



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021

Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17

post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>

ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998, ИНН 7802072267, КПП 780201001

№ _____
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
доктор физ.-мат. наук



П.Н. Брунков

«06» _____ 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию

АМИРОВА Владислава Харисовича

«Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

в диссертационный совет 24.1.162.01 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики

им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

Актуальность темы диссертации

Инжекция мощных пучков высокоэнергичных атомов изотопов водорода в настоящий момент считается основным методом дополнительного нагрева, применяемым в установках с магнитным удержанием плазмы. Инжекция является эффективным способом, который позволяет обеспечить нагрев и стабилизацию плазмы, генерацию в ней безындукционного тока, а также может использоваться в диагностических целях. При этом оснащение установок инжекторами быстрых атомов является сложной инженерной задачей. Дооснащение существующих установок усложняет задачу в связи с необходимостью интеграции устройства и его систем в существующую инфраструктуру. Целью работы диссертанта В.Х. Амирова было создание инжектора для токамака TCV, построенного в Федеральной политехнической школе Лозанны (EPFL, Швейцария) в 1992 году. Дооснащение существующего токамака комплексом нейтральной инжекции существенно расширяет экспериментальные возможности установки по проведению исследований

в области управляемого термоядерного синтеза и обосновывает актуальность решаемой диссертантом задачи. При непосредственном участии В.Х. Амирова был разработан инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов с энергией 30 кэВ, мощностью 1 МВт и длительностью импульса 2 с. Применение многоцелевой трехэлектродной ионно-оптической системы со сферическими электродами позволило сформировать пучок быстрых атомов эллиптического поперечного сечения и обеспечить его ввод в разрядную камеру токамака через существующий прямоугольный порт размерами 170 × 200 мм.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе В.Х. Амировым получен ряд новых результатов, вносящих существенный вклад в разработку инжекторов атомов высокой энергии для комплексов дополнительного нагрева в установках с магнитным удержанием плазмы.

Впервые разработана, изготовлена и экспериментально испытана многоцелевая ионно-оптическая система со сферическими электродами для формирования первичного ионного пучка мощностью 1,4 МВт и длительностью 2 с. Система обеспечивает надежное формирование и фокусировку пучка в отсутствие активного охлаждения сеток. Устойчивость системы к развитию термодформаций достигнута за счет специальных конструктивных решений, позволивших снизить жесткость электродов на периферии эмиссионной области.

Впервые разработан, изготовлен и испытан в эксперименте полномасштабный калориметр, предназначенный для поглощения пучков полной мощности и длительности. Его приемное устройство состоит из пластин, снабженных специальными интенсификаторами теплообмена, которые существенно увеличивают эффективность съема тепла за счет закручивания потока охлаждающей воды, что делает возможным работу устройства при плотностях мощности до 2,5 кВт/см².

В разработке и создании инжектора быстрых атомов диссертантом применена методика программного моделирования систем инжектора, позволяющая оценивать величины напряженности и деформаций в элементах конструкции на стадии проектирования. Благодаря этому удалось обойтись без дорогостоящих и длительных циклов разработки "проектирование – изготовление – испытание" и существенно сократить срок создания инжектора.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы достаточно четко и хорошо согласуются с основными результатами работы, изложенными в диссертации. Их достоверность подтверждена как авторством В.Х. Амирова в основных публикациях, так и проверкой в последующих экспериментах на токамаке TCV (EPFL, Швейцария) с использованием разработанной автором аппаратуры. Основные результаты работы были доложены на ряде международных конференций.

Практическая ценность результатов

Для диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, особенно важна практическая значимость или прикладной характер полученных результатов. Практическая значимость данной работы заключается в создании и экспериментальной верификации моделей систем инжектора атомарного пучка мегаваттного уровня мощности для нагрева плазмы. Результаты диссертационной работы могут быть полезны для разработчиков инжекторов атомов как для действующих в настоящий момент, так и проектируемых термоядерных установок.

Разработанная и опробованная методика использования программного моделирования режимов работы электродов позволяет сократить время проектирования и уменьшить затраты на изготовление и испытания опытных образцов элементов ионно-оптической системы источника ионов. Технические решения, примененные в конструкциях электродов, будут полезны для снижения уровня деформаций электродов при тепловом расширении. Комплекс технологических решений, опробованных в данной работе, может быть использован в производстве многоапертурных электродов со сферическими поверхностями для обеспечения баллистической фокусировки пучка.

Предложенная конструкция калориметра, а также методика программного моделирования, использованная при его разработке, могут быть применены для создания приемников интенсивных пучков ионов и атомов с плотностями мощностей на поверхности принимающего устройства до $2,5 \text{ кВт/см}^2$ и являться основой для дальнейших разработок.

Содержание диссертации и замечания по диссертационной работе

Диссертационная работа В.Х. Амирова состоит из введения, пяти глав, заключения, изложена на 126 страницах, включает 95 иллюстраций и 4 таблицы, содержит 88 наименований библиографии и два приложения. Во Введении обсуждается актуальность создания инжекторов быстрых атомов с баллистической фокусировкой пучка для термоядерных исследований. Приведено краткое описание принципов работы инжектора атомарного пучка. Обсуждены задачи, которые требовалось решить для создания инжектора мегаваттного уровня мощности. В первой главе диссертации кратко представлено описание токамака TCV, предназначенного для исследований высокотемпературной плазмы. Обсуждаются детали технического задания на разработку инжектора, в том числе: мощность пучка быстрых атомов и энергия частиц, требования к инжекционным портам, возможные габаритные размеры инжектора и место расположения на токамаке. Во второй главе рассматривается ионный источник инжектора, основными элементами которого являются плазменный эмиттер и ионно-оптическая система (ИОС). Для формирования интенсивного пучка большого сечения используется плазменный ВЧ эмиттер. ИОС обеспечивает формирование пучка и его баллистическую фокусировку за счет сферической формы эмиссионных областей электродов. ИОС состоит из трех многоапертурных электродов, эмиссионные области которых сформированы отверстиями щелевой формы с различными профилями каналов. Основу главы составляют результаты, полученные при разработке и изготовлении многощелевых электродов сферической формы. В третьей главе диссертации обсуждается вакуумная система инжектора, которая должна обладать достаточной производительностью и обеспечивать откачку основных потоков газа, сопутствующих получению пучка. Подробно обсуждаются конструкции вакуумной камеры инжектора и криогенного насоса. В четвертой главе описаны элементы пучкового тракта инжектора, которые обеспечивают преобразование первичного ионного пучка в пучок быстрых атомов и отделяют от него непerezарядившиеся ионы. Пятая глава диссертации посвящена разработке и созданию калориметра, формулируются общие требования к таким устройствам и возможные пути повышения поглощаемой ими мощности. Для увеличения интенсивности теплообмена в каналы теплообменников было предложено установить завихрители. В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

К диссертационной работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. На стр. 23 утверждается, что для обеспечения требуемого ионного тока первичного пучка "необходима эмиссионная площадь, образованная массивом щелевых отверстий в круге диаметром 250 мм". При этом упускаются из рассмотрения вопросы, связанные с прозрачностью электродов и плотностью извлекаемого тока.

2. В п. 2.1.2.1. "Расчет элементарной ячейки ИОС" обсуждается вопрос угловой расходимости пучка от плотности тока, приводятся результаты расчетов для 30 и 35 кВ. При этом упускаются из рассмотрения режимы работы при более низком ускоряющем напряжении (от 15 кВ – см. табл. 1.1). Также в рассмотрении отсутствуют пояснения относительно используемого коэффициента пересчета 0,865 для многокомпонентного пучка D_1^+ , D_2^+ , D_3^+ и не приводится информация, как проводились измерения компонентного состава.

В конце раздела утверждается, что "расчетная плотность тока значительно отличается от экспериментальной, при этом V-образная зависимость сохраняется, и все точки кривой смещаются в область меньших плотностей тока на одинаковую величину". Было бы правильным привести в диссертации эти экспериментально измеренные зависимости или хотя бы дать ссылку на соответствующую работу. Далее бездоказательно утверждается, что "снижение плотности тока по сравнению с расчетной на 5% обуславливается неоднородностями плазменного эмиттера, на 30% – потерей частиц на краях эмиссионного отверстия".

3. На стр. 30 говорится, что "специалистами ИЯФ СО РАН принято, что величины тепловых мощностей, прикладываемых к плазменному и вытягивающему электродам, следует принимать равными 1% от мощности первичного ионного пучка [42]". Указана некорректная ссылка, которая относится к работе японских авторов 1980 г.

4. При описании в главе 5 разработанного калориметра было бы полезно провести сравнение с аналогичными устройствами, работающими на других установках, указав преимущества и недостатки, если есть, разработанной конструкции. Например, чем калориметр TCV отличается от, на первый взгляд, похожего калориметра токамака JET?

Также в тексте диссертации имеется ряд неточностей и опечаток:

- на стр. 21 указана длина концов стягивающих шпилек 19,5 и 22,5 мм, а на рис. 2.6 – только 19,5 мм;
- на стр. 53 ошибочно указано, что в случае применения щелевых отверстий "теплоотвод осуществляется только в двух направлениях – поперек и вдоль щелей". Теплоотвод поперек щелей затруднен – только вдоль!;
- на стр. 111 вместо ссылки на работу [81] дана ссылка на работу [82].

Сделанные в отзыве замечания не имеют принципиального значения для положительной оценки диссертации В.Х. Амирова.

Заключение семинара Лаборатории физики высокотемпературной плазмы

1. Диссертация В.Х. Амирова представляет собой законченный научно-квалификационный труд по одному из актуальных направлений – разработка инжекторов мощных пучков атомов высокой энергии для исследований в области управляемого термоядерного синтеза. В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача – создан инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой, который по своим характеристикам является уникальным в области техники инжекторов пучков быстрых атомов высокой интенсивности и отвечает требованиям эксперимента на токамаке TCV, о чем имеется соответствующий акт (Приложение 1 к диссертации). Полученные в рамках диссертационной работы результаты могут быть

использованы при проектировании инжекторов для других установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы.

2. Содержание диссертационной работы В.Х. Амирова «Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой» соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

3. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК и полностью отражает содержание диссертации.

4. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, в том числе из Перечня ВАК, а также неоднократно докладывались на международных конференциях. Зарегистрирован патент на изобретение «Ионно-оптическая система источника ионов» (Приложение 2 к диссертации).

5. Диссертация В.Х. Амирова «Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Амиров Владислав Харисович безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв подготовил: кандидат физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории физики
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Тел.: +7 (812) 297-54-16
E-mail: Vladimir.Minaev@mail.ioffe.ru



Минаев Владимир Борисович

Материалы диссертации были доложены на семинаре Лаборатории физики высокотемпературной плазмы Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Отзыв на диссертацию В.Х. Амирова рассмотрен и одобрен на семинаре Лаборатории физики высокотемпературной плазмы 26 апреля 2024 г. На заседании присутствовало 19 чел., из них 3 доктора физ.-мат. наук, 8 кандидатов физ.-мат. наук, 1 кандидат тех. наук. Заключение принято большинством голосов: «за» – 18, «против» – 0, «воздержался» – 1.

Заведующий лабораторией физики
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
доктор физ.-мат. наук, профессор
Тел.: +7 (812) 292-73-89
E-mail: Evgeniy.Gusakov@mail.ioffe.ru



Гусаков Евгений Зиновьевич

Подписи Минаева В.Б. и Гусакова Е.З. заверяю:
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
кандидат физ.-мат. наук



Патров Михаил Иванович

« 06 » мая 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26
Тел.: +7 (812) 297-22-45
Эл. почта: post@mail.ioffe.ru
Сайт организации: <https://www.ioffe.ru>