

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Дмитрия Викторовича Юрова
**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ DOL И РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ
ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКИ**

по специальности 01.04.08 — физика плазмы,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа представляет собой подробное теоретическое и расчетное исследование свойств высокотемпературной плазмы, удерживаемой в открытых магнитных ловушках – мощных термоядерных источниках нейтронов. Исследована кинетика частиц, ее влияние на макроскопические параметры плазмы и интенсивность ядерных реакций. Для проведения расчетов разработаны и реализованы необходимые численные алгоритмы, проведена их проверка, применение для расчетов, а также оптимизации ловушек.

Актуальность и новизна работы определяются значительным прогрессом в достижении высоких параметров плазмы, удерживаемой в современных магнитных ловушках в ИЯФ СО РАН. Помимо рекордных значений давления плазмы (бета), недавно была получена и рекордная для открытых систем электронная температура [P.A. Bagryansky *et al* 2015 *Nucl. Fusion* **55** 053009]. На основе полученных достижений развивается программа по созданию магнитных ловушек следующего поколения, сочетающих преимущества существующих систем, а также программа реализации мощного термоядерного источника быстрых нейтронов для практических приложений в ядерной энергетике. Существенная часть представленной работы посвящена именно получению и оптимизации параметров термоядерного источника нейтронов, что имеет крайне важное практическое значение для развития и реализации физико-технических решений замкнутого ядерного топливного цикла.

В работе развита пространственная нестационарная кинетическая модель процессов взаимодействия инжектируемых высокоэнергетичных пучков частиц с основной плазмой, удерживаемой в ловушке. Учитывается

продольная неоднородность параметров плазмы и магнитного поля, а также временная зависимость мощности инжекции, что делает возможным проведение моделирования и вычислений параметров плазмы в условиях экспериментальных наблюдений. По сравнению с уже существующими и применяемыми для такого моделирования численными кодами, предложенный и реализованный в данной работе алгоритм имеет преимущества, обусловленные одновременно и более точным учетом кинетических эффектов в релаксации пучка быстрых частиц, и пространственной неоднородности удерживаемой плазмы.

Разработанный код включает баланс энергии и частиц плазмы, при этом возможно анализировать как гидродинамический режим удержания, так и адиабатический. Кроме того, код позволяет проводить расчеты для инжекции пучка высокой интенсивности, когда плотности быстрых частиц и ионов плазмы сравнимы, а также учитывать влияние большого ларморовского радиуса ионов пучка на интенсивность термоядерных реакций. Данные особенности детального учета физических процессов кинетики частиц удерживаемой плазмы важны для оптимизации нейтронного источника, что определяет существенную практическую значимость работы.

Результаты работы опубликованы в многочисленных научных изданиях, а также представлены на большом количестве ведущих тематических конференций. Результаты работы изложены в 6 научных статьях ведущих научных журналах, среди которых есть даже Успехи физических наук [Юров Д В, Приходько В В 2014 *УФН* **184** 1237] и Nuclear Fusion [D.V. Yurov and V.V. Prihodko 2016 *Nucl. Fusion* **56** 126003] – ведущий российский физический журнал и ведущий мировой журнал по физике плазмы и термоядерному синтезу. При этом абсолютно очевиден определяющий вклад автора в эти работы, содержащие результаты по развитию и оптимизации параметров гибридных систем синтез-деление на основе исследуемых термоядерных источников нейтронов.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, а также приложений.

Во введении обосновывается актуальность тематики работы, формулируется постановка задачи, излагаются основные положения.

Первая глава содержит описание разработанного численного алгоритма кода DOL, исходные уравнения для описания кинетики частиц с усреднением по времени отражения от пробок. Приводится описание столкновений на основе потенциалов Трубникова-Розенблюта, учета взаимодействия с атомарной компонентой, приводится баланс энергии и частиц, а также описывается алгоритм учета влияния большого ларморовского радиуса на интенсивность реакций синтеза.

Вторая глава содержит описание результатов расчетов с помощью разработанного кода DOL, их применение для описания получаемых (на установке ГДЛ) экспериментальных результатов, а также сравнения с расчетами по уже существующим и применяемым кодам. Приводятся результаты сравнения различных форм интеграла столкновений на результаты расчетов.

Третья глава посвящена расчетам, а также оптимизации параметров термоядерного источника нейтронов основе открытой ловушки. Проводится сравнительный анализ гибридных систем на основе протонных ускорителей и на основе открытых ловушек – существующей ГДЛ, а также проектируемой перспективной – ГДМЛ. Проведены серии расчетов параметров термоядерного источника нейтронов на основе данных открытых ловушек, построена численная модель для оптимизации этих параметров и получены результаты оптимизации в зависимости от различных параметров, в частности, режимов удержания и нагрева.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении излагаются детали расчетов, в частности, процедуры оптимизации, а также подробные данные вычислений.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

К замечаниям по тексту работы можно отнести следующее

1. В разделе 2.3. проводится сравнение результатов расчетов с интегралом столкновений, предложенным в данной работе, с расчетами на основе других форм интеграла столкновений. Получена зависимость мощности реакций синтеза ядер дейтерия от отношения температуры электронов к энергии инжектируемых атомов дейтерия. Для разных интегралов столкновений получено отличие, особенно заметное при больших электронных температурах. Не вполне ясно, с чем физически связано это отличие, в частности, определяется ли оно меньшей скоростью релаксации пучка, которая наиболее точно описывается в предложенном в данной работе интеграле столкновений.

2. В главе 2 приводится сравнение результатов расчетов параметров плазмы по разработанному алгоритму, с результатами других кодов для описания экспериментальных результатов. Отмечается, что результаты могут отличаться на десятки процентов. Однако точность экспериментальных измерений параметров плазмы, в том числе в крупных установках магнитного удержания, редко превышает десятки процентов. В этой связи указанные расхождения в расчетах выглядят находящимися за пределами точности измерений.

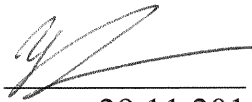
3. В разработанном коде учитывается влияние большого ларморовского радиуса ионов пучка на уменьшение интенсивности реакций синтеза. При этом особенность разработанного кода и проводимых расчетов – в возможности учета большой плотности ионов пучка и учете реакций синтеза при столкновениях ионов пучка. Желательно было бы указать, каким образом учитывается роль большого ларморовского радиуса в случае сравнимых плотностей быстрых и фоновых ионов.

4. Есть некоторые неточности в тексте и обозначениях, и опечатки.

Вместе с тем, приведенные замечания, разумеется, не имеют принципиального характера, и не умаляют высокого уровня работы и полученных в ее рамках научных результатов.

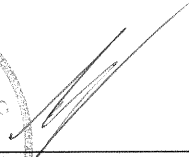
Диссертация Дмитрия Викторовича Юрова на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи определения свойств плазмы, удерживаемой в перспективных магнитных ловушках, и оптимизации мощного источника нейтронов на их основе, которая имеет существенное значение для физики удержания плазмы в магнитном поле и ее ядерно-физических приложений, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения 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 заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент:
старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук
к.ф.-м.н.
Михаил Михайлович Цвентух
119991 Москва, Ленинский проспект 53
+7 499 1326846
Электронный адрес: elley@list.ru


29.11.2016

и.о. ученого секретаря
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук
к.ф.-м.н.
Андрей Владимирович Колобов




29.11.2016