

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Скальги Вадима Александровича

на диссертационную работу

Амирова Владислава Харисовича

«Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой»,

представленную 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

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность работы:

Исследования по программе управляемого термоядерного синтеза (УТС) дали мощный толчок к развитию физики и техники в широком спектре направлений, где потребовалась разработка устройств с принципиально улучшенными характеристиками. Сегодня инжекция нейтральных атомов рассматривается как один из основных методов нагрева плазмы в установках УТС, в том числе на установках масштаба ИТЭР. Выдающиеся успехи сотрудников Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в этой области широко известны во всем мире. Именно исследованиям в этой актуальной области и посвящена диссертация В.Х. Амирова.

Наряду с разработками новых подходов и методов генерации пучков быстрых атомов важнейшей задачей является создание устройств с заданными характеристиками, высокой надежностью и ресурсом для продолжительного использования в составе исследовательских установок УТС. Все методики, запланированные к использованию на флагманских установках, в обязательном порядке должны быть предварительно опробованы в рамках подготовительных или направленных на решение более частных задач экспериментов. В работе В.Х. Амирова была решена сложная физико-техническая задача разработки, изготовления и ввода в эксплуатацию системы нагрева плазмы пучками быстрых атомов для токамака TCV в Федеральной политехнической школе Лозанны. В результате было создано надежное устройство с характеристиками, соответствующими лучшим аналогам, которое дополнительно отвечает крайне жестким требованиям на габариты, обусловленным компактностью уже существующего токамака и дефицитом свободного места на

экспериментальной площадке. Разработанные В.Х. Амировым уникальные технические решения, несомненно, будут эффективно применяться и в дальнейших разработках систем нагрева плазмы данного типа.

Перечисленные тезисы подтверждают факт того, что тема диссертационной работы В.Х. Амирова является важной и актуальной.

Новизна подхода и основные результаты:

Научная новизна и значимость полученных автором результатов состоит, прежде всего, в разработке и успешном применении оригинальных технических решений, которые в результате позволили создать комплекс для нагрева плазмы на токамаке TCV методом инжекции быстрых атомов.

Впервые разработана и эффективно применена многощелевая ионно-оптическая система со сферическими электродами, обеспечившая формирование ионного пучка с мощностью 1,4 МВт при длительности импульса 2 с в условиях отсутствия активного охлаждения.

Впервые разработан, изготовлен и экспериментально испытан полномасштабный калориметр, обеспечивающий измерение характеристик пучка в условиях полной мощности и длительности. Результат стал возможным благодаря использованию в конструкции системы охлаждения специально рассчитанных интенсификаторов теплообмена. Итоговая конструкция позволяет работать при плотности потока энергии до $2,5 \text{ кВт/см}^2$.

Достоверность полученных результатов:

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и представлены в 4 научных статьях в международных и российских журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России). Также важно отметить наличие патента РФ, полученного на один из ключевых элементов разработки – ионно-оптическую систему источника ионов.

Наиболее показательным свидетельством достоверности полученных результатов является приведенный на предпоследней странице диссертации акт использования инжектора на токамаке TCV в Федеральной политехнической школе Лозанны. В акте отмечается полное соответствие инжектора требованиям технического задания, его продолжительная и надежная работа, а также важная роль В.Х. Амирова в успешном выполнении всех работ, как главного конструктора проекта.

Практическая значимость полученных автором результатов:

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики высокотемпературной плазмы. Без всякого сомнения можно утверждать, что найденные автором технические решения будут применяться при разработке и изготовлении систем нагрева плазмы и для других экспериментальных установок.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Работа выстроена логично, ее структура и содержание отражают цели и задачи исследования. Работа представляется законченным научным трудом, отличающимся подробным изложением всех аспектов разработки в физическом, техническом и инженерном планах. В работе проведен полный комплекс разработки и создания конечного требуемого устройства, который включал в себя разработку ионного источника, криогенного вакуумного насоса, нейтрализатора пучка, системы сепарации, калориметра, а также испытание всех элементов и пусконаладку комплекса в целом.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Первая глава имеет исключительно вводный характер, посвящена описанию общей схемы устройства инжектора пучка быстрых атомов и его характеристик в соответствии с потребностями токамака TCV.

Вторая глава посвящена разработке источника ионов с баллистической фокусировкой, подробно описывает процесс разработки и итоговую конструкцию изоляторного узла, электродов ионно-оптической системы, плазменного ВЧ эмиттера. Одним из ярких результатов главы является оригинальная конструкция электродов с азимутальными прорезями, которые позволили работать ионному источнику в режиме контролируемой деформации элементов ионно-оптической системы, имеющих лишь периферийное охлаждение. Результат стал возможен благодаря эффективному применению современных численных методов, позволивших оптимизировать конструкцию при работе с цифровой моделью.

Третья глава посвящена описанию вакуумной системы инжектора пучков быстрых атомов. В главе приводятся подробные данные о конструкции крионасоса, обсуждается задача его экранировки. Автором диссертационной работы проведены все необходимые оценки требуемой производительности вакуумной системы, определена подходящая конструкция криогенной части.

Четвертая глава описывает основные элементы пучкового тракта инжектора. Описана конструкция и определены требуемые характеристики нейтрализатора. Представлена подробная информация о поворотном магните, необходимом для сепарации заряженных примесей из пучка нейтральных атомов, подробно описана технология изготовления катушек поворотного магнита. В главе разобраны режимы работы приемников неперезарядившихся частиц, приведены оценки термических нагрузок, предложены соответствующие конструкционные решения.

Пятая глава работы посвящена отдельно калориметру, который является наиболее сложным элементом пучкового тракта. Автору удалось разработать систему, позволяющую получать информацию о характеристиках пучка в условиях работы при полной мощности и длительности импульса (1 МВт, 2 с). Оригинальная конструкция приемных пластин калориметра обеспечила возможность работы при предельных значениях интенсивности тепловыделения до $2,5 \text{ кВт/см}^2$. Достижение таких характеристик стало возможным благодаря вводу в каналы охлаждения специализированных интенсификаторов теплообмена спиральной формы. Оптимизация конструкции данных элементов также была реализована методами численного моделирования при использовании передового программного обеспечения.

Результаты В.Х. Амирова, изложенные в диссертации, являются, несомненно, новыми и обладают большой научной значимостью, соответствуют мировому уровню исследований в области разработки инжекторов пучков быстрых атомов.

Замечания и пожелания:

Как и любая большая работа представленная диссертация имеет ряд незначительных недостатков.

В диссертации упоминается о важности оптимизации основных параметров плазмы в ионном источнике, концентрации ионов и электронной температуры, на странице 15 даже вводятся обозначения для них. Однако в работе нигде не приводятся данные об их характерных значениях.

Автором работы активно и эффективно использованы современные программные пакеты для моделирования физических систем, расчета нагрузок, полей и транспорта частиц. Однако в ходе конструирования ионно-оптической системы моделирование ограничено расчетами отдельных элементарных ячеек. С учетом растущих вычислительных мощностей, было бы очень интересно посмотреть и обсудить результаты полного трехмерного моделирования всего формируемого пучка ионов. Возможно, с применением такого подхода могут открыться дополнительные

возможности для оптимизации ключевого элемента всего инжектора, определяющего характеристики итогового пучка.

В.Х. Амировым предложены технические решения, позволившие ряду элементов системы стабильно работать в условиях интенсивных воздействий потоков частиц с высокими энергиями, приемные панели калориметра и системы сепарации заряженных частиц. Кажется уместным обсудить или как-то прокомментировать ресурс работы столь нагруженных элементов.

Также отмечу ряд замечаний к оформлению диссертации. Первая глава состоит всего из четырех страниц и больше подходит в роли части введения. В конце каждой из глав было бы уместно привести краткую формулировку основных результатов. В списке литературы ссылки приведены в различных форматах, что затрудняет пользование данным разделом рукописи.

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают важности и достоверности полученных в диссертации В.Х. Амирова результатов. В целом, диссертационная работа производит очень хорошее впечатление.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Автореферат удачно наполнен ключевыми иллюстрациями, что позволяет получить достаточно полное представление о выполненной работе и ее основных результатах.

Заключение оппонента по диссертации В.Х. Амирова на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Амирова Владислава Харисовича «Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с разработкой инжекторов пучков быстрых атомов для нагрева плазмы в установках УТС.

Диссертационная работа В.Х. Амирова «Инжектор пучка быстрых атомов с баллистической фокусировкой» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Амиров Владислав Харисович

заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Скалыга Вадим Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Амирова Владислава Харисовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Скалыга Вадим Александрович
Доктор физико-математических наук
Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,
Профессор РАН,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
тел.: +7 (915) 949-27-11
эл. почта: skalyga@ipfran.ru
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»
Заместитель директора по научной работе

«20» мая 2024 г.

 В.А. Скалыга

Подпись В.А. Скалыги заверяю,
Ученый секретарь ИИФ РАН



 И.В. Корюкин