

# ОТЗЫВ

---

официального оппонента Кутеева Бориса Васильевича,  
доктора физико-математических наук, профессора, заместителя руководителя  
отделения токамаков ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт»,  
почтовый адрес 123182 Москва, Площадь академика Курчатова дом. 1, телефон  
+7 499 1967001, электронная почта [Kuteev\\_BV@nrcki.ru](mailto:Kuteev_BV@nrcki.ru),

на диссертационную работу Корнева Владимира Александровича

**«Исследование удержания быстрых ионов в компактном токамаке ТУМАН-3М с помощью измерения потоков нейтронов»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

1. Актуальность избранной темы.

Оптимизация дополнительного нагрева плазмы и генерации тока в токамаках является одной из важнейших проблем физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Использование инжекции атомарных пучков высокой энергии относится к наиболее перспективным способам решения проблемы в реакторах-токамаках. Развитие сопутствующих диагностических методов дополняет актуальные задачи исследования в указанной области. В число наиболее информативных методов наблюдений захвата, удержания и дальнейшей термализации быстрых частиц пучка в плазме входит нейтронная диагностика.

Диссертация Корнева В.А. посвящена решению указанных выше принципиальных и актуальных проблем физики плазмы токамаков, а именно: изучению физических механизмов захвата и удержания плазмой токамака быстрых ионов, образующихся при взаимодействии высокоэнергичного атомарного пучка дейтерия с дейтериевой плазмой компактного токамака. В результате работы, выполненной на токамаке ТУМАН-3М, были получены новые экспериментальные данные о процессах, происходящих в тороидальной высокотемпературной плазме с магнитным удержанием, разработаны оригинальные методы идентификации основных механизмов потерь быстрых ионов, использующие зависимости интенсивности генерации нейтронов DD-синтеза от параметров плазмы, инженерных характеристик установки, а также системы инжекционного нагрева и генерации тока.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,  
сформулированных в диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций представленной работы базируется на широком диапазоне знаний автора о состоянии исследований в выбранной области, детальном сопоставлении собственных данных с результатами других научных групп, подтверждении нейтронных измерений характеристик быстрых ионов численным моделированием и другими методами диагностики. Представленный анализ результатов поддержан выбором соответствующих теоретических и экспериментальных подходов к

решению поставленных в работе задач, а также учетом известных научных и технологических знаний о физике токамака, систем его диагностики и нагрева. Результаты диссертации описаны ясно и подробно. Положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации представляются достаточно обоснованными.

### 3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Приведенный в главе 1 обзор литературы по исследованиям инжекционного нагрева и генерации тока в токамаках дает достаточно полное представление о современном состоянии работ в области исследований диссертанта.

В главах 2, 3 и 4 диссертации приведены и анализируются результаты измерения нейтронного выхода в разрядах с инжекционным нагревом плазмы на установке токамак ТУМАН-3М. Представленные данные описаны детально и существенно расширяют исследованную область рабочих режимов с пучковым нагревом малых токамаков.

При проведении экспериментов были реализованы новые конфигурации установки, систем инжекции, диагностики и сбора экспериментальных данных. В результате существенно улучшились параметры системы нагрева. Модернизация обеспечила калориметрические измерения коэффициента нейтрализации пучка ионов в рабочем диапазоне мощности, а также зондовые измерения профиля пучка, измерения энергетического и массового состава пучка по интенсивности свечения доплеровских линий  $D_{\alpha}$ .

Новая схема измерения интенсивности нейтронного потока, образующегося в результате  $DD$ -реакции, использующая детекторы из  ${}^3\text{He}$ -газоразрядного счетчиков и полиэтиленовых замедлителей, позволила зарегистрировать нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ. Описанный в работе метод расчета интегрального нейтронного выхода по данным разработанной диагностики позволил надежно регистрировать эволюцию нейтронного потока во время разряда установки при значениях нейтронного выхода до  $10^{11} \text{ с}^{-1}$ .

В экспериментах на ТУМАН-3М было впервые обнаружено насыщение роста ионной температуры с ростом инжектируемой мощности. Указанный эффект потребовал более детального анализа захвата и удержания быстрых ионов в широком диапазоне параметров плазмы и пучка.

Численный код, описывающий траектории быстрых ионов в заданной магнитной конфигурации ТУМАН-3М, позволил впервые определить зоны захвата быстрых частиц и долю мощности пучка, поглощенную в плазме установки и оценить плотность плазмы, при которой потери мощности пучка на пролет несущественны ( $> 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Таким образом, были определены условия достижения максимальной эффективности нагрева и генерации тока при использовании компактного токамака, оборудованного нейтральной инжекцией, в качестве источника термоядерных нейтронов.

Новые данные о влиянии тороидального магнитного поля и плазменного тока на интенсивность генерации нейтронов показали, что при энергии пучка выше 23 кэВ происходит насыщение нейтронного выхода. Для наращивания нейтронного выхода при больших энергиях требуется увеличение максимальных значений магнитного поля и тока на токамаке ТУМАН-

ЗМ. В экспериментах время термализации быстрых ионов соответствует вычисленному в предположении торможения за счет кулоновских столкновений.

Впервые были зарегистрированы эффекты на нейтронном выходе при изменении большого радиуса плазменного шнура. Смещение плазмы внутрь заметно увеличивает нейтронный выход, что объясняется ростом интенсивности вследствие улучшения условий захвата быстрых частиц инжектируемого пучка, снижения содержания примесей и торможения пучка на электронах.

Реализованный в диссертации подход к моделированию выхода нейтронов с помощью кода ASTRA и определению эмпирической зависимости (скейлинга) от параметров плазмы и нагревного пучка нейтралов использует методы регрессионного анализа. Отклонения от предсказаний кода обнаружены при более высоких энергиях пучка. Различие расчетных и экспериментальных зависимостей объяснено уменьшением плотности дейтериевой компоненты в результате роста эффективного заряда, либо появлением дополнительного канала потерь быстрых частиц пучка.

#### 4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Научная значимость результатов работы определяется потребностями расширения диапазона параметров термоядерных установок токамак в сторону реализации рабочих условий с генерацией нейтронов в реакциях ядерного синтеза. Полученные автором результаты существенно дополняют ранее проведенные экспериментальные и расчетные исследования по генерации нейтронов с использованием пучков быстрых ионов. Они расширяют знания об указанных процессах в токамаках и развивают возможности их наблюдения с использованием новых методов. Следующие результаты автора входят в число основных:

- создан комплекс инжекционного нагрева для исследования генерации нейтронов и физики взаимодействия быстрых частиц с плазмой компактного токамака;

- разработана и реализована нейтронная диагностика для диапазона энергий 1-10 МэВ, соответствующего регистрации нейтронов DD-синтеза;

- исследованы параметрические зависимости удержания быстрых ионов с энергией до 24 кэВ

- экспериментально обоснован скейлинг для нейтронного выхода в зависимости от параметров магнитной конфигурации и нагревного пучка.

#### 5. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

Диссертация посвящена актуальной теме, существенной для развития термоядерных систем и нейтронных источников на основе токамака. Она написана ясным языком, теоретические и экспериментальные подходы к решению поставленных задач достаточно полно обоснованы. Разработанные методы моделирования и диагностики оригинальны и соответствуют современным требованиям.

Замечания по диссертации:

1. Желательно было бы дополнить обзор выводами и увязать с постановкой задачи.
2. Использованный термин «длина свободного пробега» – лучше заменить на «длина ионизации или перезарядки».
3. Имея на руках полученную базу экспериментальных данных и учитывая важность безиндукционной генерации тока нагревными пучками для достижения длительной работы токамаков, автор мог бы уделить определенное внимание влиянию нагрева на длительность разряда.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации. Выполнив большой объем исследований, Корнев В.А. показал себя квалифицированным специалистом, одинаково хорошо владеющим экспериментальными и расчетными методами.

## 6. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация представляет собой добротное исследование в рамках актуальной научной проблемы. В лице диссертанта мы имеем высококвалифицированного специалиста, владеющего современными методами измерений и обработки их результатов. Результатами исследований внесен заметный вклад в отечественные исследования высокотемпературной плазмы токамаков. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях, включая публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертация, без сомнения, отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Содержание диссертации соответствует тексту опубликованных работ и тексту автореферата. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертант Корнев Владимир Александрович заслуживает присвоения искомой степени.

Доктор физико-математических наук, профессор,  
Зам. руководителя отделения токамаков  
ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт»

  
Кутеев Борис Васильевич

20.05.2019

Подпись д.ф.-м.н., профессора Б.В. Кутеева заверяю,  
Главный ученый секретарь  
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»  
Доктор физ.-мат наук

  
Форш П.А.