

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

кандидата физико-математических наук Кашука Юрия Анатольевича

на диссертацию **НЕСЕНЕВИЧА Владислава Георгиевича**

### **«Исследование особенностей применения диагностики по потокам атомов из плазмы в термоядерном реакторе ИТЭР»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы» в диссертационный совет Д 002.205.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

### **Актуальность избранной темы**

Диагностический метод по потокам атомов, впервые разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, широко применяется в исследованиях высокотемпературной плазмы. Диагностика основана на регистрации атомов, возникающих при захвате ионами плазмы электронов в результате перезарядки или фоторекомбинации, создавая уникальную возможность анализировать функции распределения ионов плазмы, являющихся термоядерным топливом. Экспериментальные результаты, применяемой диагностики, позволяют определять изотопный состав топлива – параметр необходимый для управления зажиганием и горением термоядерной плазмы.

Диссертационная работа В.Г. Несеневича посвящена исследованиям особенностей применения диагностики по потокам атомов из плазмы в термоядерном реакторе ИТЭР.

В экспериментальной части работы выполнены исследования характеристик критических элементов системы диагностики по потокам атомов при работе в условиях характерных для токамака-реактора ИТЭР. Проведены испытания таких элементов диагностики как детекторы атомных анализаторов, система контроля качества обдирочных мишеней, ускорительный модуль анализатора LENPA.

Вторая часть диссертационной работы В.Г. Несеневича сфокусирована на исследованиях определения эффективности удержания альфа-частиц в плазме ИТЭР по измерениям потоков нейтрализованных ионов отдачи МэВ-ного диапазона, измерения изотопного соотношения топливных ионов с учетом инжекции нейтральных нагревных и диагностического пучков, а также влияния инжекции топливных пеллет на потоки атомов дейтерия и трития, испускаемых термоядерной плазмой установки.

Разрабатываемый комплекс диагностики по потокам атомов входит в группу диагностических систем ИТЭР, главными задачами которых являются измерение основных параметров плазмы с целью контроля режима работы установки и защита реактора от аварий.

Необходимость создания новых приборов для ИТЭР обусловлена особенностями работы термоядерного реактора. Наличие высокого уровня нейтронного фона и сопутствующего гамма-излучения, магнитного поля и др. – всё это накладывает специальные требования к применяемой аппаратуре и методам работы с ней с точки зрения надежности её работы.

С учетом вышеизложенного, создание современного комплекса диагностики по потокам атомов для международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, безусловно, является актуальной научно-технической задачей.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации представляются научно обоснованными.

Проведенные испытания элементов системы диагностики по потокам атомов для токамака-реактора ИТЭР показали, что применение оптимизированных сцинтилляционных детекторов с кристаллами CsI(Tl) позволяет осуществлять регистрацию потоков атомов во всем энергетическом диапазоне атомных анализаторов LENPA и HENPA в течение всего периода работы установки. Продемонстрирована принципиальная возможность реализации метода оперативного контроля целостности и толщины обдирочных мишеней анализаторов. Показано, что для сохранения работоспособности ускорителя анализатора LENPA в условиях ИТЭР давление азота в изолирующем объеме ускорителя должно составлять не менее 5,0 атм.

Разработанная автором модель удержания альфа- частиц в плазме ИТЭР показала, что интенсивность потока нейтрализованных ионов отдачи достаточна для надежного выделения сигнала на уровне нейтронного фона. Результаты моделирования показали, что форма энергетического спектра и величина потока нейтрализованных ионов отдачи зависят от времени удержания быстрых ионов в плазме, что позволяет оценивать время удержания альфа-частиц с помощью диагностики по потокам атомов.

Определен диапазон энергий, доступный для измерения изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов в рабочих режимах ИТЭР с учетом инжекции нейтральных нагревных и диагностического пучков. Показано, что инжекция дейтериевых нагревных пучков приводит к появлению существенного фонового сигнала и сужает энергетический диапазон измерения изотопного отношения топливных ионов с помощью анализатора LENPA до энергий  $\leq 50$  кэВ. Вместе с тем показано, что наличие пучков не оказывает влияния на измерение изотопного отношения анализатором HENPA в области энергий  $\geq 0.9$  МэВ, соответствующих центральной зоне плазмы.

Проведенный анализ влияния инжекции топливных пеллет на потоки атомов дейтерия и трития, показавший, что инжекция топливных пеллет со стороны сильного магнитного поля оказывает влияние на сигналы диагностики. При этом временной анализ сигналов, регистрируемых после инжекции пеллеты, позволяет сделать выводы о величине дрейфа материала пеллеты в направлении большого радиуса плазмы.

### **Достоверность и новизна полученных результатов**

Достоверность теоретической части работы основана на применении программных кодов, описанных в ведущих научных изданиях, верифицированных и широко используемых в экспериментах на всех современных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы.

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечена применением надежной современной аппаратуры и апробированных методик измерений.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

Теоретическая значимость работы В.Г. Несеневича заключается в развитии моделей удержания альфа-частиц и ионов плазмы при инжекции нейтральных пучков и топливных пеллет в дейтерий-третиевой плазме ИТЭР.

Практическая значимость работы В.Г. Несеневича состоит в отработке и реализации технических и конструкторских решений при проектировании элементов комплекса атомных анализаторов на токамаке ИТЭР. Метод оценки эффективности удержания альфа-частиц будет использован в ИТЭР для оперативного контроля режима горения разряда.

Результаты анализа влияния инъекции нейтральных пучков и топливных пеллет будут учтены при измерении изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Диссертационная работа В.Г. Несеневица представлена на 128 страницах, содержит 68 иллюстраций, 3 таблицы и 73 наименования использованной литературы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение и список цитируемых публикаций.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует положения, выносимые на защиту, и приводит краткое содержание диссертации.

В первой главе представлен обзор существующих методов определения изотопного состава высокотемпературной плазмы. Рассмотрены традиционные способы измерения и новые методы, оценены преимущества и ограничения, присущие каждому методу, а также возможности и перспективы их применения на ИТЭР.

Во второй главе представлено описание комплекса диагностики по потокам атомов экспериментального токамака-реактора ИТЭР. Основная часть этой главы посвящена проводившимся экспериментальным работам: выбор типа детекторов атомных анализаторов, радиационные испытания детекторов, разработка метода контроля параметров обдирочных мишеней анализаторов, испытания ускорительного модуля анализатора LENPA.

В третьей главе представлены результаты анализа работы диагностики атомов перезарядки для изучения удержания термоядерных  $\alpha$ -частиц ИТЭР. Приведены результаты численного моделирования потоков нейтральных атомов, возникающих после нейтрализации тепловых ионов плазмы при лобовых столкновениях с  $\alpha$ -частицами, являющимися продуктами термоядерной реакции.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию особенностей измерения изотопного соотношения с помощью диагностики по потокам атомов ИТЭР: рассмотрено влияние инъекции нагревных и диагностического пучков атомов; определен энергетический диапазон, в котором анализаторы смогут измерять изотопное соотношение топлива токамака-реактора; рассмотрена возможность мониторинга изотопного соотношения при инъекции пеллет.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

**Личный вклад** В.Г. Несеневица в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Диссертация В.Г. Несеневица производит хорошее впечатление высоким научным уровнем и объемом проделанной работы. Основные достоинства работы отмечены в предыдущих разделах. Тем не менее, следует отметить некоторые недостатки в представлении и оформлении диссертации.

1. Изложение краткого содержания диссертации во введении представляется излишним. Вместо этого следовало бы сформулировать основные цели работы, научную новизну и практическую ценность результатов исследований, как это сделано в автореферате.
2. Экспериментальные результаты, представленные во второй главе, должны быть подвергнуты дополнительному критическому анализу, поскольку данные приведены без указания погрешности измерений.
3. Положения, вынесенные на защиту, представлены в виде описания выполненных работ, сформулированы в общем виде и не содержат конкретный достигнутый результат. С таким положением сложно вести научную дискуссию или оппонировать им. В тоже время необходимо отметить, что в заключении диссертации приведен перечень основных результатов работы в виде четко

сформулированных и обоснованных выводов, подтверждающих защищаемые положения.

Сделанные замечания отнюдь не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом, которую, безусловно, следует отнести к научному труду, выполненному на высоком научном уровне.

#### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат В.Г. Несеневича соответствует содержанию диссертационной работы и требованиям, предъявляемым к авторефератам, как по части содержания, так и по части оформления.

#### **Заключение**

Представляемая диссертационная работа прошла серьезную апробацию, её результаты докладывались на российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты исследований неоднократно обсуждались на совещаниях экспертов по диагностике в рамках международной рабочей группы по физике токамаков ИТРА (International Tokamak Physics Activity).

Диссертация В. Г. Несеневича представляет собой законченное научное исследование, в котором содержатся результаты особенностей применения диагностики по потокам атомов из плазмы в международном термоядерном экспериментальном реакторе ИТЭР.

Работа полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы», установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации, Несеневич Владислав Георгиевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент: Кашук Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, 01.04.08 – Физика плазмы, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Почтовый адрес:

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12.

Электронный адрес: [kasch@triniti.ru](mailto:kasch@triniti.ru), тел. 8 495 841 50 58.

Название организации:

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», начальник лаборатории

\_\_\_\_\_ (подпись)

\_\_\_\_\_ (инициалы, фамилия)

Подпись Ю.А. Кашука заверяю

Учёный секретарь  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
кандидат физ.-мат. наук  
Электронный адрес:

\_\_\_\_\_ А.А. Ежов

15 февраля 2017 г.