

*На правах рукописи*

**ЮРОВ Дмитрий Викторович**

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ DO<sub>L</sub>  
И РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ  
ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКИ**

**01.04.08 – физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК-2016**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

**ПРИХОДЬКО** — кандидат физико–математических наук,  
Вадим Вадимович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

**ЦВЕНТУХ** — кандидат физико–математических наук,  
Михаил Михайлович Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. Г. И. Лебедева РАН, г. Москва, старший научный сотрудник.

**ИВАНОВ** — доктор физико–математических наук,  
Валентин Яковлевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

**ВЕДУЩАЯ** — Федеральное государственное бюджетное  
**ОРГАНИЗАЦИЯ** образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», г. Москва.

Защита диссертации состоится « 28 » декабря 2016 г. в « 12:15 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, расположенного по адресу:

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

С конца 70-х годов XX века в ИЯФ СО РАН проводятся исследования газодинамической открытой ловушки (ГДЛ) для удержания высокотемпературной плазмы, концепция которой была впервые изложена в работе [1]. Помимо перспективы создания термоядерного реактора на основе ГДЛ, с самого начала экспериментальных и теоретических исследований также рассматривалась идея ее использования в качестве мощного термоядерного источника нейтронов (ИН).

С конца 80-х годов в рамках исследований концепции ГДЛ был разработан ряд численных моделей, пригодных как для сопровождения экспериментов ГДЛ, так и для оценки параметров ИН на ее основе. В них как правило предполагалось, что быстрые ионы с существенно немаксвелловским распределением представляют собой малую добавку к фоновой плазме, а эффективная длина свободного пробега фоновых ионов  $\lambda_{eff} = \lambda_{ii} \ln R_{max}/R_{min}$  (здесь  $R_{max}$  — максимальное пробочное отношение в ловушке,  $\lambda_{ii}$  — длина свободного пробега иона относительно кулоновского рассеяния) много меньше длины установки  $L$ . Однако в современных экспериментах ГДЛ быстрые ионы вносят гораздо более существенный вклад (соотношение плотностей фоновой плазмы  $n_c$  и быстрых частиц  $n_f$  в центральном сечении ловушки  $n_f/n_c \sim 1$ ), что, по-видимому, будет верным и для мощных ИН на ее основе. При экспериментальных параметрах установки ГДЛ, достигнутых в настоящее время, эффективная длина свободного пробега фоновых ионов сравнима по порядку величины с длиной ловушки, и речь идет скорее об удержании фоновых частиц в режиме, переходном между газодинамическим и адиабатическим. Кроме этого, в ряде случаев (например, в моделях, описанных в работах [2, 3, 4]) не учитывалась аксиальная неоднородность параметров плазмы.

Соображения, описанные выше, привели к задаче разработки новой математической модели и соответствующего кода, учитывающих современное состояние газодинамической ловушки. Дополнительным требованием к коду стали малое время вычислений для возможности проведения оптимизационных расчетов при проектировании модификаций ГДЛ и приложений на ее основе и возможность расчета нестационарных состояний плазмы, что необходимо для моделирования проводимых на установке экспериментов. Наконец, в рамках численной модели требовалось предусмотреть возможность оценки параметров осесимметричных открытых ловушек с улучшенным продольным удержанием. В частности, речь идет о концепции газодинамической многопробочной ловушки

(ГДМЛ) [5], экспериментальная апробация которой планируется в рамках проекта ГОЛ–NB [6].

С другой стороны, в настоящее время актуален вопрос о возможности создания на основе газодинамической ловушки ИН для подкритических гибридных систем (ГС), поскольку последние обладают рядом потенциальных преимуществ перед традиционными реакторами в рамках задачи замыкания ядерного топливного цикла. Это, в частности, возможность работы с топливными составами с малой долей запаздывающих нейтронов и возможность достижения предельной скорости дожигания младших актинидов (около 45 кг вещества в расчете на ТВТ·ч тепловой энергии, выделяемой в реакторной сборке) [7]. Вопрос о возможности создания ИН на основе газодинамической ловушки для подкритической гибридной системы можно сформулировать как задачу определения коэффициента полезного действия реакций синтеза, достижимого в источнике, при условии выполнения физических ограничений, обеспечивающих правдоподобие искомых конфигураций ИН.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы стало решение двух задач:

1. Построение численной модели и реализация кода на ее основе с учетом требований, определенных выше.
2. Проведение параметрической оптимизации источника нейтронов на основе открытой осесимметричной ловушки, предназначенного для использования в подкритической гибридной системе.

Помимо построения модели и ее реализации в программном коде, первая задача также подразумевала сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными установки ГДЛ и данными, полученными с помощью моделей, использовавшихся ранее. В рамках решения второй задачи на предварительном этапе было необходимо определить требования к ИН гибридной системы. Параметрический анализ проводился с использованием систематических методов оптимизации (в частности, с использованием метода дифференциальной эволюции [8]). В процессе оптимизации на параметры плазмы в ловушке накладывались ограничения, обеспечивающие физическое правдоподобие искомых конфигураций ИН.

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность первой из задач исследования определяется необходимостью численного сопровождения экспериментов на установке ГДЛ, а

также необходимостью оценки параметров плазмы в предполагаемых модификациях и приложениях газодинамической ловушки. Актуальность параметрического анализа ИН на основе газодинамической ловушки для подкритичных гибридных систем определяется перспективностью применения ГС в рамках задачи замыкания ядерного топливного цикла.

### **Научная новизна**

Научная новизна представляемой диссертационной работы состоит в создании и применении более совершенных средств и методов вычислений для нахождения параметров ИН на основе ГДЛ и, соответственно, уточнении результатов, полученных ранее. Численная модель DOL, созданная в результате выполнения первой задачи диссертационной работы, позволяет учесть зависимость характеристик плазмы от положения вдоль оси симметрии ловушки в отличие от нуль-мерных моделей [2, 4, 3]. В отличие от системы ITCS [9] в DOL предусмотрен расчет потерь частиц и энергии как для газодинамического, так и адиабатического режимов продольного удержания. Наконец, еще одной отличительной особенностью численной модели является более точная аппроксимация взаимодействия быстрых ионов с плазмой, учитывающая влияние профиля функции распределения быстрых частиц по энергии на коэффициенты торможения и диффузии в пространстве скоростей.

С другой стороны, несмотря на обилие публикаций, касающихся оптимизации ИН на основе ГДЛ — в пример можно привести публикации [10, 4, 11, 12, 13, 14, 15, 16] — подавляющее большинство работ не использовало систематических алгоритмов оптимизации для нахождения конфигурации ИН, наилучшим образом отвечающей заданному приложению, будь то задачи материаловедения или замыкания ядерного топливного цикла. В работе [2] (единственной из использовавших систематические методы оптимизации, известной автору настоящей диссертации) для расчета параметров плазмы в ИН применялась упрощенная нуль-мерная модель, не учитывавшая, к примеру, процесс прямого нагрева фоновых ионов быстрыми частицами (в рамках настоящей диссертационной работы проведено сравнение результатов расчетов с помощью кода DOL с данными работы [2]).

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая и практическая значимость работы определяется как развитыми средствами моделирования, так и полученными результатами вычислений. Разработанный код DOL был применен для расчета энергетического спектра продольного потока ионов из установки ГДЛ и интер-

претации соответствующих экспериментальных данных [17], для вычисления параметров установки ГДЛ после предполагаемой модернизации ее системы нагрева [18] и оценки предполагаемых параметров плазмы в установке ГОЛ–NB [6]. Методику параметрической оптимизации, использованную в настоящей работе, также можно использовать при проектировании различных модификаций и приложений ГДЛ. К примеру, методика расчетов и код DOL были использованы в работе [19] для оценки характеристик D–D источника нейтронов, предназначенного для исследований характеристик ториевого топлива. Наконец, результаты расчетов, полученные в настоящей работе, необходимо учитывать при создании ИН на основе ГДЛ или ГДМЛ для приложений атомной энергетики или для материаловедческих задач. Полученные аппроксимации зависимости КПД реакций синтеза в источнике нейтронов от длины источника и мощности нагрева плазмы могут быть использованы для быстрой оценки сверху достижимого КПД реакций синтеза в D–T ИН с длиной порядка нескольких десятков метров и мощностью нагрева плазмы в диапазоне 20 – 200 МВт.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Создана численная нестационарная модель плазмы в осесимметричной открытой ловушке. В модели используются кинетическое уравнение для функции распределения быстрых (плещущихся) ионов с усреднением по баунс–орбитам и уточненным приближением интеграла столкновений для расчета процессов взаимодействия быстрых ионов с плазмой; уравнение для расчета самосогласованного магнитного поля; уравнения баланса частиц и энергии фоновой плазмы, пригодные для расчета параметров фоновой плазмы в газодинамическом, адиабатическом и промежуточном режимах продольного удержания; уравнения для описания взаимодействия атомов с плазмой; уравнения для расчета скорости ядерных реакций синтеза с учетом эффекта конечного размера ларморовских орбит быстрых ионов. На основе численной модели реализован код DOL.
- Проведен сравнительный анализ приближений, используемых при вычислении коэффициентов торможения и рассеяния быстрых ионов, на примере расчета характеристик плазмы в ловушке, параметрически близкой к установке ГДЛ. Установлено, что использование уточненного вида интеграла приводит к отличию скорости D–D реакции синтеза в 1.3–2 раза от расчета с интегралом столкно-

вений в приближении релаксации пучка быстрых ионов в холодной плазме. Указанное расхождение наблюдается, когда отношение температуры электронов к энергии инжектируемых быстрых частиц превышает 0.05, а плотность быстрых частиц близка к плотности фоновых ионов.

- В результате сравнительного анализа данных, полученных с помощью кода DOL и использовавшейся ранее нуль-мерной модели, уточнены результаты предыдущих расчетов мощности реакций синтеза в материаловедческом источнике нейтронов на основе ГДЛ с использованием нуль-мерной модели. Указанное уточнение получено в коде DOL при учете продольной неоднородности параметров плазмы и влияния эффекта конечного размера ларморовских орбит быстрых ионов на скорость реакций синтеза.
- В результате параметрической оптимизации установлено, что в рамках построенной модели коэффициент полезного действия источника нейтронов на основе газодинамической ловушки достигает 0.05 при длине источника порядка нескольких десятков метров, мощности нагрева плазмы не более 200 МВт, максимальном значении напряженности магнитного поля не более 15 Т, относительном давлении плазмы по вакуумному магнитному полю не более 0.5, соотношении расчетных времен продольного удержания фоновых ионов в газодинамическом и адиабатическом режимах около единицы. При тех же условиях коэффициент полезного действия реакций синтеза в источнике нейтронов на основе газодинамической многопробочной ловушки с коэффициентом подавления продольных потерь, равным 10, достигает 0.2.

### **Апробация результатов и публикации**

Материалы диссертации опубликованы в четырнадцать печатных работах, из них шесть статей в рецензируемых журналах и восемь тезисов докладов. Основные результаты докладывались на ряде всероссийских и международных конференций, в том числе на IX международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (9th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement), Цукуба, Япония; VI всероссийском семинаре “Физические и Технические Аспекты Объемного Источника Нейтронов для Материаловедческих, Технологических Исследований и Решения Задач Ядерной Энергетики” (VNS), Звенигород, Россия; XVII международной конференции по новым системам для атомной энергетики (17th International Conference on Emerging

Nuclear Energy Systems), Стамбул, Турция; XI международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement), Новосибирск, Россия.

### **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы, если не оговорено обратное. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 122 страницы, из них 116 страниц текста, включая 19 рисунков, 10 таблиц и 2 процедуры. Библиография включает 49 наименований на 6 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** подробно описана численная нестационарная модель плазмы в открытой ловушке с одной магнитной ямой. Рассматриваемая математическая задача содержит в себе следующие основные компоненты:

- Моделирование распределения быстрых частиц, создаваемых с помощью нагревных инжекторов, с использованием метода баунс-усреднения
- Вычисление характеристик распределений электронов и фоновых ионов с учетом энергообмена между компонентами плазмы и продольных потерь частиц и энергии
- Моделирование процессов взаимодействия плазмы с атомарным газом
- Вычисление скорости реакций синтеза в установке с учетом конечного размера ларморовских орбит быстрых ионов

В модели предполагается, что  $\tau_{ci}, \tau_{\parallel} \ll \tau_d, \tau_s, \tau_{ex}$ , где  $\tau_{ci}$  – время циклотронного вращения,  $\tau_{\parallel}$  – время баунс-колебаний,  $\tau_d, \tau_s, \tau_{ex}$  – характерные времена торможения, рассеяния и перезарядочных потерь быстрых ионов. По этой причине функция распределения быстрых ионов в рамках расчетов усредняется по орбитам циклотронного вращения и баунс-колебаний. Помимо этого, считается, что функция распределения быстрых ионов слабо меняется на пространственных размерах порядка ларморовского радиуса, а электростатические потенциалы много меньше характерных энергий быстрых частиц. Также используется предположение об аксиальной симметрии задачи.

В рамках модели DOI учитываются кулоновские взаимодействия быстрых ионов между собой, а также с фоновыми ионами и электронами. При вычислении коэффициентов взаимодействия быстрых частиц друг с другом функция распределения рассеивающих частиц считается изотропной в пространстве скоростей, т. е. зависит только от координаты вдоль оси ловушки  $z$  и модуля скорости  $v$ ,  $f = f(v, z)$ . При вычислении коэффициентов взаимодействия фоновых частиц с быстрыми ионами введены следующие предположения. Во-первых, скорость быстрых ионов  $v_f$  полагается конечной относительно тепловой скорости фоновых ионов  $v_{Ti}$ . Во-вторых, предполагается, что  $v_f \ll v_{Te}$ , где  $v_{Te}$  – тепловая скорость электронов. Наконец, вклад электронов в угловое рассеяние быстрых частиц полагается пренебрежимо малым.

Квазистационарное магнитное поле ловушки определяется из соотношения поперечного равновесия в параксиальном приближении,  $B_v = B\sqrt{1+\beta_{\perp}}$ , где  $\beta_{\perp}$  – поперечное относительное давление плазмы по возмущенному магнитному полю  $B$ ,  $B_v$  – значение магнитного поля в отсутствии плазмы.

В результате взаимодействия плазмы с атомарными пучками нагретых инжекторов возникает популяция нейтральных частиц, а для ионов (как быстрых, так и фоновых) появляется дополнительный фактор стока за счет их перезарядки и дальнейшего вылета из плазмы. Для учета этих процессов в модели DOI предусмотрено решение кинетического уравнения для функции распределения нейтральных частиц и вычисление потоков заряженных частиц, обусловленных взаимодействием плазмы с атомами. Вводятся следующие предположения. Во-первых, время установления равновесного распределения нейтральных частиц много меньше характерных времен протекания плазменных процессов. Во-вторых, скорость быстрых частиц много больше характерных скоростей как фоновых ионов, так и нейтральных частиц, генерируемых фоновой компонентой плазмы. В-третьих, быстрые частицы имеют равномерное

распределение по полоидальной координате  $\phi$ , а по азимутальному углу распределение описывается дельта-функциональной зависимостью. Взаимодействие нейтралов с плазмой происходит в месте расположения атомарных инжекторов, а значение азимутального угла  $\theta_\alpha$  определяется наклоном атомарного инжектора. В-четвертых, фоновые заряженные и нейтральные частицы имеют максвелловские распределения по скоростям, причем для частиц одного сорта температуры совпадают.

В модели DOL возможен расчет параметров плазмы для двух существенно различных режимов удержания фоновых ионов, каждый из которых подразумевает рассмотрение газодинамического и адиабатического приближения движения частиц. В первом из режимов предполагается монотонный спад напряженности магнитного поля и амбиполярного потенциала за пробкой. В газодинамическом приближении предполагается, что на участке, близком к пробке, реализуется бесстолкновительное движение ионов. Такой режим удержания был ранее описан в работе [20] и соответствует инжекции фоновых ионов за точкой остановки быстрых частиц, так как не учитывает влияния амбиполярного потенциала, создаваемого быстрыми ионами в центральной ячейке ловушки, на темп продольных потерь теплой плазмы. В настоящей работе выводы работы [20] были обобщены на случай различающихся температур фоновых ионов и электронов и небольших пробочных отношений. В предельном случае адиабатического движения характерные времена удержания оцениваются согласно формуле Будкера [21].

В другом режиме удержания предполагается наличие максимумов амбиполярного потенциала, способствующих удержанию фоновых ионов. В целом рассмотрение такого режима аналогично работе [2], в которой использовались аналитические аппроксимации как для адиабатического, так и газодинамического случая движения частиц, описанные в работе [22]. Однако формула для приближения частых столкновений при движении ионов из [22] опять же была обобщена на случай отличных от единицы пробочных отношений запирающего пробкотрона и небольших (порядка электронной температуры) амплитуд запирающего амбиполярного потенциала.

Промежуточные режимы с  $\lambda \lesssim L$ , аналогично работе [2], аппроксимируются в модели с помощью простых формул

$$\tau_{res} = \sum_k \tau_k, \quad \langle E \rangle_{res} = \frac{\sum_k \langle E \rangle_k \cdot \tau_k}{\tau_{res}},$$

где  $\tau_k$ ,  $\langle E \rangle_k$  — характерные время потерь и средняя выносимая энергия

согласно режиму течения  $k$ . При этом амбиполярный и пробочный режимы удержания в модели рассматриваются раздельно, т. е. суммируются либо времена для приближения удержания пробками, либо времена для приближения удержания амбиполярными потенциалами.

Квазистационарные распределения плотностей фоновых ионов и электронов, а также электростатический потенциал вдоль ловушки находятся из системы уравнений, определяемой бoльцмановским распределением и квазинейтральностью.

Описанная модель основана на более ранней одномерной модели, разработанной Ю.А. Цидулко.

**Вторая глава** посвящена результатам тестовых расчетов с помощью разработанного кода, необходимых, с одной стороны, для проверки корректности работы кода и, с другой, для объяснения значимости его усовершенствований относительно программного обеспечения, использовавшегося ранее для расчета параметров ИН на основе газодинамической ловушки.

Для проверки корректности работы кода DOL было использовано сравнение с экспериментальными данными установки ГДЛ и результатами расчетов с помощью кода MCFIT, являющегося частью программного обеспечения ITCS [9]. В частности, были проведены вычисления основных показателей плазмы по данным работы [23], описывающей один из экспериментов ГДЛ с мощностью инжекции  $P_{inj} \approx 4$  МВт и достижением температуры электронов  $T_e \approx 100$  эВ. Также был проведен расчет скорости реакции синтеза D(d,p)T для условий эксперимента ГДЛ, описанного в [24]. В результате сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных было установлено, что построенная численная модель с удовлетворительной точностью описывает основные физические особенности газодинамической ловушки.

В рамках тестирования кода DOL был воспроизведен расчет параметров источника нейтронов на основе ГДЛ для материаловедческих исследований, ранее описанный в работе [2]. Основные характеристики ИН, полученные в исходном расчете (ИН-0) и с помощью кода DOL (ИН-Б), представлены в таблице 1. Согласно полученным результатам основной параметр ИН — мощность реакций синтеза в расчете на погонный метр длины установки  $P_l$  — для варианта ИН-Б оказывается в три–пять раз ниже, чем в исходном варианте ИН-0. Причиной расхождения является существенное отличие характерного времени торможения быстрых частиц на электронной компоненте плазмы  $\tau_d$ , которое определяется методикой вычисления для случая нуль-мерной и одномерной моделей. В случае нуль-мерной модели характерное время торможения вычислялось

исходя из параметров плазмы на однородном участке магнитного поля. С другой стороны, в одномерной модели используется баунс-усредненное время торможения, учитывающее вариацию плотности электронов вдоль оси ловушки. В результате параметр  $\tau_d$  для конфигураций, рассчитанных с помощью разных моделей, отличается в 1.5 – 2 раза. Описанное различие приводит к снижению плотности быстрых частиц в 1.5 раза в области остановки. Помимо этого, согласно проведенным расчетам, учет конечного размера ларморовских орбит быстрых частиц приводит к дополнительному двадцатипятипроцентному снижению мощности нейтронной генерации.

Таблица 1. Значения параметров плазмы для конфигураций источника нейтронов, рассчитанных с помощью нуль-мерной модели [2] (ИН-0) и кода DOL (ИН-Б). Величины, помеченные знаком \*, относятся к области остановки быстрых частиц. Характерное время торможения на электронах,  $\tau_d$ , приведено для популяции быстрых дейтронов.  $n_f$  и  $n_c$  обозначают плотность быстрых и фоновых ионов соответственно.

Параметр	ИН-0	ИН-Б	Параметр	ИН-0	ИН-Б
$T_e$ , кэВ	1.0	1.1	$T_c$ , кэВ	0.88	0.82
$n_f^*$ , $10^{13}$ см $^{-3}$	28.6	19.3	$n_c^*$ , $10^{13}$ см $^{-3}$	2.6	2.9
$\tau_d$ , мс	16	9.5	$P_l^*$ , МВт/м	0.51	0.17

Также во второй главе на примере расчета характеристик плазмы в открытой ловушке, параметрически близкой к ГДЛ, был проведен анализ влияния приближений, используемых при вычислении коэффициентов рассеяния и торможения быстрых ионов за счет кулоновских взаимодействий между собой. Помимо варианта интеграла столкновений, предложенного в первой главе диссертации и обозначаемого далее как “СИ-Е”, в сравнение были включены:

- Интеграл столкновений для описания релаксации пучка быстрых ионов в холодной фоновой плазме согласно работе [2], обозначаемый далее как “СИ-0”.
- Интеграл столкновений для описания взаимодействия быстрых ионов с максвеллизированной плазмой, обозначаемый далее как “СИ-М”.

Значение отношения электронной температуры к энергии инжекции,  $T_e/E_{inj}$ , в рамках численного эксперимента менялось в диапазоне от 0.01 до 0.2, а влияние того или иного приближения оценивалось по относительной мощности реакций синтеза  $D(d,n)^3$  He в установке. Результаты

вычислений приведены на рисунке 1. Как следует из приведенного рисунка, при отношении  $T_e/E_{inj} > 0.05$  отличия между приближениями “CI-E” и “CI-0” приводят к отличию мощности реакций синтеза в 1.3 – 2 раза.

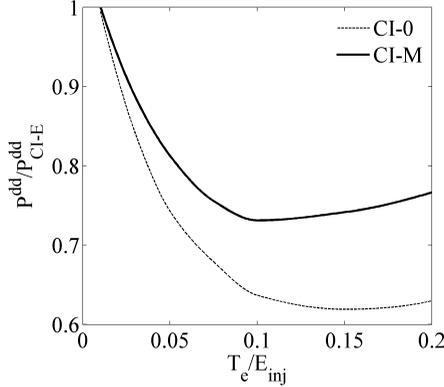


Рис. 1. Зависимость нормированной мощности реакции синтеза  $D(d,n)^3He$  в открытой ловушке от соотношения температуры электронов  $T_e$  и энергии инжектируемых быстрых частиц  $E_{inj}$ ,  $P^{dd}(T_e/E_{inj})/P_{CI-E}^{dd}(T_e/E_{inj})$ . Здесь  $P_{CI-E}^{dd}$  – зависимость мощности реакции синтеза для приближения интеграла столкновений “CI-E”.

**Третья глава** диссертации была посвящена результатам моделирования параметров источника нейтронов на основе ГДЛ и ГДМЛ. Целью описываемого численного эксперимента было определение максимально достижимого КПД генерации термоядерных нейтронов  $Q_{eng} = P_{fus}/P_{grid}$  в ИН на основе открытой ловушки с газодинамическим или переходным режимом удержания фоновой плазмы (здесь  $P_{fus}$  – мощность реакций синтеза в ловушке,  $P_{grid}$  – мощность от электросети, затрачиваемая на питание элементов ИН). В качестве основного приложения ИН рассматривалась генерация нейтронов для подкритичной гибридной системы–дожигателя. Назначение источника нейтронов обуславливало базовую конфигурацию источника нейтронов и требования к его КПД.

Общая схема источника нейтронов, использованная при вычислениях, соответствовала приведенной на рисунке 2. Инжекторы нагретых пучков предполагалось расположить под прямым углом к линиям магнитного поля в точках с пробочным отношением  $R_{inj} > 1$ , в то время как подкритичная сборка должна была располагаться в области квази–однородного магнитного поля около центральной плоскости ловушки.

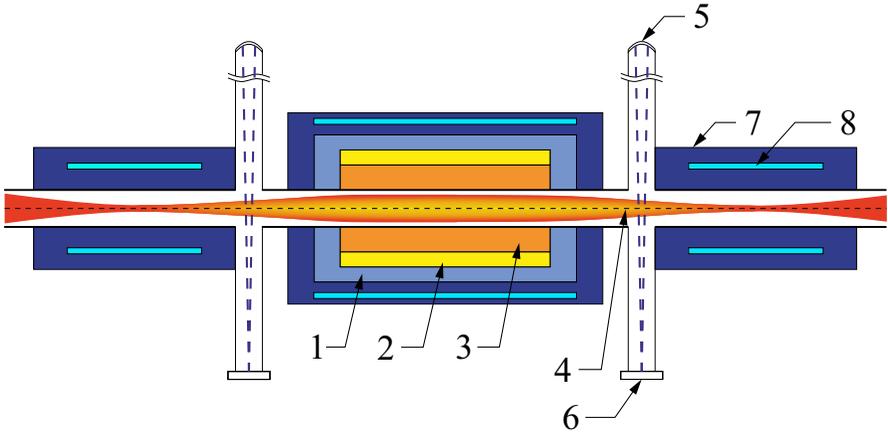


Рис. 2. Схема подкритичной системы типа “деление–синтез” с ИН на основе открытой ловушки. 1 – отражатель, 2 – литиевый бланкет для наработки трития, 3 – подкритичная активная зона, 4 – плазма, 5 – нагревной инжектор, 6 – приемник пучков, 7 – нейтронная защита, 8 – сверхпроводящие магнитные катушки.

Напряженность магнитного поля в ловушке была ограничена значением 15 Т.

Проводимые вычисления были разделены на четыре серии. В каждой из них использовались следующие ограничения на параметры плазмы. Во-первых, поперечное относительное давление плазмы  $\beta_{\perp}$  не должно было превышать единицу. Значение  $\beta_{\perp} = 1$  соответствует относительному давлению плазмы по вакуумному магнитному полю  $\beta_{\perp,v} = 0.5$ , достигнутому в экспериментах на установке ГДЛ [25]. Во-вторых, коэффициент захвата атомарного пучка в плазму  $\gamma = P_{cap}/P_{inj}$  был ограничен уровнем 0.9 (здесь  $P_{cap}$  – захваченная мощность пучка,  $P_{inj}$  – инжектируемая мощность пучка). Помимо этого, на фоновую ионную компоненту было наложено условие вида

$$\tau_{kin} \leq k \cdot \tau_{gd}, \quad (1)$$

где  $\tau_{kin}$  – характерное время удержания в адиабатическом режиме,  $\tau_{gd}$  – характерное время удержания в газодинамическом режиме. Условие 1 с  $k = 1$  было принято в качестве основного варианта ограничений параметров фоновой плазмы как для расчетов ИН на основе ГДЛ, так и для расчетов ИН на основе ГДМЛ.

Первая из серий расчетов, “GDT-0”, была посвящена выяснению зависимости кпд реакций синтеза от условий, налагаемых на теплую плазму, для ИН на основе ГДЛ. Она включала в себя четыре расчета с коэффициентами  $k$  выражения 1, равными 1, 2, 5 и  $\infty$ . В серии вычислений “GDMT-0” были проведены оптимизационные расчеты параметров ИН на основе ГДМЛ. Серия включала в себя расчеты с коэффициентом подавления продольных потерь, равным 5, 10 и 20. Длина и мощность питания источников нейтронов, рассматривавшихся в сериях GDT-0 и GDMT-0, составляли  $L_0 = 20$  м и  $P_{grid,0} = 125$  МВт соответственно.

Две оставшиеся серии расчетов, “NS-L” и “NS-P”, предназначались для оценки зависимости кпд термоядерных реакций от длины ИН и полной мощности нагрева плазмы. При расчетах ИН на основе ГДМЛ в рамках этих двух серий использовался коэффициент подавления продольных потерь, равный 10. В серии NS-P полная мощность питания систем нагрева менялась в диапазоне от 25 до 175 МВт, в то время как остальные параметры базовой конфигурации источника нейтронов оставались неизменными. В расчетах серии NS-L длина ловушки варьировалась в диапазоне от 10 до 100 м. При этом предполагалось, что мощность питания систем нагрева  $P_{grid}$  пропорциональна корню из длины ловушки,  $P_{grid}/\sqrt{L} = P_{grid,0}/\sqrt{L_0} = const$ .

В результате вычислений серий NS-L и NS-P для зависимости максимального кпд ИН от мощности питания и длины установки была получена степенная аппроксимация вида

$$Q_{eng} \approx Q_0 \cdot L^X \cdot P_{grid}^Y, [L] = \text{м}, [P_{grid}] = \text{МВт}. \quad (2)$$

Параметры аппроксимации  $Q_0, X, Y$  представлены на рисунке 3.

Рассмотренные конфигурации ИН продемонстрировали эффективность генерации нейтронов, достаточную для их использования в качестве нейтронных драйверов подкритичных гибридных систем для дожигания младших актинидов. Для конфигураций источника нейтронов на основе ГДМЛ расчетный кпд составил 0.1–0.2. Исходя из оценок, проведенных в третьей главе, эти величины обеспечивают равную или большую эффективность производства нейтронов в расчете на джоуль затраченной мощности электросети в сравнении с мощными электроядерными источниками нейтронов. В случае ИН на основе ГДЛ характерные значения кпд реакций синтеза находятся в диапазоне 0.03–0.05. По этой причине более целесообразно рассматривать приложение источников нейтронов на основе ГДЛ к материаловедческим задачам или к задаче создания пилотного проекта подкритичной гибридной системы.

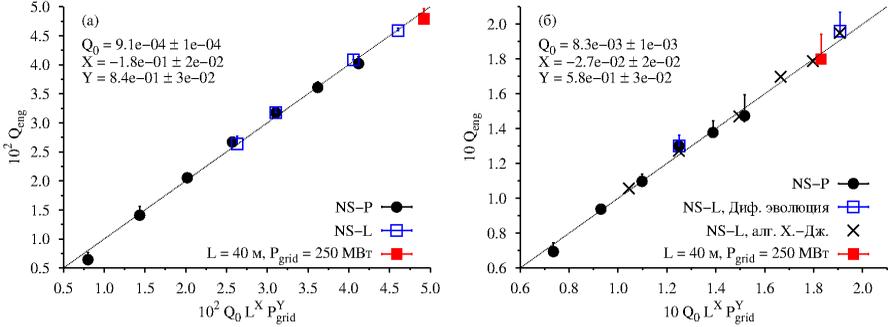


Рис. 3. Соответствие результатов серий оптимизационных расчетов NS–L, NS–P степенной зависимости кпд реакции синтеза  $Q_{eng}$  от длины  $L$  и мощности питания  $P_{grid}$  вида 2 для ИН на основе ГДЛ (а) и ГДМЛ (б). Сплошные квадратные маркеры соответствуют проверочным точкам с  $L = 40$  м и  $P_{grid} = 250$  МВт.

**В заключении** перечислены основные результаты выполненной работы:

1. На основе более раннего одномерного кода, построенного Ю. А. Цицулко, создана численная модель DOL открытой осесимметричной ловушки, также одномерная. В рамках модели разработан и реализован алгоритм расчета взаимодействия быстрых ионов друг с другом и фоновой плазмой, причем в использованной аппроксимации интеграла столкновений учитывается процесс диффузии быстрых частиц по энергии, а в случае расчета процессов торможения и рассеяния на быстрых частицах используются потенциалы Розенблюта–Трубникова неравновесной изотропной в пространстве скоростей рассеивающей функции. Также DOL включает в себя алгоритм расчета баланса частиц и энергии фоновой плазмы в промежуточных режимах продольного удержания и кинетическую модель взаимодействия плазмы с нейтральной компонентой, создаваемой за счет системы атомарной инжекции. Наконец, разработана и реализована модель для расчета скорости термоядерных реакций с учетом конечного размера ларморовских орбит быстрых ионов.
2. Как результат тестовых расчетов подтверждены пригодность кода DOL для моделирования процессов в открытых осесимметричных ловушках и соответствие производимых данных наблюдаемым экспериментальным результатам. Продемонстрирована значимость

учета зависимости параметров плазмы от положения вдоль оси ловушки и влияние этой зависимости на результаты моделирования источника нейтронов. Определено, что при соотношении плотностей быстрых и фоновых ионов  $n_f/n_c \gtrsim 1$  и отношении электронной температуры к энергии инжекции быстрых ионов  $T_e/E_{inj} \gtrsim 0.05$  становится существенным корректный учет процессов взаимодействия быстрых ионов между собой.

3. Определены характеристики источника нейтронов на основе открытой газодинамической ловушки, необходимые для его использования в рамках гибридной системы для дожигания трансурановых элементов. В частности, установлено, что эффективность генерации нейтронов, сравнимая или большая таковой у электроядерных установок, достигается при инженерном КПД термоядерных реакций  $Q_{eng} \gtrsim 0.1$ . Уровень КПД, достаточный для замыкания энергобаланса гибридной системы зависит от коэффициента размножения нейтронов  $k_{eff}$ , и при  $k_{eff} \gtrsim 0.95$  составляет  $Q_{eng} \gtrsim 5 \cdot 10^{-2}$ .
4. Проведена параметрическая оптимизация источников нейтронов на основе ГДЛ и ГДМЛ с диапазоном расстояний между пробочными узлами от 10 до 100 м, диапазоном мощности питания систем нагрева от 25 до 280 МВт и предельным магнитным полем 15 Т.
5. Установлено, что КПД термоядерных реакций источника нейтронов на основе ГДЛ с длиной порядка нескольких десятков метров, мощностью питания систем нагрева в диапазоне от 25 до 250 МВт и магнитным полем в пробке не более 15 Т не превышает уровня  $Q_{eng} \lesssim 0.05$  без применения систем прямого преобразования продольного потока частиц в электричество при условии ограничения относительного давления плазмы и захвата пучков таким образом, как это было описано в предыдущем пункте, а также условия преимущественно газодинамического режима продольного удержания фоновых ионов,  $\tau_{gd} \geq \tau_{kin}$ , где  $\tau_{gd}$  — характерное время удержания в газодинамическом режиме,  $\tau_{kin}$  — характерное время удержания в адиабатическом режиме.
6. В условиях предыдущего пункта и при коэффициенте подавления продольного потока частиц 10 для источника нейтронов на основе ГДМЛ получено ограничение КПД термоядерных реакций  $Q_{eng} \lesssim 0.2$ .
7. По результатам проведенного анализа сделан вывод, что оба рассмотренных типа источников нейтронов пригодны для использования в гибридных системах для дожигания младших актинидов,

однако источник нейтронов на основе ГДЛ в рамках исследованного диапазона длин ловушки и мощностей питания систем нагрева обладает меньшей эффективностью генерации нейтронов по сравнению с электроядерными системами.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в работах:

1. Д. В. Юров, В. В. Приходько. Гибридные системы для дожигания трансурановых отходов атомных энергетических установок: состояние исследований и перспективы // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, №11. С. 1237–1248.
2. Д. В. Юров, В. В. Приходько, Ю. А. Цидулко. Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой // Физика Плазмы. 2016. Т. 42, №3. С. 217–233.
3. Yurov D. V., Brednikhin S. A., Frolov S. A. et al. Recent Calculation Results for a Fission–Fusion System with Gas Dynamic Trap Neutron Source // Fusion Science and Technology. 2013. Vol. 63, no. 1T. P. 313–315.
4. Yurov D. V., Prikhodko V. V. Optimization of a mirror–based neutron source using differential evolution algorithm // Nuclear Fusion. 2016. Vol. 56, no. 12. P. 126003.
5. А. В. Аникеев, П. А. Багрянский, К. В. Зайцев и др. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДЛ при развитии Альфвеновской ионно–циклотронной неустойчивости // Физика Плазмы. 2015. Т. 41, №10. С. 839–849.
6. В. В. Поступаев, Д. В. Юров. Моделирование референсного сценария работы многопробочной ловушки ГОЛ–NB // Физика Плазмы. 2016. Т. 42, №11. Статья принята к публикации.

## Список литературы

- [1] Mirnov V. V., Ryutov D. D. Linear gas–dynamic system for plasma confinement // Soviet Technical Physics Letters. 1979. Vol. 5. P. 279–280.
- [2] И. А. Котельников, Д. Д. Рютов, Ю. А. Цидулко и др. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической

ловушки: Тех. доклад. 90–105: Институт Ядерной Физики СО АН СССР, 1990.

- [3] А. Ю. Чирков. Численное решение уравнения Фоккера–Планка для моделирования модифицированных газодинамических режимов плазмы в магнитной ловушке с нагревом интенсивными атомарными пучками // Физико–химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11.
- [4] Yurov D. V., Anikeev A. V., Bagryansky P. A. et al. Parameters optimization in a hybrid system with a gas dynamic trap based neutron source // Fusion Engineering and Design. 2012. Vol. 87, no. 9. P. 1684–1692.
- [5] Beklemishev A. D., Anikeev A. V., Astrelin V. T. et al. Novosibirsk Project of Gas–Dynamic Multiple–Mirror Trap // Fusion Science and Technology. 2013. Vol. 63, no. 1T. P. 46–51.
- [6] В. В. Поступаев, Д. В. Юров. Моделирование референсного сценария работы многопробочной ловушки ГОЛ–NB // Физика Плазмы. 2016. Т. 42, № 11. Статья принята к публикации.
- [7] Д. В. Юров, В. В. Приходько. Гибридные системы для дожигаания трансурановых отходов атомных энергетических установок: состояние исследований и перспективы // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 11. С. 1237–1248.
- [8] Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces // Journal of Global Optimization. Vol. 11, no. 4. P. 341–359.
- [9] Anikeev A. V., Karpushov A. N., Collatz S. et al. An integrated transport code system for the calculation of multi–component, high– $\beta$  plasmas in the gas dynamic trap // Transactions of Fusion Science and Technology. 2001. Vol. 39, no. 1T. P. 183–186.
- [10] Anikeev A. V., Dagan R., Fischer U. Numerical Model of the Fusion–Fission Hybrid System Based on Gas Dynamic Trap for Transmutation of Radioactive Wastes // Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 59, no. 1T. P. 162–165.
- [11] Anikeev A. V. Optimisation of the neutron source based on gas dynamic trap for transmutation of radioactive wastes // AIP Conference Proceedings. 2012. Vol. 1442, no. 1. P. 153–158.

- [12] Chirkov A. Y., Ryzhkov S. V., Bagryansky P. A., Anikeev A. V. Fusion modes of an axially symmetrical mirror trap with the high power injection of fast particles // Plasma Physics Reports. 2012. Vol. 38, no. 13. P. 1025–1031.
- [13] Simonen T. C., Moir R. W., Molvik A. W., Ryutov D. D. A 14 MeV fusion neutron source for material and blanket development and fission fuel production // Nuclear Fusion. 2013. Vol. 53, no. 6. P. 063002.
- [14] Ryutov D. D., Molvik A. W., Simonen T. C. Axisymmetric Mirror as a Driver for a Fusion–Fission Hybrid: Physics Issues // Journal of Fusion Energy. 2010. Vol. 29, no. 6. P. 548–552.
- [15] Du H., Chen D., Duan W. et al. Physics Analysis and Optimization Studies for a Fusion Neutron Source Based on a Gas Dynamic Trap // Plasma Science and Technology. 2014. Vol. 16, no. 12. P. 1153.
- [16] Anikeev A. V., Bagryansky P. A., Beklemishev A. D. et al. Progress in Mirror-Based Fusion Neutron Source Development // Materials. 2015. Vol. 8, no. 12. P. 5471.
- [17] А. В. Анিকেев, П. А. Багрянский, К. В. Зайцев и др. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДЛ при развитии Альфвеновской ионно–циклотронной неустойчивости // Физика Плазмы. 2015. Т. 41, № 10. С. 839–849.
- [18] Kolesnikov E., Bragin A., Mezentsev N. et al. Project of GDT–based steady–state experiment. Доклад на конференции “11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement”, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2016.
- [19] Arzhannikov A., Anikeev A., Beklemishev A. et al. Subcritical assembly with fusion neutron source as a device for studies of neutron–physical characteristics of thorium fuel. Доклад на конференции “11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement”, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2016.
- [20] В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов. Газодинамическая ловушка // Вопросы атомной науки и техники, серия “Термоядерный синтез”. 1980. Т. 1, № 5. С. 57–66.
- [21] Д. В. Сивухин. Кулоновские столкновения в полностью ионизованной плазме // Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. Москва: Атомиздат, 1964. Т. 4. С. 81–187.

- [22] В. П. Пастухов. Классические продольные потери плазмы в открытых адиабатических ловушках // Вопросы теории плазмы / Под ред. Б. Б. Кадомцева. Москва: Энергоатомиздат, 1984. Т. 13. С. 160–204.
- [23] Anikeev A. V., Bagryansky P. A., Ivanov A. A. et al. Fast ion relaxation and confinement in the gas dynamic trap // Nuclear Fusion. 2000. Vol. 40, no. 4. P. 753–766.
- [24] Maximov V. V., Anikeev A. V., Bagryansky P. A. et al. Spatial profiles of fusion product flux in the gas dynamic trap with deuterium neutral beam injection // Nuclear Fusion. 2004. Vol. 44, no. 4. P. 542–547.
- [25] Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Beklemishev A. D. et al. Confinement of hot ion plasma with  $\beta = 0.6$  in the gas dynamic trap // Fusion Science and Technology. 2011. Vol. 59, no. 1T. P. 31–35.

**ЮРОВ Дмитрий Викторович**

**Численная модель DOI  
и расчеты параметров  
осесимметричной открытой ловушки**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 10.10.2016 г.

Подписано к печати 11.10.2016 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,2 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 15

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*