович, пожалуйста, вам слово для изложения основных положений диссертации

Волков Г.С.:
Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Волкова Г.С. имеется в деле).

Председатель:
Спасибо, Георгий Степанович. Теперь переходим к обсуждению. Я хотел бы задать несколько вопросов. Вначале вопрос общего характера. Где, в каких местах еще существуют установки, сравнимые с Ангарой-5-1? Вы здесь конкурируете или... вне конкуренции находите.

Волков Г.С.:
Самая большая, установка (США) Z, ток 25 мегампер, электрическая мощность порядка 80 таррават. Ну, давайте я сейчас вернусь немножко в начало доклада. Тут есть про параметры этой установки немножко. Мы как бы на результаты, полученные на Z ориентируемся. Какой-то флаг должен быть. Значит, на этой установке получена мощность мягкого рентгеновского получения рекордная на настоящее время. Ну, видите, значит, если у нас, в районе 10 ТВ, то у них там 330 ТВ. Ну, иногда называются цифра 420 ТВ. На самом деле, измерения проводились тоже с ВРД, потом фольговые резистивные балометры и с помощью пин диодов за обскурами. Самое надежное измерение – это пин диоды за обскурой. И, соответственно, измерение фольговым резистивным болометром. По ВРД у них излучения получается заметно больше. Они не доверяют измерениям по ВРД детекторам. Всего у них 330 тараватт мощности излучения, энергия 1,5 мегаджоуля, ну и время 10 нс. Мощность электрическая порядка 70 тараватт, 3 мегавольта, 25 мегаампер, длительность импульса тока 90 нс. Ну, все процессы, которые они там исследуют, кроме облучения мишени, мы можем моделировать. В этом смысле наша установка удобна, конечно. Ну, еще там у китайцев есть 7-мегамперная установка PTS. Они, конечно, уступают американцами, но пытаются повторить эксперименты, обжать даже мишени. Пока результатов по генерации нейтронов у них нет.

Председатель:

Георгий Степанович, можно вернуться к... У вас было несколько результатов со спектрами в ангстремном диапазоне. Здесь у меня два вопроса. Первый. Какое здесь разрешение? И второй вопрос, он связан с пространственным разрешением. Тут понятно, что если у вас пространственного разрешения недостаточно, у вас может получиться некое соединение по температуре, поскольку в силу неоднородности, по-видимому, градиенты могут быть очень большие. Вот два вопроса.

Волков Г.С.:
Значит, по измерению температуры, спектр разрешения по пространству, по длине пинча. Область, которая имеет высокую температуру, из которой регистрируется излучение линейчатое для плазмы алюминия, составляет где-то всего четверть длины пинча, у остальных областей температура ниже. То есть на самом деле четвертая часть массы пинча из алюминия имеет высокую температуру. И она обеспечивает вот это излучение. На уровне температуры 500-600 эВ. Остальные области чуть поменьше имеют температуру. Здесь большая часть спектром снята без пространственного разрешения, здесь интегральный спектр по времени. Но он снят не на пленку, а на ПЗС-линейку, которая абсолютно калибрована, поэтому измерение там достаточно точные. И относительные измерения спектральной интенсивности проводились с ПЗС линейкой. Линейки мы сами калибровали на стендах. Есть соответствующая работа с подробной характеристикой линейки ПЗС для этого эксперимента

Председатель:
Хорошо, Георгий Степанович, спасибо. Так, вопросы, пожалуйста, еще. Так, пожалуйста, Евгений Михайлович.

Апфельбаум Е.М.:
Скажите, пожалуйста, вот я видел у вас в экспериментах, получало значение температуры в сотни электронов вольт, а какая погрешность?

Волков Г.С.:
Порядка 30-40 электронов вольт.

Апфельбаум Е.М.:
Это меньше 10%.

Волков Г.С.:
Да, где-то в этом районе. Потом еще мы сравнивали. На самом деле тут же важен вклад оптической толщины. И, соответственно, как вы будете считать вклад оптической толщины, от этого тоже зависит. Ну, получается, в районе 30-40 эВ.

Председатель:
Так, вопросы, пожалуйста, Павел Эмирович.

Левашов П.Р.:
Вот вы рассказывали про лайнеры с содержанием алюминия высоким вольфрама до 20%. И говорили, что мощность излучения получается такая же, как и вольфрамом.

Волков Г.С.:
Близкая, да.

Левашов П.Р.:

Близкая, да. Вот есть смысл оптимизировать дальше лайнеры, использовать более легкий еще металл, чем алюминий? Или увеличение мощности не произойдет? Это оптимум.

Волков Г.С.:
Сейчас пока трудно сказать. Наверное, надо проводить опыты. Но важен тот факт, что вы получаете практически такую же мощность, когда при содержании излучающего элемента вольфрама всего составляет четвертую часть от полной массы. но это не сборки, если бы был полностью вольфрамом, здесь вольфрам составляет всего 25%. И главный элемент, на самом деле, увеличение прозрачности и сброс энергии на мишень. То есть вам проще, вы больше сбрасываете на мишень Может быть, у вас мощность будет меньше генерироваться немножко. но вы там в разы больше сбрасываете на мишень за счет больше оптической прозрачности. Это тоже проблема такая стоит.

Левашов П.Р.:
Вы же объясняете эффект тем, что у вас скорость движения ионов высокая. Если они будут легче, они, наверное, еще быстрее

Волков Г.С.:
Нет, вся энергия в ионах, вы уже спросили, кинетическая энергия в ионах, вся энергия в ионах, ну можно поставить ее более легкую, не стали минимизировать, этот эффект тоже будет проявляться, возможно, более сильнее

Председатель:
Пожалуйста. Алексей Дмитриевич.

Киверин А.Д.:
Георгий Степанович, по этому слайду вопрос возник, который сейчас продемонстрирован и по следующему. Просто вот здесь видно, что у вас энергетика для 14%, и 27%. Она одинаково указана. А в выводах сказано, что аналогия по энергетике достигается при 25-30%.

Волков Г.С.:
Нет, длительность сокращается. Мощность растет. Там, видите, длительность излучение, здесь 15 нс, а здесь 11 нс.

Киверин А.Д.:
15 нс это уже большая.

Волков Г.С.:
Ну, это практически мало отличается от 20 нс, чисто алюминиевый. А здесь, видите, уже 11 нс, практически в 2 раза.

Киверин А.Д.:
Ну, то есть все-таки не по энергетике, а по мощности. По мощности. Еще один вопрос по первой задаче хотел уточнить. У вас там пена использовалась при обжатии, а при этом вы говорили про ударную волну, а что есть ударная волна в этой пене? Или вам не нужна ударная волна?

Волков Г.С.:
Нет, наоборот, она как раз, основное, это излучение ударной волны, это сильно излучающая ударная волна при ударе по пене. Она как раз и заполняет объем хольраума. В этом задача стоит – разогнать, ударить и в ударной волне получить высокую

температуру и высокую мощность излучения. Сильно излучающая ударная волна. Поэтому материал хольраума должен содержать элементы с большим атомным номером, чтобы излучения было много

Киверин А.Д.:
То есть вы сжимаете пену и получается… Разгоняем оболочку и ударяем.

Волков Г.С.:
Получается излучающая ударная волна.

Киверин А.Д.:
Хорошо, я понял. Спасибо.

Председатель
Так, хорошо. Есть ли еще вопросы?

Амиров Р.Х.:
Не прозвучала все-таки цифра. Какое КПД у вас преобразование энергии из накопителя в рентген максимально? Какой результат достигнут?

Волков Г.С.:
Ну, если брать формирующие линии, там 600 кДж в формирующих линиях. то, соответственно, получается в районе 15%.

Амиров Р.Х.:
И второй вопрос, как раз вот картинка сейчас висит. Вы там использовали напыление висмута для улучшения характеристик, я так понял. На пальцах можно объяснить роль этой тонкой пленки?

Волков Г.С.:
В смысле напыление висмута?

Амиров Р.Х.:
В чем, так сказать, идея на пальцах?

Волков Г.С.:
Задержать и сжать вот этой части оболочки попозже. Тогда вы можете менять динамику излучения такой нагрузки. Вы можете образовать два пинча. Сначала внешняя оболочка не подойдет и не ударит по внутренней оболочке, не будет никакого излучения. Излучение будет только от приэлектродных пинчей. И это будет режим статического хольраума. Вы в этой схеме реализуете. А если вы, значит, эта добавленная масса маленькая или не будет, у вас на самом деле получается укороченный динамический хольраум. Вы просто регулируете время задержки. Чем больше массы, тем дольше она разгоняется и двигается.

Амиров Р.Х.:
И последний вопрос. Диаграмма направленности рентгеновского звучания – это все-таки как бы от цилиндрического источника или от точного? Что можно сказать? Или более сложная картина?

Волков Г.С.:

Более сложная, конечно. Потому что у вас цилиндр образуется. Поэтому основное излучение регистрируется сбоку, самое мощное излучение. Ну и сверху заметную часть составляет от излучения сбоку. Чтобы это было одинаково, мощность излучения сверху сбоку, это нужно сделать такой сферически симметричный источник. Такой источник на Ангаре был сделан при сжатии. не при моем участии, при сжатии квазисферических многопроволочных сборов. Действительно получался такой излучатель в виде шарика, и он равномерно излучал вверх и во все стороны, как в четыре пи. Здесь не равномерно, здесь больше в сбоку излучается.

Амиров Р.Х.:
Хорошо, спасибо.

Председатель:
Алексей Юрьевич, пожалуйста.

Вараксин А.Ю.:
Георгий Степанович, вот у вас среди выводов... фигурирует значение коэффициента полезного КПД преобразования запасенной энергии в конденсаторе в энергию ультрафиолета.

Волков Г.С.:
Да, да.

Вараксин А.Ю.:
Там присутствуют цифры. Вот поясните, значит, является ли КПД целевым каким-либо параметром, да, что было, да у вас какие были значения, да, и что там в перспективе как-то мы можем рассчитывать, да, на что-то, учитывая название вашего института.

Волков Г.С.:
Значит, как эта вообще задача возникает? Скажем, возьмем флэшбот, на котором получен наибольший КПД. Во время, до еще сжатия пинчей, была такая мощная программа в США, термояд на легких ионах. То есть они хотели получить, то есть наоборот. Сейчас здесь большой ток , относительно небольшое напряжение. Они на PBFA-2 хотели получить легкие ионы, лития, в диоде, в ионном диоде. с энергией 30-40 МВ ускорить их и получить такие же мощности на уровне 100 ТВ. Чем это удобно? Такой пучок легких ионов, так как они же гораздо тяжелее, чем электроны, то для них ток альвена большой, и их можно транспортировать без проблем по магнитному полю к мишени. И легко считается энергией, которая вкладывается от этих ионов в мишени. Пробег маленький. То есть проблем никаких не было бы тогда. И для того, чтобы получить ионы, они облучали анодную поверхность ВУФ излучением от пробоя изолятора по поверхности диэлектрики, вот они и брали флешбоды, и, соответственно, получали только полмегампера ионный ток Эту программу потом так закрыли. Ну, не получилось больше, чем полмегампера. большие токи получить, были проблемы. И КПД, которые они называют для флешбодов по ВУФ излучению это тоже порядка 3%. То есть если вот так сравнивать, чем наша работа как бы, может быть, хороша, что одной методикой разные геометрии посмотрели. Хотя результат в неком смысле тривиальный. Лучше вы согласуете волновое сопротивление контура, с сопротивлением нагрузки, тем больше вы вкладываете. Это как бы вещь такая известная. Но подтверждается американским результатом.

Беляев И.А.:

Георгий Статанович, у вас слайд был, где вы сравнивали методы измерения термопарными калориметрами. Заявленная точность 20% для оборудования. Некоторые точки сильно выбиваются.

Волков Г.С.:
Одна точка.

Беляев И.А.:
Это некорректный эксперимент?

Волков Г.С.:
Могут прилетать металлические части. Ну, разлетаются микрочастицы и попадают на калориметр. Такое возможно. Это, правда, редкие вещи. Ну, правда, недавно мы и разбили его, кстати. Состоял лет 20, и потом прилетела железка. Он правда показал сигнал, но...

Беляев И.А.:
В первую очередь, какой метод измерения лучше?

Волков Г.С.:
Самое главное, это самое, во-первых, пропорциональность, во-вторых... калибровка абсолютно есть. Из-третьих, сбоку при измерении оси пинча энергия, которая переносится потоками плазмы очень маленькая. Мы измеряем ее не только радиационным калориметром, но и ионными датчиками. Там плазма очень низкой плотности, но с теми же скоростями, как и летит вдоль оси. То есть это может быть вклад микрочастиц, но это редко наблюдается.

Председатель:
Есть ли еще вопросы к Георгию Степановичу? Если вопросов нет, спасибо. Мы переходим к следующему пункту. Сейчас слово предоставляется Алексею Владимировичу.

Ученый секретарь:
Дорогие коллеги, в деле имеется несколько документов. Начнем с заключения организации, где выполнялась диссертация. Это Государственный научный центр Российской Федерации «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований». Заключение достаточно объемное. В заключении имеется классический разбор диссертации, отмечена новизна, значимость, личный вклад автора и так далее. Если позволите, я не буду полностью зачитывать все, остановлюсь на основных моментах как в заключении организации, так и в последующих отзывах. В заключении организации сделан вывод, что представленная диссертация: «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона ответственности» Волкова Георгия Степановича, рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математической науки по специальности 1.3.9 «Физика плазмы». Заключение принято на заседании научного совета АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, подписал ученый секретарь, Александр Александрович Ежов, и утвердил председатель научного совета, профессор Черковец Владимир Евгеньевич.

Кроме того, в деле имеется отзыв ведущей организации, это Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН. Отзыв утвержден в Врио директора доктором технических наук Жирлицыным Андреем Алексеевичем и составлен главным научным сотрудником отдела высоких плотностей энергии доктором физ.-мат. наук Орешкиным Владимиром Ивановичем. Если позволите, я опять же не буду зачитывать весь подробный отзыв, потому что мы диссертацию только что заслушали. Остановлюсь на замечаниях. Замечания по диссертационной работе:

1. Встречаются фразы, структура которых режет слух. Например, 23 страница раздел «Цель работы и задачи исследований». Предложение: «В качестве задач исследования рассматриваются задачи, связанные с применением сильноточных излучающих Z - пинчей для задач инерциального термоядерного синтеза» 3 одинаковых слова в одном предложении — это перебор. В тексте диссертации есть некоторые неточности (опечатки).

2. В списке литературы (ссылка [15]) неверно указан год публикации. Конференция проходила в 2004 году, а публикация материалов конференции состоялась в 2005 году.

3. Текст на странице 40: «Высокая отражающая способность слюды в первом, втором и третьем порядках [62] расширяет эффективный наблюдаемый спектральный диапазон»;. Кристалл слюды имеет высокую отражающую способность только в нечетных порядках. В цитируемой статье авторы используют для регистрации 1 и 3 порядки.

4. Стр. 51. «Проверка работы быстрого радиационного калориметра проводилась на установке «Ангара-5-1» [69].» А основное использование после проверки где проводилось?

5. В разделе 1.2. Стр.55. Подписи к Рис.1.14. Схема измерения потока плазмы. Сделаны пояснения до третьего элемента на рисунке, оставлена в конце предложения запятая и остальные элементы перечислить забыли.

6. В этом же разделе автор приводит много данных по скорости, времени распространения плазменного потока, дает величину скорости ионов ~ 2·10 7 см/с, но ни слова о том, что за вещество? Из чего состоит исследуемая плазма? Поэтому невозможно оценить за счет каких процессов получается такая скорость разлёта плазмы.

7. Основные выводы по главе 1. Первое предложение: «Автором разработаны современные методики измерений мягкого рентгеновского излучения плотной высокотемпературной плазмы и параметров плазменных потоков сильноточных Z - пинчей.». Возможно, автор хотел сказать что-то типа: «Автором разработаны ряд методик измерений мягкого рентгеновского излучения плотной высокотемпературной плазмы и параметров плазменных потоков сильноточных Z – пинчей отвечающих современным требованиям»? Вроде тоже самое, а смысл всё-таки другой.

8. На странице 90 написано: «Пространственное разрешение при просвечивании струи на пленку определялось размером источника (~2 мм) и геометрией эксперимента и составило ~ 0.2 мм по радиусу струи и 0.4 мм по ее высоте». Как при размере источника зондирующего излучения 2 мм можно получить пространственное разрешение в 0.2 мм?

Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на моей общей положительной оценке данной диссертационной работы. Моей, видимо, подразумевается организацией. Заключение организации: Диссертационная работа Волкова Георгия Степановича полностью отвечает критериям установленного пункта 9 положения о порядке присуждения степеней. Соответствует заявленной специальности 1.3.9 физика плазмы. Диссертационная работа обсуждена и одобрена на открытом экспертном научном семинаре отдела высоких плотностей энергии Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН.

Кроме того, в деле у нас имеется еще три отзыва на автореферат. Все положительные, но с замечаниями. Если позволите, я не буду зачитывать описание работ, потому что они повторяются, мы только что работу заслушали. И буду пропускать формальные слова о соответствии пункта 9 Положения присуждения ученых степеней. И о том, что автор заслуживает присуждение ученой степени, потому что повторяется по всем отзывам.

Первый отзыв на автореферат получен от Алексея Павловича Лотоцкого, доктора физ.-мат. наук из ГНЦ РФ ТРИНИТИ, отделения физики токамаков, реакторов и токонесущей плазмы, ведущий научный сотрудник. Отзыв положительный, рецензент отметил следующие недостатки по тексту:

- на стр. 7 в фрагменте «…имеющей низкую начальную индуктивной, на внутренний плотный и компактный «файбер»….» нарушено согласование; - на стр.11 в этой же фразе ошибка повторяется;

- на стр.7 «Самостоятельной задачей является получения высокого выхода….» аналогично предыдущему замечанию;

- на стр. 18 Рис.1 в автореферате требует более детального описания, т.к. собственно пинч, являющийся главным элементом, не прорисован, а электрическая цепь установки прослеживается с трудом;

- в разделе «На защиту выносятся…» п.1 и п. 8 трудночитаемые, следовало бы каждый разбить на отдельные предложения;

- на стр.25 на рис.3 и 4 надо было бы указать направления протекания токов, ибо «полоски металла» указанные в подписи к рис.4 воспринимаются неоднозначно.

Напоминаю отзыв положительный, как и все остальные.

Следующий отзыв на автореферат получен от доктора физ.-мат. наук, ведущего научного сотрудника отделения физики реакторов токамаков Курчатовского института Елены Олеговны Бароновой:

- в качестве замечания можно указать, что в автореферате излишне конспективно изложен эксперимент с взаимодействием двухкаскадной сборки с эффектом влияния увеличения роли магнитного поля на повышение мощности излучения образующегося пинча.

- также в автореферате желательно было бы привести критерий зажигания мишени с достижением положительного термоядерного выхода.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Следующий, третий и последний отзыв на автореферат получен от кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории детекторостроения физических измерений ВНИИА им. Духова Михаила Анатольевича Бублика:

- в качестве замечания можно указать, что в автореферате довольно кратко изложен эксперимент по взаимодействию сборки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада. Увеличение полной мощности пинча в этом случае объясняется сжатием магнитного потока внутреннего каскада. В автореферате было бы полезно указать, как этот эффект зависит от параметра внутреннего каскада.

- также было бы полезно сравнить преимущества и недостатки измерения выходов излучения предполагаемого в работе быстрым фольговым радиационным калориметром по сравнению с резистивными болометрами. Сделанные замечания не влияют на общую положительную работу. Как в остальных отзывах указано соответствие требованиям пункта 9 положения присуждения степеней. о том, что автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Председатель:
Георгий Степанович, у нас теперь слово для ответа на замечания поступившие. Пожалуйста.

Волков Г.С.:
Давайте с последнего, что в голове осталось сейчас.

Значит, по поводу замечания Бублика. Сравнение преимуществ фольговых радиационных калориметров и фольговых болометров резистивных можно сказать следующее. Основа преимущества фольговых резистивных болометров — время. Конечно, наносекундное временное разрешение. Измерение мощности — это принципиально. Если взять фольговые резистивные болометры, ну, те же, допустим, фольга из никеля толщиной 2 мкм. Базовый сигнал при прогреве фольги, напряжение на ней порядка 15 вольт, а сигнал от нагрева фольги излучением, дополнительный сигнал, который регистрирует на уровне 15 мВ. То есть отношение большое, очень маленький

сигнал на фоне очень большого базового сигнала, который он снимал. И такой резистивный болометр, им нельзя изменить потоки плазмы, энергию переносимую плазменными потоками. Ну и соответственно, традиционный радиационный калориметр мы проигрываем во времени, временное разрешение, там предельное где-то у нас получается, определяется прогревом фольги и полосой усилителя, но можно сделать там 0,7 микросекунды, не лучше. Основное достоинство здесь то, что базовый сигнал, на который накладывается сигнал излучения, составляет вольт, а сигнал, который мы регистрируем, это 150-200 мВ. Линейный сигнал, проверенная калибровка. И, соответственно, при расположении, так как чувствительность высокая, можно поставить достаточно далеко. 2 метра мы ставили, и можно разделить по времени прилет плазмы и излучения. Поэтому можно измерять отдельное излучение, и энергию переносимое плазменным потоком. То есть есть плюсы, есть минусы.

По поводу замечания, что не указаны параметры, какие параметры внутренней сборки, для того, чтобы в схеме совершенную роль магнитного поля тока внутреннего каскада. Когда массу внутренней сборки мы увеличиваем, и она становится равной массе внешней сборки, когда они равны, это наиболее оптимальный режим. При этом хорошо передается скорость, импульс сразу на внутреннюю сборку через магнитное поле, и реализуется высокая мощность излучения. При увеличении массы внутренней сборки скажем, от половины массы внешней сборки до равной массы сборки, мощность излучения растет, что говорит о том, что излучение регистрируется в первом пике от сжатия внутренней сборки. Об этом и замечание. Ну, привести было бы нужно, конечно. Я с ним согласен.

По поводу замечаний Бароновой, Елены Викторовны, то же самое. Можно было подробнее писать этот эксперимент. Там слишком кратко, наверное, действительно. Ну и по поводу схемы условий зажигания термоядерной мишени. Сейчас как бы часто приводят обобщенные критерии зажигания. Энергия, вложенная в мишень. без учета энергии альфа-частиц от термоядерной реакции вложенной мишени, должна быть равна энергии вложенной от альфа-частиц при сжатии термоядерной мишени. То есть энергию, вкладываемую от альфа-частиц, она сравнима с энергией, вложенной в топливо, без учета энергии продуктов реакции. Такой обобщенный критерий сейчас используется.

Ну, по поводу замечаний Лотоцкого, действительно. Ну, если там по поводу схемы, что там схема. Схема там простая, конденсатор, разрядник. Ну, по поводу, конечно, согласования грамматического не поспоришь. Хотя вроде смотришь внимательно. Поэтому, конечно, нужно согласовывать. Схема, которая показана, рисунок 1, детальное описание. Ну, в принципе, основное внимание уделялось описанию разрядника и измерениям способа инжекции газов, зазор катод -анод, и, соответственно, измерения напряжения и тока. Соответственно, там датчики напряжения, делитель и петля. Ну, а схема сама, она простая, там разрядник, емкость и пинч.

Значит, по поводу страниц 35 и рис.4, да, ну, действительно, можно указать, было бы протекание токов. Было бы понятнее. Полоски металла, там не полоски металла, они считаются отдельными шестиугольничками. Поэтому, может быть, не совсем корректное указание.

От организации замечания. Первая фраза «Режет слух» специально следил, могу вам честно признаться, специально следил, чтобы повторений не было. Где-то удалось убрать, а где-то проскочил. Не хватило внимательности, наверное.

Ну, по поводу замечания списка литературы, но конференция была в 2004 году, наверное, поэтому. Хотя материалы этой конференции у меня есть. Издание 2005 год. Правильное замечание.

Третье замечание. Высокие отражающие способности слюды. Можно, так сказать, ссылаться, конечно, на эти работы, где нечетные порядки у слюды, большие коэффициенты отражения. Но в эксперименте мы регистрировали интенсивный спектр линейчатого излучения и во втором порядке, начиная с первых экспериментов на Ангаре.

Ну и вот в том эксперименте, который описан с композитными Z- пинчами. Второй порядок используется для регистрации излучения калия, хлора и аргона. Достаточно большой коэффициент отражения, и для него есть расчетные данные. Коэффициент может быть не такой большой, как в нечетных порядках, но достаточно большой, чтобы его использовать без проблем в эксперименте.

Фраза четвертая, проверка работы быстро-радиационного... калориметра проводилась на установке. Ну, так получилось. Действительно, как бы на стенде отработать не удалось. На отдельном стенде у нас газовый Z-пинч. И поэтому первые измерения, как бы, они были проверочные. Получалось, как бы, измерение вместе с проверкой. Основная задача была борьба с наводками. Мы пытались ставить фэу. регистрировать сигнал без фотодиодов и усилителя. Но долго боролись с наводкой, пока не перешли на фотодиоды. Поэтому так получилось, что негде было проверять. Фактически первая проверка прошла в таком рабочем, боевом режиме. Но лучше, конечно, отрабатывать это на стендах. Схема измерения ионным датчиком потока плазмы, то, что там не приведено, да, вот она, эта схема, там не приведен был стакан четвертый. Да, тут два электрода плюс-минус, напряжение, коллиматор, магнит он рисован, вот исчезла четвертая и пятая позиция, хотя рисунки есть, во всяких презентациях, ну, ссылка на позицию четыре, на стакан есть, в самом тексте дальше идет. А вот про магниты, конечно, там куда-то выпало. Это правильное замечание.

Дальше по поводу данных по скорости. Да, скорость измерялась по времени от фотопика и с учетом расстояния. Время и расстояние, на котором располагался датчик, измерялись скоростью плазмы. Здесь у нас как бы электроны и ионы регистрировались. Плюс-минус, симметрично питание датчика, чтобы... плазма залетала в эквипотенциальное пространство без напряжения. Здесь электронный сигнал, здесь ионный сигнал внизу. Ну и мы думали, что если мы ионный и электронный сигнал снимем, мы получим заряд ионов, средний из отношения этих токов. Но не получилось. Из-за того, что ионы били по поверхности, ударяли по поверхности электрода под небольшим углом, отклоняясь электрическим полем конденсатором, вторичная высокая ионная электронная эмиссия, и ток электронный был очень большой. То есть скоростью мы измеряли. Главная нам была скорость для того, чтобы заявить эту скорость при измерениях радиационного калориметра. То есть скорость такая, что мы плазму отделяем от излучения. Это главная задача была этих ионных измерений. Ну, если взять энергию измеренную радиационным калориметром при измерениях сверху по отношению к пинчу, со стороны анода, временное разрешение уже позволяет измерять плотность энергии потока. И это, если взять эту плотность потока, и плотность потока, которая измерена с помощью датчика плазмы, ионный ток, оказывается, значит, они будут соответствовать, если средний заряд ионов порядка 5-6. Скорее всего, это ионы вольфрама, но мы как бы на это внимание не заостряли. Главное – ограничение, что они достаточно быстрые, плазменные потоки, и можно отделить их от излучения.

Замечание седьмое – это разработанные современные методики. Это действительно какой-то клише, какой-то взятый, какой-то текст. Наверное, правильнее было бы сказать, что современные методики измерений были адаптированы для условий работы на установке с высоким уровнем электромагнитных наводок. Это, кстати, в диссертации отмечено, какие были усилия затрачены на то, чтобы бороться, чтобы электромагнитные наводки с высоким уровнем не мешали измерениям. И используем ПЗС линейки, используем других датчиков, методик. Борьба с наводкой – это по радиационному калориметру. Большая работа была проделана, чтобы избавиться от наводки.

По поводу пространственное разрешение при просвещении струи. Речь идет о просвечивании газовой струи рентгеном. Газовая струя просвечивалась рентгеновским излучением от источника. электронный пучок, короткий, 80 нс. с инергией 150 кэВ, из по мишени, из алиминиевого анод, и это излучение, характеристическое линейное излучение алюминия, в данном случае 1,5 кэВ используется для просвечивания газовой струи из

ксенона. Соответственно, источник имел размер 2 мм, но когда мы смотрим излучение на мишень под углом 30 градусов, один из размеров становится 1 мм, по горизонтали. Теперь мы газовую струю приближаем к пленке. Фотографию снимали. Приближаем к пленке. Фактически такая контактная фотография. Можете фотопленку наложить на фотобумагу, посветить параллельным пучком, и вы получите все фотографии. Если вы возьмете со стороны регистратора пленки, нарисуйте телесный угол, на источник излучения, то этот телесный угол пройдет по диагностируемой струе, которую мы измеряли в узком телесном угле. Как раз он вырезается из 2 мм. 0,4мм по высоте и 0.2мм по радиусу. За счет геометрии

Председатель:
Хорошо. Спасибо. Теперь мы переходим к заслушиванию официальных оппонентов слово предоставляется официальному оппоненту доктору физико-математических наук Пикузу Сергею Александровичу. ФИАН имени Лебедева.

Пикуз С.А.:
Так, ну я тоже пропущу, естественно, описательную часть отзыва. И перейду к результатам рассмотрения.
Выступление оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Волкова Н.Б. имеется в деле.
Отмеченные недостатки никак не влияют на ценность всей работы и результаты. Вполне заслуживают, удовлетворяют требованиям ВАКа и диссертант заслуживает присуждения ему степени доктора наук.

Председатель:
Сергей Александрович, спасибо. Теперь слово предоставляется Георгию Степановичу.

Волков Г.С.:
По поводу названия. Я не считаю его неудачным. В целом, мне кажется, что название отражает основные результаты полученной диссертации. Надо было в самом тексте диссертации на это акцентировать внимание. Потому что первое, когда мы говорим о переходных режимах, это сжатие каскадных нагрузок с неоднородным распределением погонной массой внешней сборки. Там действительно есть переходные режимы. Есть режимы без увеличения погонной массы. Режимы, когда погонная масса на части внешнего каскада увеличена сильно. Вы переходите в этой схеме от динамического хольраума к статическому и между ними получаете переходной режим, в котором есть определенные преимущества. Можно предыонизовать пену, предварительно до удара внешней оболочки по пене, по цилиндру, по хольрауму, можно использовать излучение Z-пинчей для более однородного облучения мишени. То есть переходный режим есть.

Второе, при сжатии, переходе от алюминиевых лайнеров одиночных, к сжатию вольфрамовых сборок, При получении, при содержании вольфрама в сборке на уровне 25-30%, при переходе получается практически такая же мощность излучения, хотя содержание вольфрама там всего 1/4, или 1/3, даже меньше 1/3.

Еще интересно по поводу переходных режимов, это... Увеличение роли магнитного поля тока внутреннего каскада на взаимодействии каскадов с увеличением энергии излучения. Тут получается все как бы немножко наоборот. Сначала, когда мы сжимаем каскадные сборки, мы не можем заскинировать ток внешней оболочки так, чтобы внутрь ток не проникал. Пока это не удается. Соответственно, нельзя просто сделать такой режим, когда у вас оболочка с током ударяет по внутренней оболочке без тока, по внутренней нагрузке без тока. Такой режим не реализуется пока в эксперименте. Режим, при котором часть тока проникает во внутреннюю сборку, и идет взаимодействие каскадов через магнитное поле практически наблюдается во всех экспериментах. Но при

этом, если ток внутренней сборки не очень большой, сжатие внутренней сборки и внешней через магнитное поле происходит практически одновременно. Магнитный поле тока внутренней сборки не очень большое и практически обе оболочки сжимаются одновременно и получается короткий импульс мощного излучения. И теперь, когда мы увеличиваем ток через внутреннюю сборку, мы получаем другой режим, определяющий роль магнитного поля. И получается, на самом деле, переходной режим — это тот, с которым мы все время работаем, когда там порядка 20% тока проходит на внутреннюю сборку. В диссертации есть еще эксперименты, где внешняя алюминиевая сборка многопроволочная сборка сжималась даже не на лайнер сказать, а на внутреннюю нагрузку 4-мм сборку многопроволочную вольфрамовую. Размер внутренней сборки соответствовал размеру пинча, который получается при сжатии чисто алюминиевой сборки. И в этом случае получено короткое импульс излучение и высокую мощность излучения. Такой переходной режим это не совсем... композитный пинч. Это среднее между композитным пинчом и, соответственно, двухкаскадной лайнерной сборкой. Такой переходный режим. Но больше, наверное, нужно добавить пояснений по переходному режиму. Пожалуй, все я рассказал. Надо было на этом как-то заострить внимание.

По поводу спектров аргона, калия, хлора. В подписи к рисунку там приведен, что это второй, во втором порядке они получены. Алюминий в первом. Соответственно, они попадают на регистратор в один диапазон. Второй порядок и первый. Подписи там есть.

Что-то еще там было? Название, да, Значит, по поводу, тут каждая глава имеет введение, но это, я считаю, есть такие, литературные произведение, где приводятся краткое содержание каких-то глав. Там буквально несколько строчек, о чем пойдет речь. Наверное, это все-таки полезная информация сразу.

Ну и повторение параметров, там просто введенное напряжение, ток. В тексте нет определения границ диапазона излучения. ВУФ мягкий рентген. Обычно мы работали с 30-50 электронов вольт до нескольких кэВ. Это мы называем мягким рентгеном. ВУФ излучение это все, что будет ниже 30-50 электрон вольт. Иногда это называют ультрамягким рентгеном. А вуф-излучение это то, что не проходит через кварц. Нужно использовать измерения, проводить в вакууме.

По поводу разрешения прибора спектрографа спектрального разрешения определяет шириной отражение кристалла. Действительно, да. На что не влияет на результаты. Только будет еще и больше, чем 400 заявленных.

Будем учитывать это все в будущих своих работах. Все замечания. Они полезны. Спасибо.

Председатель:

Хорошо, спасибо. Теперь, пожалуйста, слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физико-математических наук Паперному Виктору Львовичу, Иркутской государственной университет. Пожалуйста, Виктор Львович.

Папервый В.Л.:

Добрый день, коллеги. Ну, прежде всего, я хотел бы поблагодарить диссертанта, предоставленную возможность мне оценить эту работу. Ну, и хотел бы несколько своих соображений по поводу работы высказать.

(Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Паперного В.Л. имеется в деле)

Ну, сделанные замечания носят в основном характер рекомендации и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Не буду зачитывать соответствие содержания диссертации специальности и заключения. Диссертационная работа, выполненная на высоком научном уровне, является реализованным научным исследованием. Результаты работы представляют весьма существенный вклад в развитие

фундаментальных представлений и природных аспектов физики, техники и сильноточных физических разрядов. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных частей результатов несомненна. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором диссертации, является вполне обоснованной. Автор является призванным специалистом в области сильноточных импульсных систем. Результаты его исследований докладывались на престижных российских и международных конференциях, опубликованных в рейтингах научных изданиях и широко известной мировой научной общественности. Таким образом, диссертационная работа, удовлетворяет требованиям установленного пункта 9, Положения порядка, присуждения ученых степеней, а ее автор Волков Георгий Степанович заслуживает присуждения ученой степеней доктора физ.-мат. Ннук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Председатель:
Спасибо. Спасибо, Виктор Львович. Так, теперь, Георгий Степанович, вам слово для ответа на замечания.

Волков Г.С.
Спасибо. По общим замечаниям, по первому замечанию, работа представляет собой обобщение исследований большого научного коллектива и указать роль и место этих исследований в общем картине работы необходимо. В выведении частично это сделано, описано, какие работы и в какой направленности проводятся эти работы. В Соединенных Штатах на установке Z и до этого, первые эксперименты, которые проводились на довольно мощных, в конце 70-х годов, мощных установках. В США это был ускоритель Blackjack 5. Мощность одного модуля была сравнима с мощность установки Ангары-5-1. И эксперимент, который они проводили, там описаны во введении. Они исследовали даже зависимость эффективности генерации мощности излучения от начального расстояния между проволочками. Это расстояние между проволочками, с многопровочными сборками. То есть это вот, когда читаешь, думаешь, немножко они не дошли до того, чтобы получить высокую мощность излучения. Как сейчас это делается на многопровочных сборках, когда расстояние между проволочками достаточно маленькое.

По поводу литературы, основные работы до 2010 года. Связано это с тем, что тенденция, в основном это американские работы, исследования на Азии, они решили, что схемы непрямого обжатия сферических мишеней требуют очень больших потоков излучения, очень мощных установок. И начали искать способы прямого обжатия плазмы, не обязательно сферической формы. То есть они перешли, например, на новую схему маглиб. В магнитном поле цилиндр из бериллия. Продольное сильное магнитное поле. В этом цилиндре находится смесь, которая термоядерная. Дейтерий, скажем, как сейчас у них. Они его нагревают до температуры 100 эВ, излучения мощного лазера. И потом бериллиевой фольгой, цилиндром сжимают. Адибатическое сжатие с повышением температуры, до термоядерных. Получена температура примерно 1,5 кэВ. В таких экспериментах нейтроны получены 10 в 12 степени. И эта тема развивается у них активно. Они как бы перешли от схем, с непрямым сжатием мишени на схемы прямым обжатием. Что у них получится, еще неизвестно. Но это тоже требует колоссальных усилий, мощные лазеры, работа с бериллием и так далее. Этот ток нужно туда притащить, на эту высокоиндуктивную нагрузку. Вот как раз здесь можно было бы использовать каскадные сборки, как в композитном пинче. Вот с этим связано в основном. Ну, то, что китайцы работают в этом направлении на установке своей 7 мегампер PTS. Ну, и пытаются повторить американские эксперименты, но нейтронов пока нет. Одно хорошо, они пытаются сделать, ставят мишени, сжимают, пытаются искать сжатия, смотреть нейтроны и так далее. Пройдет время, они достанут американцев и, может быть, даже их обойдут. Правда, надо отметить, что за прошедшие 15 лет, когда американцы стали использовать

прямые методы сжатия, получения термоядерной энергии, все-таки они вернулись к мысли построить мощную машину. И сейчас у них есть стартап, который собрал миллиард долларов. Конструирование, разработку и изготовление первых каких-то элементов новых ускорителей на 60 мегампер. С мощностью порядка 200 таррават. То есть они все-таки к этому делу склонились. Один миллиард собрали частных инвестиций, еще миллиард от Министерства энергетики они должны получить какие-то средства.. Ну и дальше там будет видно. И все люди, которые заняты, оффилированные люди, которые работают в САНДИА. То есть это специалисты по высоковольтной технике, импульсной, по мощности и по экспериментам. Вот с этим связано, наверное, то, что основные работы немножко ушли в другую сторону американцы.

Частные замечания. Приведен спектр ксенона. при сжатии ксеноновой струи. Он снят был там многослойным многоканальным полихроматором. Газовая струя ксенона на Ангаре-5-1. И там высокоэнергетический пичок есть при энергиях порядка 800 эВ. есть. Хотя сам спектр довольно мягкий. Есть излучение линейчатое. Небольшой пичок. Значит... То, что он тепловой характер носит, следует из-за того, что форма импульса, в которой зарегистрировано излучение 800 эВ, она та же форма импульса, что и у более мягкой компоненты. Поэтому это тепловое излучение. И связано оно с излучением в М-оболочке ксенона. Если перейти на вольфрам, то это излучение в оболочке попадает на область 2 кэВ. И на экспериментах на Z, когда они сжимают каскадную вольфрамовую сборку, получают в этой области из 1,5-2 мегаджолей всего, излучения 200 кДж в этом излучении в районе 2 кэВ, Вот этот пичок, который мы там видим на ксеноне, они получают 200 кДж. Но это говорит о том, что у них высокая температура. У нас, конечно, этого нет, мы до этого не добираемся. Спектрограф на основе ПЗС линейки.

Замечание второе: использовался такой датчик. Написано, действительно нетривальная задача. Во-первых, избавиться от регистрирования на уровне наводок. Там очень много приходилось экранировать, изолировать и так далее, и так далее. Ну и удалось получить, избавиться от всяких там электронных наводок и от жесткого рентгеновского излучения. Параметры ПЗС линейки подробно исследовались на рентгеновском стенде, который описан в диссертации с электронным пучком. Разрешения пространственное, абсолютная чувствительность при энергии от 1кэВ до 25 кэВ, разрешение порядка 15 микрон, получается, в диапазоне энергий квантов до 5-6 кэв. Ну и чувствительность была определена, и динамический диапазон, линейность. Это описано в подробной статье о журнале ПТЭ, даже с теоретическими расчетами. Ну, поскольку это уже вошло в другие диссертации, работа, хоть я там очень активную часть принимал, на том стенде, который я сам разрабатывал. Она уже вошла в другие работы, поэтому подробно описывать не было смысла, некорректно было бы. А ссылка есть на эту работу.

Значит, график спектральной чувствительности детектора на рисунке рис.5 имеет вид насыщения. Ну, вот я добавил тут этот график зависит чувствительности детектора AXUV5. Сейчас есть и наши аналоги соответствующие. У него при энергии свыше 500-600 эВ, спектральная чувствительность выходит на практически постоянно значение 0,27-0,28 ампер на ватт. Ну и начинает падать только с энергии порядка 6 кэВ, когда рентгеновское излучение начинает пронизывать частично толщину датчика, выходить из него с обратной стороны. Поэтому там просто так нарисовано, может быть, не очень удачно. Постоянная спектральная чувствительность. Это не насыщение, это чувствительность выходит на постоянное значение и не меняется. Широкий диапазон по энергии. Может, не очень удачно там нарисовано. Вот я здесь специально эту график привел справа. Немножко непрямая линия, но с учетом калибровки, на синхротроне в Германии, погрешность калибровки 2-3%, отсюда эта чувствительность приведена. Это не насыщение, это просто постоянная спектральная чувствительность практически.

Экспериментальные данные на рисунке 2.21 имеет очень большой разброс по энергии. Сотни электрон вольт. Необходимый комментарий автора. Там приведен на этом рисунке… Спектральный разброс по энергии при измерении на микросекундном Z-пинче,

на азотном Z-пинче. Снимался спектр излучения с помощью вакуумных рентгеновских диодов с катодами со специально подобранными фильтрами и еще монохроматор использовался. Им сканировалось линейчатое излучения азота. Вот это не разброс по энергиям по горизонтали, это как бы регистрируется спектральный диапазон. Надо было просто мне как автору надо было нарисовать здесь гистограмму. Это не величина ошибки измерений, это ширина пропускания фильтров и соответствующая спектральная чувствительность данного измерения этим каналом. Ну и, соответственно, здесь еще есть... В принципе, есть под эти эксперименты, есть расчет. Температура плазмы азота там 130-150 эВ, плотность электронная на уровне 10 в 20-той степени на кубический сантиметр. И хорошо видно, вот здесь прописано абсолютно измеренное, абсолютная интенсивность гелиоподобных и водородоподобных линий азота. Можно использовать их для калибровки детекторов. Ради того, чтобы для калибровки использовать и измерять потоки. Это, в общем, не разброс по энергии, а специальная ширина канала.

Далее по замечаниям. Значит, на рисунке 4.4 сигналы детекторов нормированы на единицу с соответствующими коэффициентами датчиков. Поэтому отношения интенсивностей в излучения в выбранных спектральных интервалах отличаются сильно, как на спектрах излучения. Амплитуды и площадь покрытия очень близки, однако соответствующие участки энергетического спектра отличаются более чем на порядок. Ну, в тех картинках, которые приводятся, Картинки осциллограмм рисуются так, чтобы они были нормированы на единицу. Соответственно, коэффициенты вводятся для каждого датчика. Вообще коэффициенты датчиков приведены и в некоторых подписях к рисункам. На самом деле, если взять коэффициент датчика, они сильно отличаются по потокам, по энергии. Но приведены для удобства рассмотрения в разных масштабах. Далее, спектр, снятый с пропускающей решеткой в вольфрамовых пинчей, далек от Планковского.

Действительно, по поводу спектра, здесь, по-моему, где-то рассчетные данные приведу. Спектр излучения вольфрама пинча – это расчеты ИМП им. Келдаша, проведен Новиковым и Вичевым. Вот расчет спектров излучения вольфрама. Зависит от температуры. Ну, видно, что с повышением температуры призаданной электронной плотности спектр более изрезанный. Вообще, излучение вольфрама при наших массах складывается из линейного излучения. Очень большое количество линий. порядка 100 тысяч, скажем, да, может даже больше 100 тысяч линий, они сливаются в некие полосы, сливаются между собой и образуют некие полосы. Вот здесь показано, такое излучение. Где-то это излучение имеет оптическую плотность большую, поэтому оно подтягивается под планк, а где-то, значит, пропускание высокое, поглощение маленькое, излучение выходит, поэтому здесь провал. Ну и видно, что с повышением температуры при наших массах отклонение от Планковского все больше и больше. У американцев проще. У них там массы микрограммы и спектр очень близок к Планковскому. При их температурах порядка 200-300 эВ. А здесь, чтобы описывать спектр даже в теории, нужно его разбивать на большое количество интервалов. 50-100 интервалов, чтобы правильно описать спектр в нашем случае, когда масса не очень большая.

Здесь замечание шестое. Требуется объяснить происхождение второго пика на сигнале рентгеновского датчика в отсутствии в этот момент признаков пинчевания. Речь идет о том, что есть радиальная развертка сжатия пинча, и есть датчики, сигналы датчиков. На радиальной развертке особенностей нет, а на сигналах есть. Связано это с тем, что развертка берет кусочек пинча, где-то, может быть, на всей длине пинча возникают горячие области, и они дают вклад в сигнал, а на развертку не попадают.

Ну и вот последний вопрос. Необходимо пояснение о физических причинах резкого падения температуры алюминиевого пинча при добавлении в сборку небольшой доли вольфрама. Мы добавляем вольфрам и температура сначала падает, потом растет. И, наверное, еще и дальше растет там до 1 кэВ. Связано с тем, что вот когда мы на чистом алюминию работаем, основная часть плазмы имеет высокую температуру, заметная часть

плазмы, мы ее регистрируем. Когда мы начинаем, добавляем вольфрам, излучательные потери, так как Z большое, то есть вольфрам ионизуется хорошо, Z ~20, а скорость возбуждения спектральных линий растеткак как Z в 4 степени То есть линии начинают интенсивно излучать, существенно сильнее, чем алюминий. Соответственно, поэтому температура резко падает. Потом она начинает расти, связанно с тем, что теперь излучение регистрируется из небольших областей с высокой температурой. Это уже не из основной плазмы, а из маленького объема, из горячих областей. А основная масса плазмы холодная. Кстати, видно, как падает энергия полного излучения в линиях алюминия. Практически экспоненциальная зависимость от доли вольфрама.

Ну и последнее замечание, по рисунках, это по последней главе. Там где сжимается пинч с увеличенной ролью магнитного поля тока внутреннего каскада. Соответственно, мы видим на развертках максимум рентгеновского излучения в первом пике сжатия внутреннего каскада. Соответственно, это условие, когда внешний каскад затормозился, но тоже излучает. Соответственно, на оптической развертке нет минимального размера. Качественно это подтверждает то, что излучение идет из внутренней сборки с увеличенным магнитным полем. Все.

Председатель:
Спасибо, Георгий Степанович. Теперь слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физико-математических наук Ивановскому Андрею Владимировичу. Российский федеральный ядерный центр. Пожалуйста, Андрей Владимирович.

Ивановский А.В.:
Я, с позволения членов совета, тоже не буду останавливаться на констатирующей части, кроме одного. Я немного расскажу об актуальности. Ну и дальше перейду к замечаниям.
(Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Ивановского А.В. имеется в деле)
Ну, я не знаю, может быть, я и не буду зачитывать заключение, оно тоже стандартное. То есть - он заслуживает безусловно - присвоения.

Председатель:
Хорошо, Андрей Владимирович, спасибо. Так, теперь слово Георгия Степановича, пожалуйста.

Волков Г.С.
Это основное замечание по эксперименту с фольгами, который провели у себя американцы. Должен сказать, что реакция на эти эксперименты была, ну, в сравнении с проволочными сборками, реакция на эти эксперименты была такая немного негативная, ну, не лично у меня, как-то у сообщества, скажем так, пинчевого, поскольку была получена меньшая мощность излучения. И, во-вторых, тогда была некая эйфория. Считалось, что если количество проволочек сделать довольно большое, то можно получить почти сплошную оболочку. Как раз в тексте диссертации отмечается, что несмотря на то, что оболочка была не очень высокого качества, цилиндричность имеется в виду. Даже не разная толщина. Я сейчас ничего не могу сказать про разную толщину она еще была не очень высокого качества по цилиндричности. И несмотря на это, мощность излучения отличалась всего в два раза. То есть там во введении диссертации подчеркивается, что это результат очень хороший. Эксперимент лично мне понравился. И перспектива у него есть. Если мы перейдем на более мощные установки, будет проще делать лайнеры сплошные, более толстые, и на них получать замечательные результаты, большие мощные излучения. Но тут есть другая проблема, которая не затрагивается, может быть, в диссертации. Нужно обеспечивать однородное распределение тока по такой оболочке, при сжатии. Американцы считают, что они знают, как это сделать. Надо сделать

резкий фронт, обострить фронт тока. Тогда можно будет получить однородность распределения тока на оболочке. Поэтому некое значение имеет разработка плазменных размыкателей, о которых я говорил до этого, для этого использовались. Обострить ток, потому что так просто получить короткий импульс с генераторов сложно, надо какие-то устройства, которые обостряют. То есть действительно очень интересная задача.

По композитным Z - пинчам, там не сказано, какие мощности, энергии получены. В этих экспериментах с пеной и с газовой струей, аргон, метан. Действительно, основное внимание уделялось параметрам плазмы, высокие плотности и температуры которые получены в объеме десятки кубических миллиметров. Это не какой-нибудь Х-пинч с маленьким объемом. Получены температуры порядка полтора кэВ, температура в центре Солнца для материалов с довольно большими Z. Но потом мы провели эксперимент, они описаны в диссертации, когда внешняя алюминиевая сборка сжималась на почти, почти, значит, ни пинч, ни лайнер, ни файбер, сборка очень маленького диаметра, там 4 мм, и там исследованы спектральные и энергетические характеристики такого разряда. Это имеет перспективу. Хоть там и не получена мощность больше, чем при сжатии вольфрама на вольфрам. Но перспектива в чем? Если мы перейдем на установку с большим током, можно будет сделать эту оболочку, внешнюю сплошную, алюминиевую, скажем, или медную. Из вольфрама ее, наверное, не сделаете. И эти эксперименты будут актуальны. Можно будет получить высокую мощность излучения.

Ну, пожалуй, все, наверное, да. Спасибо

Председатель

Хорошо, Георгий, спасибо. Теперь переходим к дискуссии. Я хотел бы высказаться. Я попытаюсь немножко... Не обобщить и, может быть, даже повторить что-то, но работа производит, конечно, очень сильное впечатление. Это основательный экспериментальный труд, который формировался на протяжении десятилетий, было уже сказано более тридцати лет. Основательность здесь сочетается с уникальностью. Та установка Ангара-5-1, на которой проведена была, это экспериментальная установка крупного масштаба. Экспериментаторы, я думаю, не только экспериментаторы, хорошо себя представляют. Изменение масштаба установки – это не просто переход от одного размера, это на порядке меняется сложность эксперимента. И получение одной точки, оно тут однозначно требует не кратно, а на порядке больше времени. Здесь была представлена очень обширная диагностика. И у меня тут наибольшее впечатление, я сказал, почти оптическая диагностика, но она рентгеновская. Оптическая все-таки принята, видимо, в области спектра об этом говорить. Это, конечно, уникальные возможности для получения спектров. Здесь и разрешение, локализация и большой объем экспериментальных данных. Вот результатом тут явилось достаточно обширное положение, выносимое на защиту, но это все оправдано. Конечно, эту работу поддерживать надо. Конечно, хотелось бы, чтобы в ближайшем будущем Андрей Владимирович озвучил некие предложения, хотелось бы это тоже все увидеть. Но это вопрос, как всегда, непростой. Будем надеяться. Но сама работа, безусловно, она соответствует искомой степени, безусловно, заслуживает ее. И в моем представлении, по сути, мы сейчас увидели несколько докторских диссертаций очень высокого уровня.

Так, пожалуйста, кто-то еще хотел высказать? Да, Леонид Михайлович

Василяк Л.М.:

Уважаемые коллеги, на мой взгляд, эта работа как по поставленным задачам, так и по полученным результатам, это очень хорошая работа, и можно ее квалифицировать как созданное новое научное направление. Сделан большой вклад в это научное направление. Я предлагаю поддержать эту работу, и я буду голосовать «За», и предлагаю членам ученого совета тоже поддержать.

Председатель:
Спасибо, Леонид Михайлович.

Филиппов А.В.:
Георгий Степанович, конечно, намучился с этой диссертацией. Эта диссертация имеет долгую историю, как начиная с прохождения на научных советах заслушивания, так и здесь, даже со сменой прошлогодней защиты. Но молодец Георгий Степанович преодолел все трудности, которые, кстати, помехи, которые сами им и создавались иногда. Но опыт преодоления электромагнитных наводок помог здесь. Вообще Ангара-5-1, тут уже многократно говорилось, это такая крупная, уникальная установка, аналогов у нас в стране нет. Эту установку уже работает более 40 лет. Получено очень много результатов, и вот на фоне этих результатов и опубликованных статей вызывает большое удивление малое количество защит диссертаций сотрудниками, работающими на этой установке. Получаемые результаты говорят о том, что там собраны очень высококвалифицированные специалисты, которые получают уникальные мирового уровня результаты. И результаты, полученные Георгием Степановичем, тоже такого же высокого уровня. Поэтому я призываю членов диссертационного совета поддержать эту работу. Спасибо.

Председатель
Спасибо, Анатолий Васильевич. Кто-то еще хотел бы высказать? Пожалуйста

Олейник Г.М.:
Дорогие коллеги, я Олейник Георгий Михайлович, начальник лаборатории в ТРИНИТИ. Хочу уточнить относительно установки Ангара--5-1. Она уже работает 43 года, но она, конечно, еще младше, чем та установка Z, которая первоначально была ПБФА-2, которая раньше еще запустилась. Так вот, Георгий Степанович... В своей работе говорилось уже, что приходилось ему преодолевать большие сложности с наводкой. Это мегавольты, это мегаамперы. И пока у нас было измерение реальных сигналов амплитудой в десятком вольт, это одна была проблема, а переход в область миливольт при измерении — это очень сложно. При этом надо понимать, что эти мегавольты, они производят воздействие на всю аппаратуру, такое, что, скажем, обычный кабель. с электрическим изолятором, он становится как бы детектором, потому что процессы происходят такие, что в нем возникает сигнал. Георгий Степанович проявил себя как квалифицированный физик, который проводит многократные перекрестные измерения, подтверждающие свои результаты. Ну что еще хотел бы сказать. Он хороший товарищ наш, много лет все это время работает на Ангаре, с самого начала. И, несомненно, достоин присуждения ему докторской степени.

Председатель:
Хорошо, спасибо. Если еще желающие выступить, ну, картина, по-моему, очень ясная, понятная. Мы можем приступить к голосованию, но у нас еще заключительное слово, пожалуйста, Георгий Степанович, по регламенту

Волков Г.С.
Я хочу поблагодарить всех, кто здесь выступал, все, кто пришли сюда, потратили свое время. Хочу поблагодарить членов Совета за организацию и хочу поблагодарить рецензентов своих. Очень доброжелательные отношения и полезные замечания, которые, так сказать, мне самому позволяют на работу посмотреть немножко с другой стороны, на качество работы. Они потратили свое время и не напрасно. Хочется благодарить еще раз коллектив установки АНГАРА-5-1-5 с руководством. Здесь присутствует Грабовский Евгений Валентинович, на котором все держится у нас много лет установка. Георгий Михайлович, автоматизация измерений, которые он наладил на установки, не только

электротехнические измерения, основу вообще эксперимент составляет. Потому что эксперимент сложный, много сигналов, много каналов, синхронизация, пятое, десятое, и прочее, все это организовано. Теперь, слава Богу, есть для проведения эксперимента цифровые приборы, осциллографы. И работа, конечно, более комфортная стала, чем раньше. Всех хочется поблагодарить и пожелать всем присутствующим, главное, хорошего здоровья на будущее и работать, заниматься любимой работой. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Георгий Степанов. Теперь мы можем переходить к голосованию. Ученый секретарь даст поясняющие комментарии.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, напоминаю, что наше заседание проводится в комбинированном очно-дистанционном режиме, а голосование членов дистанционного совета проводится с использованием телекоммуникационных систем, то есть на сайте нашего института. Прошу всех присутствующих, очно и дистанционно, членов дистанционного совета войти под своим логином и паролем на сайт ОИВТ РАН. Со своего устройства или с компьютера диссовета и проголосовать. Обращаю ваше внимание, что можно проголосовать стандартно по инструкции: по сайту дойти, либо по ссылке.
(Проводится процедура тайного голосования)

Председатель

Уважаемые члены совета! Давайте послушаем результаты.

Ученый секретарь

Уважаемые члены совета! Позвольте огласить протокол заседания комиссии. Всего присутствовало на заседании 25 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 10, очно присутствовало 18, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 8, онлайн присутствовало 7, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 2.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Волкову Георгию Степановичу:
за – 24, против – 1, недействительных – нет.

Председатель

Спасибо. Мы должны утвердить. Кто за? Против нет?
Воздержавшихся нет? *(Результаты голосования утверждены единогласно).*
Спасибо большое, поздравляем.
Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания?
(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).
Если больше нет желающих обсуждать проект, тогда мы должны его проголосовать с теми замечаниями, которые были высказаны. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно.
(Проект заключения принят единогласно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.10.2026г. № 8

О присуждении Волкову Георгию Степановичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Переходные режимы излучения сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 27.05.2026г., (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Волков Георгий Степанович 1954 года рождения, в 1977 году окончил Московский физико-технический институт.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Исследование динамики и излучения многопроволочных лайнеров, ускоряемых мощными импульсными генераторами» по специальности 01.04.08 - физика и химия плазмы была защищена 26.11.1990 г. в Специализированном диссертационном совете Д.034.04.01 при Институте Атомной Энергии им. И.В. Курчатова, г. Москва. (Протокол № 9).

Работает в должности старшего научного сотрудника Отделения физики токамаков реакторов и токонесущей плазмы АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Диссертация выполнена в Отделении физики токамаков реакторов и токонесущей плазмы АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры общей и космической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждение высшего образования «Иркутский государственного университета» Паперный Виктор Львович;
- доктор физико-математических наук, профессор, зам. директора института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) по исследованиям высокотемпературной замагниченной плазмы - начальник научно-исследовательского отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ Ивановский Андрей Владимирович;
- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела физики высоких плотностей энергий ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН Пикуз Сергей Александрович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником отдела высоких плотностей энергий д.ф.-м.н. Орешкиным В.И. (и утвержденном 15.09.2026г. Врио директором Жерлицыным А.А.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы. Например, предложен и экспериментально обоснован вариант каскадной нагрузки сильноточных Z –пинчей с использованием эффекта усиления взаимодействия каскадов сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума». Впервые экспериментально измерена анизотропия плотности потока энергии разлетающейся плазмы мегаамперных Z- пинчей и показано, что в направлении перпендикулярном оси пинча энергия излучения существенно превышает энергию переносимую ионными потоками распадающейся плазмы, а в направлении оси они сравнимы.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, проводящих исследования по физике высоких

плотностей энергий и экстремального состояния вещества, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН), в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, в Национальном исследовательском университете «МИФИ», в НИЦ «Курчатовский институт», во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова.

По теме диссертации опубликовано 29 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций:

1. Bobashev S.V., Golubev A.V., Platonov Yu.Ya., Salashenko N.N., Shmaenok L.A., Volkov G.S. and Zaitsev V.L. Absolute Photometry of Pulsed Intense Fluxes of Ultrasoft X-Ray Radiation. // Physica Scripta.-1991.- V.43.- P.356-367

2. Ахсахалян А.Д., Бобашев С.В., Волков Г.С., Голубев А.В., Зайцев В.И., Забродин И.Г., Краснов А.К., Олейник Г.М., Шмаенок Л.А. Измерение спектра излучения плазмы с помощью многослойных рентгеновских зеркал// Физика плазмы.-1992.-Т.18.-В.4.- С. 509-513

3. Волков Г.С., Гигиберия В.П., Комаров С.А., Корнило В.А., Тулупов М.В. Исследование параметров ксеноновых сверхзвуковых струй, получаемых с помощью электромагнитного клапана // ЖТФ.-1992.- Т.62.- В.11.-С.172-175

4. Волков Г.С., Гигиберия В.П., Коваленко А.В. и др. Экспериментальное и расчетное исследование излучательных характеристик плотной высокотемпературной плазмы многозарядных ионов получаемой при ускорении лайнеров на установке "Ангара-5-1"// ЖЭТФ. -1992.-Т.101.-В.2.-С.479-492

5. Волков Г.С., Утюгов Е.Г., Фролов И.Н. О степени компактности ускорения быстрых лайнеров на установке "Ангара-5-1". //Физика плазмы.-1993.-Т.19.- В.9.-С.1002-1008

6. Волков Г.С., Заживихин В.В., Зайцев В.И., Мишенский В.О. Приборы с зарядовой связью как позиционно-чувствительные детекторы рентгеновского излучения// ПТЭ.-1996.-№.3.- С.119-127

7. Волков Г.С., Зайцев В.И., Лангли С., Мишенский В.О., Папазьян Ю.В., Федулов М.В., Смирнов В.П., Этлишер Б. Спектрограф мягкого рентгеновского излучения с регистрацией на П.З.С.// ПТЭ.-1997.- №.1.- С.125-130

8. Волков Г.С., Данько С.А., Зентер П., Зайцев В.И., Мишенский В.О., Федулов М.В., Чуватин А. и Этлишер Б. Спектроскопия композитных Z - пинчей на установке Ангара-5-1.// Физика плазмы.-1999.- т.25.- №.1.- С.38-45

9. Александров В.В., Браницкий А.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зурин М.В., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Самохин А.А., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Федулов М.В., Фролов И.Н. Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием.//Физика плазмы.-2001.- Т.27.- №.2.- С.99-120

10. Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V., Grabovsky E.V., Mitrofanov K.N., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Sasorov P.V., Smirnov V.P., Volkov G.S., Zurin M.M. and Zukakischvili G.G. Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility.// IEEE Transactions on PLASMA SCIENCE.-2002.-V.30.-№.2.- P.559-566

11. Stepanov A.E., Volkov G.S., Zaitsev V.I., Makarov K.N., Satov Yu.A. and Roerich V.C. Measurements of temperature evolution for the laser ion source plasma.// Laser and Particle Beams.-2002.- V.20.- P.613-615

12. Степанов А.Е., Волков Г.С., Зайцев В.И., Макаров К.Н., Сатов Ю.А., Рерих В.К. Динамика температуры в плазме с многозарядными ионами, создаваемой импульсом CO2-лазера //ПЖТФ.- 2003.-Т. 29.- В.5.- С.36-42

13. Зайцев В.И., Волков Г.С. Источник селективного мягкого рентгеновского излучения на основе z-пинча.// ПТЭ.-2004.- №.4.- С.85-88

14. Волков Г.С., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М. Рентгеновское зондирование приосевой области плазмы многопроволочного лайнера на установке АНГАРА –5-1.// Физика плазмы.-2004.-Т.30.- №.2.- С.115-128
15. Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зайцев В.И., Зукакишвили Г.Г., Зурин М.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Смирнов В.П., Фролов И.Н. Диагностика плазмы на установке "АНГАРА-5-1".//ПТЭ.-2004.- №.2.- С. 74-81
16. Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зурин М.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю. Методика рентгеновского зондирования излучением Х–пинча плазмы многопроволочных сжимающихся лайнеров на установке "АНГАРА-5-1".// ПТЭ.-2004.- №.3.- С.110-124
17. Volkov G.S., Zaitsev V.I., Lakhtyushko N.I. and Fedulov M.V. Z – pinch X – ray polarisation research// Plasma Devices and Operations.-2005.- V.13.- №.2.-P.129
18. Volkov G.S., Zaitsev V.I., Kartashov A.V., Lakhtyushko N.I., Rupasov A.A. and Shikanov A.S. X – ray radiation of Z – pinch source.//Plasma Devices and Operations.-2005.-V.13.- №.2.- P.123 – 128
19. Zaitsev V.I., Andrianov Yu. V., Volkov G.S., Grabovsky Ye.V., Lakhtyushko N.L. High-current Z–pinch disintegration and the problem of peripheral equipment protection.//Plasma Devices and Operations.-2008.- V.16.- №.1.- P.61 – 66
20. Зайцев В.И., Волков Г.С., Барыков И.А., Грабовский Е.В., Александров В.В., Болдырев А.С., Гасилов В.А. Точечный» источник мягкого рентгеновского излучения на основе газового пинча.// Письма в ЖЭТФ.-2008.-Т.88.-В.9.- С.673-676
21. Зайцев В.И., Волков Г.С., Карташов А.В., Лахтюшко Н.И. Коллективное ускорение ионов при распаде сильноточного Z – пинча.// Физика плазмы.-2008.-Т.34.-№.3.- С.195
22. Волков Г.С., Зайцев В.И., Макаров К.Н., Напартович А.П., Рерих В.К., Смаковский Ю.Б., Степанов А.Е., Черковец В.Е., Рупасов А.А., Сатов Ю.А. Исследование генерации EUV – излучения (λ = 13.5нм) ионами Sn в CO2 –лазерной плазме.//Физика плазмы.-2010.-Т.36.- №.2.- С.145-158
23. Волков Г.С., Зайцев В.И., Грабовский Е.В., Федулов М.В., Александров В.В., Лахтюшко Н.И. Исследование излучательной способности композитных по атомному составу Z – пинчей.// Физика плазмы.-2010.- Т.36.- №.2.- С.211-220
24. Волков Г.С., Лахтюшко Н.И., Терентьев О.В. Радиационный болометр из фольги для измерения энергетических потерь быстрых Z – пинчей.// ПТЭ.-2010.- №.5.-С.115-120
25. Болховитинов Е.А., Волков Г.С., Вичев И.Ю., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Зайцев В.И., Новиков В.Г., Олейник Г.М., Рупасов А.А., Светлов Е.В., Шиканов А.С., Федулов М.В. Исследования спектров излучения быстрых Z – пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1».//Физика плазмы.-2012.-Т.38.- №.10.- С.894-902
26. Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лахтюшко Н.И., Медовщиков С.Ф., Олейник Г.М., Светлов Е.В. Исследование анизотропии энергетических потерь сильноточного Z - пинча, получаемого при сжатии цилиндрических многопроволочных вольфрамовых сборок.//Физика плазмы.-2014.- Т. 40.- №.2.- С.160-171
27. Александров В.В., Болховитинов Е.А., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Медовщиков С.Ф., Олейник Г.М., Рупасов А.А., Фролов И.Н. Динамика сжатия мегаамперного многопроволочного Z -пинча с внутренней низкоплотной пенной оболочкой на установке "Ангара-5-1"// Физика плазмы. – 2016 .- Т.42.- №.12.- С.1046–1056
28. Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Комаров Г.Л., Рупасов А.А., Фролов И.Н., Хилько М.В. Увеличение удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z – пинчей за счет использования переходных режимов сжатия.// Физика плазмы.- 2022.-Т.48.- №.4.-С.317-327

29. Volkov G.S., Grabovskii E.V., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Rupasov A.A. and Frolov I. N. Increase in Power of Radiation and Specific Concentration of Energy of Plasma of the High-Current Z-Pinches due to Compression of the Cascade Wire Arrays Interacting via Magnetic Field.// Plasma Physics Reports.- 2024.- V.50.- №.5.- P.573-587

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

(ведущий научный сотрудник д.ф.-м.н., Лотоцкий А.П.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- на стр. 7 в фрагменте «…имеющей низкую начальную индуктивной, на внутренний плотный и компактный «файбер»….» нарушено согласование;
- на стр.11 в этой же фразе ошибка повторяется;
- на стр.7 «Самостоятельной задачей является получения высокого выхода….» аналогично предыдущему замечанию;
- на стр. 18 Рис.1 в автореферате требует более детального описания, т.к. собственно пинч, являющийся главным элементом, не прорисован, а электрическая цепь установки прослеживается с трудом;
- в разделе «На защиту выносятся…» п.1 и п. 8 трудночитаемые, следовало бы каждый разбить на отдельные предложения;
- на стр.25 на рис.3 и 4 надо было бы указать направления протекания токов, ибо «полоски металла» указанные в подписи к рис.4 воспринимаются неоднозначно.

2. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (ведущий научный сотрудник д.ф.-м.н. Баронова Е.О.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в качестве замечания можно указать, что в автореферате излишне конспективно изложен эксперимент с взаимодействием каскадов двухкаскадной сборки с эффектом влияния увеличения роли магнитного поля тока внутреннего каскада на повышение мощности и энергии излучения образующегося пинча.
- также в автореферате желательно было бы привести критерий зажигания мишени с достижением положительного термоядерного выхода.

3. Всесоюзный Научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ведущий научный сотрудник к.т.н. Бублик М.А.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в качестве замечания можно указать, что в автореферате довольно кратко изложен эксперимент со взаимодействием каскадов двухкаскадной сборки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада. Увеличение полной мощности излучения пинча в этом случае объясняется сжатием магнитного потока тока внутреннего каскада. В автореферате было бы полезно указать, как этот эффект зависит от параметров внутреннего каскада (количество проволочек, погонная масса).
- также было бы полезно сравнить преимущества и недостатки измерения выходов излучения предлагаемым в работе быстрым фольговым радиационным калориметром по сравнению с резистивными болометрами.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Ивановский А.В. является ведущим ученым в области физики высокотемпературной плотной замагниченной плазмы и инерциального термоядерного с использованием мощных мегаамперных разрядов генерируемых взрывомагнитными генераторами.

1. Ивановский А.В., Мамышев В.И. Возможность достижения термоядерного зажигания при магнитогидродинамическом обжатии твердой мишени током дискового взрывомагнитного генератора //Физика плазмы, 2025, Т.51, № 2, С.165-172.
2. Ivanovskiy A.V., Mechanism of a stepped leader in negative lightning// Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2024, 265, pp.106391-106398.

3. Базанов А.А., Ерофеев А.Н., Ивановский А.В., Мамышев В.И., Шаповалов Е.В. Электровзрывной размыкатель тока для быстрого ввода энергии из индуктивного накопителя в нагрузку//Журнал технической физики, 2023, Т.93, № 8, С. 1204-1208.

- д.ф.-м.н., профессор Паперный В.Л. является ведущим ученым в области физики космической плазмы и моделирования быстропротекающих процессов в космической плазме в лабораторных условиях.

1. Paperny V.L., Baryshnikov V.I., Chernikh A.A. Small-sized bright point-like source of picosecond soft X-ray pulses based on a high-voltage vacuum discharge //Phys.Plasmas, V. 30, 2023, P.094501.
2. Paperny V.L., Baryshnikov V.I. Ultrasoft pulses of ultraviolet and vacuum- ultraviolet radiation of diffuse high-pressuregas discharges of picosecond duration // Optik, 2022, V.271, P.170067.
3. Romanov I.V., Paperny V.L., Kologrivov A.A., Korobkin Y.V., Rupasov A.A. 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.// Phys. of Plasmas, , 2022, V. 29, P.063102.

- д.ф.-м.н., профессор Пикуз С.А. является ведущим ученым в области физики высокотемпературной плотной плазмы и моделирования быстропротекающих процессов в неидеальной плазме лабораторных условия.

1. Shelkovenko T. A., Pikuz S. A., Tilikin I. N., Elshafiey E., Hammer D. A. Experimental evidence of radiative collapse in hybrid X pinches from time resolved x-ray spectroscopy of Ti plasma // Physical Review E,, 2026, Vol. 112, p. 055203.
2. Shelkovenko T. A., Tilikin I. N., Mingaleev A. R., Romanova V. M., Pikuz S. A. Hot spot generation in hybrid X pinches on a portable low-inductive KING generator // Physical Review E, 2025,Vol. 112, P. 015207.
3. Тиликин И.Н, Пестовский Н. В., Цхай С. Н., Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Савинов С. Ю. Когерентные свойства излучения сильноточных наносекундных разрядов // Успехи физических наук, Т. 194, № 8, с. 866–880, 2024

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы и основы ее применения в технологических процессах, сильноточной электроники, разработке методов генерирования мощных электрических импульсов, эмиссии интенсивных потоков излучения, а также исследования по воздействию мощных потоков энергии на вещество. В отделении физики высоких плотностей энергии ведутся интенсивные работы по импульсным электрическим разрядам в z-пинчах с целью генерации мощных импульсных потоков нейтронов и мягкого рентгеновского излучения из высокотемпературной плотной плазмы.

1. S.A. Chaikovsky, I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, E.V. Oreshkin, V.I. Oreshkin, N.A. Ratakhin, A.G. Rousskikh, V.A. Vankevich, A.S. Zhigalin, R.B. Baksht Foil explosion in megagauss magnetic fields: Non-uniform expansion and instabilities // Physics of Plasmas, vol.29, No.10, p.103501, 2022
2. I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, V.A. Van'kevich, S. A. Chaikovskii, V.I. Oreshkin Electric Explosion of Flat Copper Conductors in the Current Skinning Mode / Plasma Physics Reports, 2025, V. 51, No. 7, P. 763–772
3. R.K. Cherdizov, R.B. Baksht, V.A. Kokshenev, V.I. Oreshkin, A.G. Rousskikh Effect of tailored density profiles on the stability of imploding Z-pinches at microsecond rise time megaampere currents // Plasma Physics and Controlled Fusion, vol.64, No. 1, p.015011, 2021

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Предложен новый тип двухкаскадной нагрузки с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения массы сжимаемого вещества внешнего каскада для схем

непрямого обжатия термоядерных мишеней с использованием сильноточных Z – пинчей, который обеспечивает моделирование в зависимости от степени неоднородности распределения погонной массы внешнего каскада (10-30%), как режимов динамического и статического «хольраумов», так и переходных режимов, позволяющих повысить однородность облучения мишени.

- Предложена двухкаскадная нагрузка с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада, которая позволяет получить полную и удельную мощности излучения сильноточного Z-пинча (9.5-11ТВт и 9.5-11ТВт/см), превышающие соответственно полную и удельную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной» сборки длиной 1.6 см с теми же параметрами (7-8 ТВт и 5 ТВт/см). Эффект достигается за счет увеличения роли магнитного поля тока внутреннего каскада при взаимодействии каскадов сборки на этапе пинчевания.

- Предложена схема статического «хольраума» с двухкаскадной сборкой с использованием обнаруженного эффекта увеличения роли магнитного поля тока внутреннего каскада на динамику взаимодействия внешней ускоренной оболочки с внутренним каскадом, удерживающим статический «хольраум». Схема позволяет преобразовать практически всю кинетическую энергию внешней ускоренной оболочки в облучение мишени мягким рентгеновским излучением от двух образующихся приэлектродных пинчей.

- Показано, что использование переходного режима от сжатия сильноточными Z–пинчами алюминиевых однокаскадных многопроволочных сборок к сжатию вольфрамовых однокаскадных многопроволочных сборок, при содержании по массе вольфрама в сборке не более 25-30%, позволяет получить практически такую же мощность 4-5 ТВт и длительность 9-11 нс импульса излучения, как и при сжатии чисто вольфрамовых сборок с теми же параметрами (6-6.5 ТВт, 8 нс).

- Показано, что использование в геометрии композитного Z-пинча для «файбера» вещества, имеющего атомный номер сравнимый или больше атомного номера внешней плазменной оболочки обеспечивает эффективное вложение энергии во внутренний пенный «файбер» низкой плотности с прогревом не менее 50% вещества «файбера» до температуры внешней оболочки ~1кэВ.

- Разработан импульсный радиационный фольговый калориметр со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системой регистрации сигнала, который позволяет измерять в условиях высокого уровня электромагнитных помех абсолютные выходы излучения сильноточных Z- пинчей и плотность потока энергии, переносимой плазмой распадающегося пинча, с отношением сигнал/шум на уровне 20/1.

- Показано, что энергия, переносимая плазменными потоками распадающегося Z-пинча в единицу телесного угла в направлении перпендикулярном его оси, не превышает 5% от энергии мягкого рентгеновского излучения, что обосновывает корректное измерение выходов излучения в этом направлении термопарными калориметрами. Но в направлении оси пинча такие измерения термопарными калориметрами некорректны, так как в этом случае энергия переносимая плазменными потоками в единицу телесного угла на два порядка выше и сравнима с энергией излучения.

- Выявленные особенности разрядов микросекундной длительности по поверхности изолятора в вакууме, а именно независимость эффективной температуры ВУФ излучения 6 – 8 эВ от геометрии электродов (коаксиальный разряд, шестнадцатиканальный коаксиальный разряд, разряд типа «флэшбод») и слабая зависимость сопротивления разряда от величины тока, с получением КПД преобразования запасенной в конденсаторе энергии в энергию ВУФ излучения для «флешбода» ~3%, коаксиального разряда ~1% и шестнадцатиканального коаксиального разряда ~0.1%, позволяют оценивать параметры таких источников ВУФ излучения с различными геометриями электродов и уровнем энергии электрического разряда.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Получение в переходном режиме от сжатия сильноточными Z–пинчами алюминиевых однокаскадных многопроволочных сборок к сжатию вольфрамовых однокаскадных многопроволочных сборок практически такой же мощности и длительности импульса излучения, как и при сжатии чисто вольфрамовых сборок с теми же параметрами, при содержании по массе вольфрама в сборке не более 25-30%, объясняется уменьшением времени передачи энергии от ионов к электронам, за счет наличия в плазме пинча высокой концентрации более легких ионов алюминия.

- Получение при сжатии двухкаскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада повышенной полной и удельной (на единицу длины) мощности излучения сильноточного Z-пинча достигается за счет увеличения доли тока протекающего по внутреннему каскаду с уменьшенной индуктивностью и сжатием магнитного потока при взаимодействии каскадов сборки на этапе пинчевания.

- Эффективность передачи энергии в схеме композитного Z- пинча от внешней низкоиндуктивной токовой оболочки в «файбер» низкой начальной плотности из агар-агара содержащий KCl, объясняется высокой электронной теплопроводностью в отсутствие замагниченности электронов;

- Зависимость КПД преобразования электрической энергии в энергию ВУФ излучения при пробое по поверхности изолятора в вакууме для различных геометрий разряда объясняется соотношением сопротивления разряда по сравнению с волновым сопротивлением разрядного контура.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- полученная при сжатии двухкаскадная нагрузка с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада повышенной полной и удельной (на единицу длины) мощности излучения сильноточного Z-пинча позволяет при одной и той же мощности излучения снизить требования к электрической мощности используемых импульсных генераторов мегаамперных токов;

- предложенная схема статического «хольраума» с двухкаскадной сборкой с использованием обнаруженного эффекта увеличения роли влияния магнитного поля тока внутреннего каскада на динамику взаимодействия внешней ускоренной оболочки с внутренним каскадом, удерживающим статический «хольраум», перспективна для зажигания мишени в статическом «хольрауме», так как позволяет преобразовать практически всю кинетическую энергию внешней ускоренной оболочки в облучение мишени мягким рентгеновским излучением от двух образующихся приэлектродных пинчей;

- выявленные особенности разрядов микросекундной длительности по поверхности изолятора в вакууме, позволяют оценивать параметры таких источников ВУФ излучения с различными геометриями электродов и уровнем энергии электрического разряда;

- разработанный радиационный фольговый калориметр со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системой регистрации сигнала может быть использован для измерения абсолютных потоков излучения и энергии, переносимой плазменными потоками различных импульсных источников излучения в условиях высокого уровня электромагнитных наводок.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, проводящих исследования по физике высоких плотностей энергий и экстремального состояния вещества, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, в Национальном исследовательском университете «МИФИ», в НИЦ «Курчатовский институт», во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается проведением измерений на современном поверенном оборудовании при использовании проверенных ранее методик, анализом погрешностей измерений, согласием результатов, полученных различными методиками. Измерения проводились на большом количестве экспериментов и показали хорошую воспроизводимость основных стадий формирования сильноточного Z - пинча для различных вариантов применяемых нагрузок, а также их согласие с разработанными теоретическими представлениям.

Личный вклад соискателя состоит в развитии конкретных направлений в рамках обозначенной тематики работы, постановке экспериментов. Разработка экспериментальных установок и их реализация, подбор соответствующего экспериментального оборудования проходили при определяющем участии автора. Автор принимал активное участие в проведении основных экспериментальных исследований, а также анализе и интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 24 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 14.10.2026г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, либо решение научной проблемы, имеющей важное политическое, социально-экономическое, культурное или хозяйственное значение, либо новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны присудить Волкову Георгию Степановичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 25 человек, из них очно: 8 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 8 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 4 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 24, против 1, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
академик РАН

Петров О.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.
14.10.2026г.