

# Отчет о проведенных расчетах параметров источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки с использованием ресурсов информационно-вычислительного центра НГУ

Юров Д. В.

1. **Тема работы:** «Расчет параметров источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки для проекта стенда, предназначенного для отработки режимов рабочего цикла подкритических топливных сборок»
2. **Состав коллектива:**
  - a. Аржанников Андрей Васильевич, заведующий АТИЦ ВТиНМ НГУ, г.н.с. ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, д.ф.-м.н., email: [A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Arzhannikov@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:** На базе Национального исследовательского томского политехнического университета планируется создание стенда для исследования поведения ториевого ядерного топлива в рабочем цикле подкритической сборки, предназначенной для энергетического реактора. Задача данных компьютерных расчетов состояла в выборе характеристик источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки, обеспечивающих необходимый уровень генерации в плазме нейтронов термоядерного синтеза, которые необходимы для добавления нейтронного потока в центральную область подкритической топливной сборки, при её исследованиях в создаваемом стенде.
  - b. **Современное состояние проблемы:** Национальный исследовательский томский политехнический университет в тесном сотрудничестве с Институтом ядерной физики СО РАН разрабатывает проект подкритического стенда для исследования режимов работы ториевых топливныхборок, предназначенных для энергетических реакторов. В настоящее время оказывается весьма актуальным проведение расчетов, обеспечивающих детальное обоснование возможности использования источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки в качестве активной центральной области такого подкритического исследовательского стенда. В рамках этих расчетов необходимо получить оценку плотности потока термоядерных нейтронов, который достигается на том участке длинной магнитной ловушки, где должна размещаться подкритическая топливная сборка. При этом

исключительно важным является выбор основных физических параметров источника нейтронов.

- с. **Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:** Конфигурация исследовательского стенда для подкритических сборок, использующего источник термоядерных нейтронов на основе длинной магнитной ловушки описана в работе [1]. Эта конфигурация, включающая принципиальную схему размещения плазменного источника термоядерных нейтронов, для которого проводились расчеты, приведена на рисунке 1. Целью наших оптимизационных расчетов явился поиск варианта плазменного источника нейтронов с максимальной скоростью реакций D-D синтеза в области размещения подкритической сборки. 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. Величина магнитной индукции в пробках соленоида была зафиксирована в этих расчетах на уровне 15 Т.

Расчеты проводились с помощью кода DOL [2], предназначенного для моделирования параметров плазмы в осесимметричных открытых ловушках, который был дополнен оптимизационным методом дифференциальной эволюции [3]. На параметры плазмы были наложены следующие ограничения. Во-первых, относительное поперечное давление плазмы не могло превышать 0.5, т. е. оно должно было находиться в диапазоне относительных давлений, уже достигнутых в экспериментах на установке ГДЛ. Во-вторых, коэффициент захвата атомарного пучка в плазму был ограничен уровнем 90 %. Помимо этого, удержание фоновой плазмы ограничивалось газодинамическим режимом, что связано с необходимостью стабилизации системы плазма в магнитном поле относительно микронеустойчивостей. В целом алгоритм расчета и ограничения на искомую конфигурацию источника нейтронов совпадают с приведенными в работе [4]. В рамках оптимизации предполагалось, что мощность нагрева плазмы атомарными пучками составляет 20 МВт, а расстояние между магнитными пробками газодинамической ловушки имеет величину 20 м. Выбор именно этих величин для параметров, закладываемых в расчеты, обусловлен соображением параметрической близости источника нейтронов, закладываемой в расчеты, к существующей экспериментальной установке ГДЛ.

[1]. A. V. Arzhannikov, A. V. Anikeev, A. D. Beklemishev, A. A. Ivanov, I. V. Shamanin, A. N. Dyachenko, and O. Yu. Dolmatov. Subcritical assembly with thermonuclear neutron source as device for studies of neutron-physical characteristics of thorium fuel. AIP Conference Proceedings 1771, 090004 (2016); doi: 10.1063/1.4964246.

[2]. D. V. Yurov, V. V. Prikhodko, Yu. A. Tsidulko, “Nonstationary model of an axisymmetric mirror trap with nonequilibrium plasma”, *Plasma Physics Reports*, v. 42, no. 3, pp. 210-225, 2016

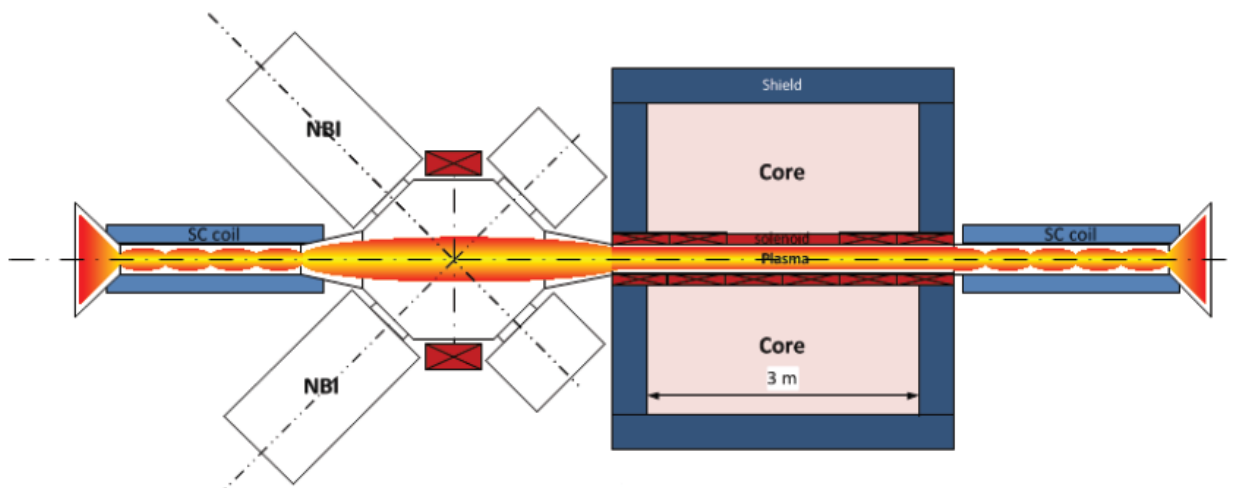
[3]. R. Storn, K. Price, “Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, *Journal of Global Optimization*, v. 11, pp. 341-359, 1997

[4]. D. V. Yurov, V. V. Prikhodko, “Optimization of a mirror-based neutron source using differential evolution algorithm”, *Nuclear Fusion*, v. 56, no. 12, p. 126003, 2016

- d. **Полученные результаты:** В таблице 1 приведена сводка основных характеристик конфигурации источника нейтронов, полученной в результате оптимизации методом дифференциальной эволюции. На рисунке 2 представлен профиль скорости D-D реакции синтеза в расчете на единицу длины источника нейтронов. Поток нейтронов в тестовой зоне на поверхности плазмы составляет приблизительно  $3.5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что в 25 раз меньше потока нейтронов синтеза, полученного в результате ранее проведенных расчетов для источника нейтронов на основе ГДЛ с мощностью инжекции 100 МВт. Таким образом, снижение скорости D-D реакции в расчете на ватт мощности инжекции оказалось практически линейным, что согласуется с ранее полученной аппроксимацией зависимости коэффициента умножения мощности реакций синтеза от мощности нагрева плазмы [5]. Следует отметить, что оптимизация привела к выбору энергии инжектируемых частиц около 130 кэВ, что достаточно далеко от энергии максимума сечения реакции D-D синтеза. Такой “неоптимальный” выбор обусловлен достаточно высокой прозрачностью плазмы и снижением коэффициента захвата пучков при повышении энергии инжектируемых частиц.

[5]. D. V. Yurov, V. V. Prikhodko, P. A. Pagryansky, “Length and power scalings of GDT- and GDMT-based neutron sources”, *AIP Conference Proceedings*, v. 1771, p. 090003, 2016

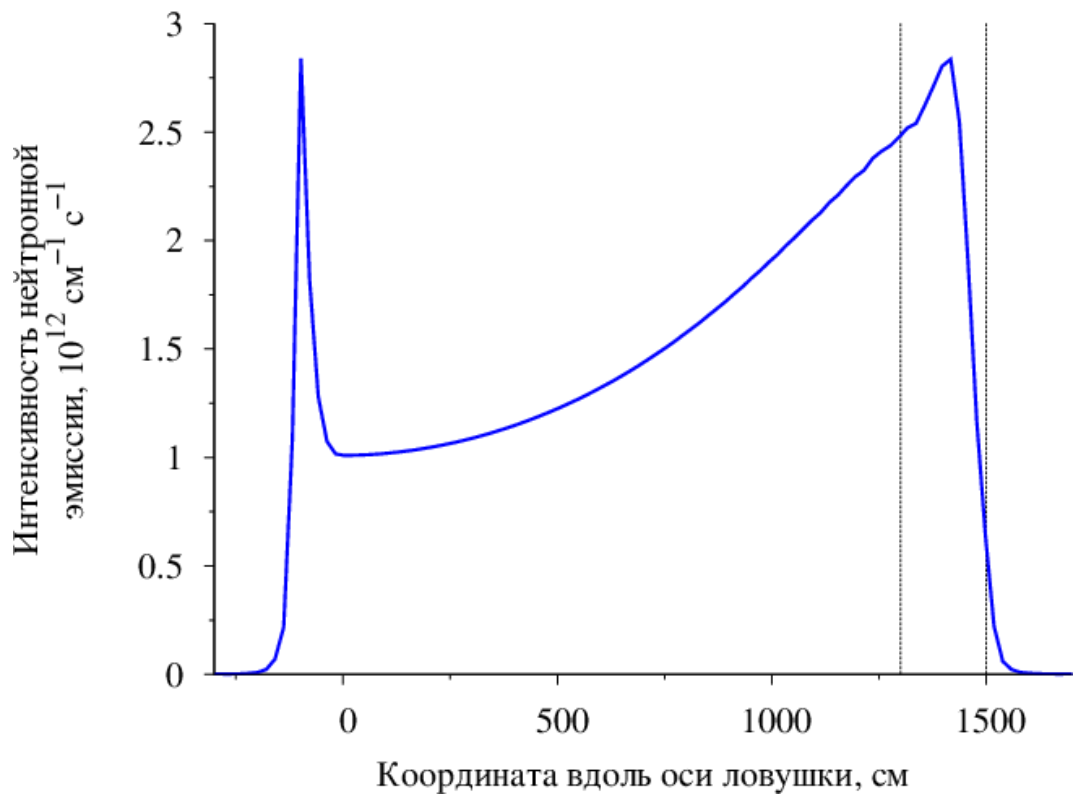
#### 4. Иллюстрации, визуализация результатов:



**Рисунок 1.** Принципиальная схема подкритичного источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки

Параметр	Значение
Мощность инъекции, МВт	20
Расстояние между пробками, м	20
Энергия инъекции, кэВ	128
Ток инъекции, кА	0.16
радиус плазмы в центральном сечении, см	22.6
Максимальное пробочное отношение	52.0
Минимальное пробочное отношение в тестовой зоне	2.8
Максимальное пробочное отношение в тестовой зоне	6.0
Ток поддува, экв. кА	2.0
Относительное поперечное давление плазмы по вытесненному полю, %	73.4
Захват пучков, %	58.5
Температура электронов, кэВ	0.9
Плотность плещущихся ионов в центральном сечении, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	1.2
Время удержания в газодинамическом режиме, мс	1.7
Средняя интенсивность нейтронной эмиссии в тестовой зоне, $10^{14} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	2.5
Средний нейтронный поток в тестовой зоне, $10^{14} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	3.5

**Таблица 1.** Основные параметры конфигурации источника нейтронов на основе открытой ловушки, найденные в результате оптимизации методом дифференциальной эволюции



**Рисунок 2.** Интенсивность реакций синтеза в расчете на единицу длины источника нейтронов. Вертикальными линиями обозначены границы области размещения подкритичной сборки.

5. **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. По этой причине результаты работы вряд ли могли бы быть получены без использования кластера НГУ или подобного вычислительного сервера.