

**Отчет о провенных работах с использованием ресурсов информационно-вычислительного центра НГУ для расчета параметров источника нейтронов на основе открытой ловушки для задачи замыкания U-Pu ядерного топливного цикла**

Юров Д. В.

1. **Тема работы:** «Расчет параметров источника нейтронов на основе открытой ловушки для задачи замыкания U-Pu ядерного топливного цикла»
2. **Состав коллектива:**
  - a) Приходько Вадим Вадимович, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, с.н.с., к.ф.-м.н., email: [v.v.prikhodko@inp.nsk.su](mailto:v.v.prikhodko@inp.nsk.su), научный руководитель.
  - b) Юров Дмитрий Викторович, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, м.н.с., без степени, email: [dm.yurov@gmail.com](mailto:dm.yurov@gmail.com), программист, основной исполнитель.
3. **Научное содержание работы:**
  - a) *Постановка задачи:* В рамках работы было необходимо провести серию оптимизационных расчетов для нахождения оптимальной конфигурации источника нейтронов на основе открытой ловушки. При этом в качестве основного назначения источника нейтронов предполагалась генерация термоядерных нейтронов для дальнейшего использования в ядерном blankets подкритичной гибридной системы. Целью оптимизации являлось нахождение конфигурации источника нейтронов с максимальным потоком термоядерных нейтронов в зоне размещения подкритичного ядерного blankets.
  - b) *Современное состояние проблемы:* Детальное описание современного состояния исследований по тематике гибридных систем (ГС) для задач замыкания U-Pu ядерного топливного цикла можно найти в работе [1]. Существенным недостатком современной атомной энергетики является накопление в результате работы АЭС долгоживущих трансурановых элементов (плутония, младших актинидов) с большим периодом повышенной радиотоксичности. Одним из путей решения этой проблемы является применение подкритичных гибридных систем-дожигателей трансурановых элементов. Основными элементами гибридной системы являются подкритичный ядерный blankets и источник нейтронов (ИН), необходимый для поддержания цепной реакции. Среди различных классов ГС наиболее известны так называемые электроядерные установки, генерация первичных нейтронов в которых происходит благодаря взаимодействию

высокоэнергетичных (с энергией около 1 ГэВ) протонов с ядрами нейтронпроизводящей мишени (материалом мишени как правило выступает ртуть, свинец или вольфрам). Однако также ведутся исследования ГС с использованием термоядерного источника нейтронов. Частными случаями таких систем являются системы с ИН на основе открытой ловушки, а также системы с ИН на основе токамака. Среди достоинств открытых ловушек в качестве источников нейтронов можно выделить, с одной стороны, потенциально более высокий темп генерации нейтронов по сравнению с электроядерными системами. С другой стороны, в отличие от токамаков в открытых ловушках отсутствует проблема срывов плазмы на первую стенку и ее тепловой перегрузки. [1]. Д. В. Юров, В. В. Приходько, УФН, 184 (11), 1237 (2014).

- с) *Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:* В предлагаемом исследовании было проведено сравнение существенно различных конфигураций источников нейтронов на основе открытой ловушки. В частности, были рассмотрены конфигурации источника нейтронов, по физике удержания плазмы близкие к существующей установке ГДЛ (ИЯФ СО РАН), ИН с адиабатическим удержанием плазмы, а также вариант ИН с физикой удержания, близкой к пробкотрону Будкера. При этом для каждого из рассматриваемых типов открытой ловушки была проведена оптимизация характеристик для нахождения оптимума по параметру энергетической цены термоядерного нейтрона (т.е. минимизация количества энергии, затрачиваемой на производство одного нейтрона).

Расчеты проводились с помощью кода DOL, предназначенного для моделирования параметров плазмы в осесимметричных открытых ловушках, и оптимизационного метода дифференциальной эволюции.

Код DOL основан на нестационарной модели осесимметричной открытой ловушки, использующей баунс-усреднение для учета зависимости параметров плазмы от координаты вдоль оси установки. Среди особенностей модели следует выделить возможность расчета членов интеграла столкновений для вычисления вида функции распределения быстрых ионов с использованием немаксвелловской рассеивающей функции, а также возможность расчета продольных потоков частиц и энергии фоновой плазмы в режимах удержания с длиной свободного пробега частиц порядка длины установки.

Метод дифференциальной эволюции подробно описан в работе [2]. Указанный метод основан на отборе тех комбинаций параметров оптимизируемого объекта (в

рассматриваемом случае это открытая ловушка), которые приводят к наилучшим результатам оптимизируемой характеристики (в рассматриваемом случае это энергетическая цена термоядерного нейтрона). При этом исходные комбинации параметров генерируются случайным образом в рамках области определения данных параметров. Последующие комбинации параметров генерируются путем линейной комбинации наборов предыдущего поколения с исключением вариантов, наихудших по оптимизируемому параметру.

[2]. K. Price, R. Storn, J. Lampinen, «Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization», Springer (2005).

- d) *Полученные результаты:* В результате проведенной работы были рассмотрены различные варианты источников нейтронов на основе открытых ловушек. В рамках процесса оптимизации рассматривалось изменение следующих параметров: продольный профиль магнитного поля; максимальное пробочное отношение в ловушке; мощность нагрева плазмы (не более 100 МВт); соотношение тока инжекции дейтерия/третия; энергия инжектируемых частиц (не более 1 МэВ); эквивалентный ток поддува для поддержания плотности мишенной плазмы; радиус плазменного столба. При этом процент захвата нагревных пучков в плазму ограничивался уровнем 90 % (большие значения захвата нагревных пучков в плазму приводили бы к существенным неоднородностям распределения плотности быстрых ионов по радиусу плазменного столба, что не учитывалось расчетной моделью), а отношение поперечного давления плазмы к давлению магнитного поля не превышало 0.5 (результат, близкий к максимальному полученному на установке ГДЛ).

Наилучшие показатели были получены для варианта ловушки с предельно низкой плотностью мишенной плазмы и преимущественно слабостолкновительным режимом удержания частиц. В этом случае к.п.д. термоядерных реакций в ловушке (т.е. отношение мощности D-T термоядерной реакции к мощности, вкладываемой в плазму) достигало значения  $Q \sim 0.5$ . При этом полученный вариант источника нейтронов обладал сравнительно небольшой длиной  $L \sim 15$  м. Нужно заметить, что с точки зрения приложений атомной энергетики компактность ИН является позитивным фактором, поскольку позволяет ориентироваться на варианты активной зоны реактора гибридной системы, близкие к существующим моделям, разработанным для электроядерных установок. Однако данный вариант ИН малопригоден для дальнейшего развития в силу развития дрейфово-конусной неустойчивости в таком типе ловушек.

В других случаях при длине ИН около 15 м к.п.д. термоядерных реакций не превышало  $Q \sim 0.1$ . Данный результат соответствует эффективности нейтронной генерации  $3.5 \times 10^{10}$  нейтронов на Ватт входной мощности источника. Такой результат делает полученные комбинации параметров источника нейтронов конкурентоспособными с электроядерными установками типа EFIT [3,4].

[3]. L. Mansani et al., Nucl. Technol. 180, 241 (2012)

[4]. J.-F. Pignatel et al., Nucl. Technol. 180, 264 (2012)

4. **Эффект от использования кластера в достижении целей работы:** Основной причиной использования кластера НГУ являлась ресурсоемкость оптимизационного алгоритма. Одна итерация оптимизации требовала около пятидесяти запущенных параллельно расчетов. Реализованный алгоритм оптимизации показал результаты, схожие с полученными менее ресурсоемкими алгоритмами поиска локального максимума. Поэтому дальнейшие расчеты будут проводиться с помощью аналитического выделения наиболее интересных комбинаций параметров установки и расчетов с помощью кода DOL в окрестностях предполагаемого оптимума. В этом случае может быть использован, к примеру, менее ресурсоемкий алгоритм оптимизации Хука-Дживса [5]. При необходимости уточнения результатов на финальных стадиях вычислений будет возобновлено использование описанного в отчете алгоритма.

[5]. R. Hooke, T. A. Jeeves, JACM, 8 (2), 212 (1961).