

Отчет о расчетах параметров источника нейтронов на основе газодинамической ловушки с использованием ресурсов информационно-вычислительного центра НГУ

Юров Д. В.

1. **Тема работы:** «Расчет параметров источника нейтронов на основе открытой ловушки для приложений атомной энергетики с помощью метода дифференциальной эволюции»
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, научный руководитель.
 - b) Юров Дмитрий Викторович, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, м.н.с., без степени, email: 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 (ИН) на основе открытой ловушки. При этом основным назначением источника нейтронов была 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 (общая схема источника нейтронов и гибридной системы с его использованием представлена на рисунке 1). В рамках расчетов было необходимо рассмотреть источник нейтронов на основе ГДЛ [1] и ГДМЛ [2].
 - b) *Современное состояние проблемы:* Обзор существующих концепций мощных источников нейтронов можно найти в работе [3]. Детальное описание современного состояния исследований по тематике гибридных систем (ГС) для задач замыкания U-Pu ядерного топливного цикла можно найти в работе [4]. 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. По этой причине является актуальным вопрос о достижимых параметрах ИН на основе газодинамических ловушек, которому было посвящено проведенное исследование.

- с) *Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:* Общая схема конфигурации источника нейтронов, выбранной за основу для всех численных экспериментов, соответствует приведенной на рисунке 1. Целью оптимизации являлось нахождение ИН с максимальным КПД термоядерных реакций (т. е. максимальным отношением мощности реакций синтеза в плазме к затраченной мощности нагрева), Q_{eng} . В качестве варьируемых параметров выступали энергия быстрых атомов, инжектируемых в плазму для ее нагрева; скорость подачи газа для поддержания плотности фоновой плазмы; радиус плазмы; параметры конфигурации магнитного поля. Значение магнитной индукции в пробках было одним и тем же для всех конфигураций ИН и составляло 15 Т. Расчеты проводились с помощью кода DOL [5], предназначенного для моделирования параметров плазмы в осесимметричных открытых ловушках, и оптимизационного метода дифференциальной эволюции [6].
- Во всех вычислениях использовались следующие ограничения на параметры плазмы. Во-первых, поперечное относительное давление плазмы не должно было превышать 0.5, т. е. должно было находиться в диапазоне относительных давлений, достигнутых в экспериментах на установке ГДЛ. Во-вторых, коэффициент захвата атомарного пучка в плазму был ограничен уровнем 90 %. Более высокий коэффициент захвата мог бы привести к формированию кольцеобразного радиального распределения быстрых ионов, чего нельзя было бы отследить используемой одномерной численной моделью. Помимо

этого, удержание фоновой плазмы ограничивалось газодинамическим режимом, что связано с необходимостью стабилизации системы относительно микронеустойчивостей.

В общей сложности было проведено пять серий расчетов. Ввиду ограниченности объема данного отчета далее будут обсуждаться только последние две из них, в то время как подробное описание оставшихся серий, посвященных исследованию достижимого КПД термоядерных реакций в зависимости от выбранных условий устойчивости плазмы и эффективности подавления продольных потерь частиц и энергии при фиксированной мощности нагрева 100 МВт и длине ловушки 20 м, приведено в работе [7] (также указанной в перечне публикаций, приведенном в пункте 5).

Серии расчетов «NS-L» и «NS-P» были связаны между собой и предназначались для оценки зависимости КПД термоядерных реакций от длины ИН и полной мощности нагрева плазмы. При расчетах ИН на основе ГДМЛ использовался условный коэффициент подавления продольных потерь относительно уровня ГДЛ, равный 10. В результате расчетов предполагалось получить скейлинг зависимости максимального КПД термоядерных реакций ИН вида

$$Q_{eng} = Q_0 \cdot P_{grid}^\alpha \cdot L^\beta .$$

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 нагрева пропорциональна корню из длины ловушки.

Для проверки правильности скейлинга при произвольных значениях мощности нагрева и длины установки были также выполнены оптимизационные расчеты ИН на основе ГДЛ и ГДМЛ для длины $L = 40$ м и мощности питания систем нагрева $P_{grid} = 250$ МВт.

- d) *Полученные результаты:* Установлено, что КПД термоядерных реакций источника нейтронов на основе ГДЛ с длиной порядка нескольких десятков метров, мощностью систем нагрева в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен мегаватт и магнитным полем в пробке не более 15 Т не превышает уровня $Q_{eng} \lesssim 0.05$. Для ГДМЛ при тех же условиях получено ограничение КПД термоядерных реакций $Q_{eng} \lesssim 0.2$. Данный вывод сделан по результатам всех проведенных серий вычислений. На основе результатов, полученных в сериях вычислений NS-P и NS-L получены зависимости КПД термоядерных реакций на основе ГДЛ и ГДМЛ от мощности нагрева и длины ловушки,

приведенные на рисунке 2 (рисунок также содержит значения коэффициентов аппроксимации зависимости термоядерного КПД от мощности и длины степенной функции). Полученные результаты скорее являются оценкой сверху и могут быть в дальнейшем уточнены с помощью более точных моделей поведения плазмы в газодинамической ловушке.

4. **Эффект от использования кластера в достижении целей работы:** Основной причиной использования кластера НГУ являлась ресурсоемкость оптимизационного алгоритма. Одна итерация оптимизации требовала около сорока запущенных параллельно расчетов. В общей сложности было проведено около 40000 расчетов, хотя каждый из них использовал только одно вычислительное ядро. По этой причине результаты работы вряд ли могли бы быть получены без использования кластера НГУ или подобного вычислительного центра, по крайней мере в рамках использованной расчетной методики.
5. **Перечень публикаций, содержащих результаты работы:**
 - a) 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 (14 pp.).
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/56/12/126003>
Impact factor 2015 (JCR): 4.04
 - b) Yurov D. V., Prikhodko V. V., Bagryansky P. A., Optimization of GDT- and GDMT-based neutron sources with Hooke-Jeeves and differential evolution algorithms, 11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, book of abstracts, p. 82, 2016.
Web-link: <https://indico.inp.nsk.su/event/5/material/5/0.pdf>
 - c) Результаты серий расчетов NS-P и NS-L будут опубликованы отдельно в сборнике трудов конференции «11th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement», серии AIP Conference Proceedings в 2016-2017 году.

Иллюстрации

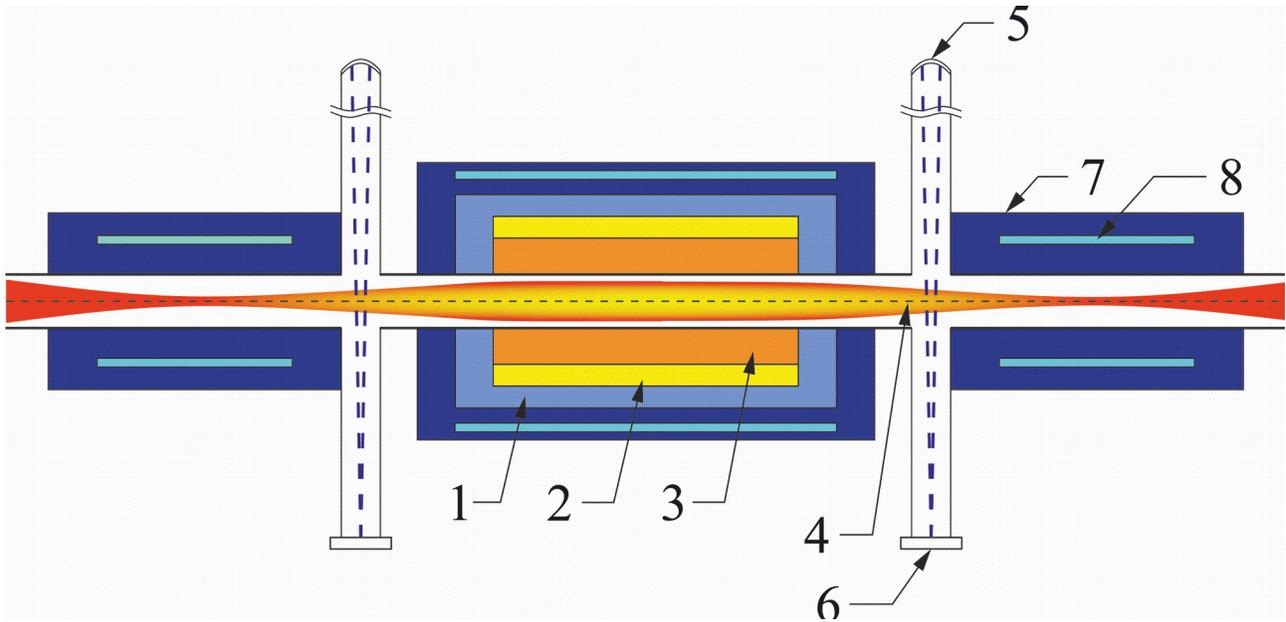


Рисунок 1: Схема гибридной системы с источником нейтронов на основе открытой ловушки [7]. 1 - отражатель, 2 - литиевый бланкет для наработки трития, 3 - подкритичная активная зона, 4 - плазма, 5 - нагревной инжектор, 6 - приемник пучков, 7 - нейтронная защита, 8 - сверхпроводящие магнитные катушки.

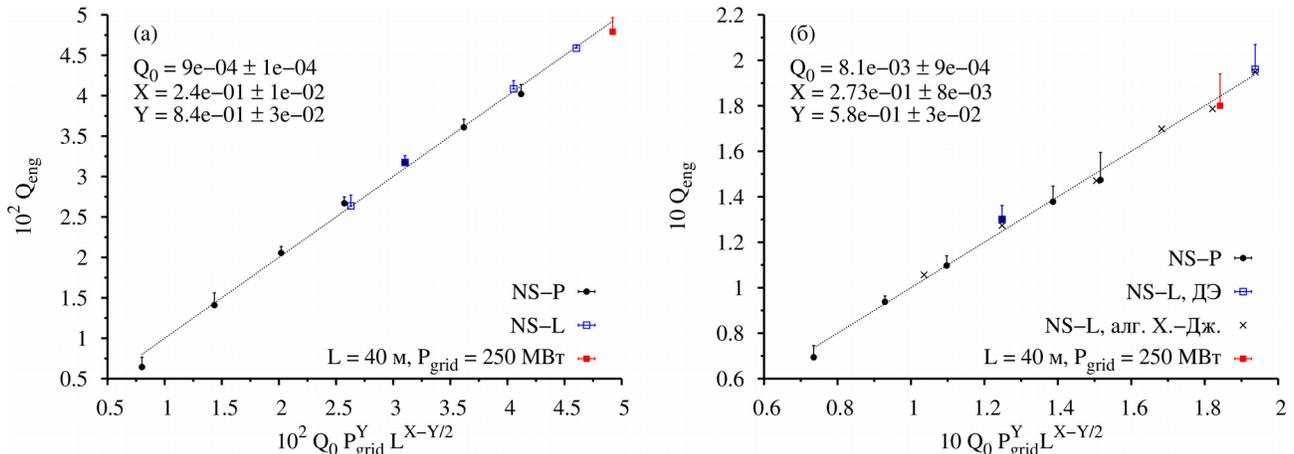


Рисунок 2: Зависимость кпд реакций синтеза для ИН на основе ГДЛ (а) и ГДМЛ (б) от мощности питания системы инжекции атомарных пучков и длины ловушки. Красные маркеры соответствуют проверочным расчетам ИН с длиной 40 м и с мощностью питания систем нагрева 250 МВт. Если не оговорено особо, для получения оптимальной конфигурации ИН использовался алгоритм дифференциальной эволюции.

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]. 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.
- [3]. Б. В. Кутеев, П. Р. Гончаров, В. Ю. Сергеев, В. И. Хрипунов. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза // Физика плазмы. 2010. Т. 36, No 4. С. 307–346.
- [4]. 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, No 11. С. 1237–1248.
- [5]. Д. В. Юров, В. В. Приходько, Ю. А. Цидулко. Нестационарная модель для описания осесимметричной открытой ловушки с неравновесной плазмой // Физика Плазмы. 2016. Т. 42, No 3. С. 217–233.
- [6]. 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.
- [7]. 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.