

Оптимизация системы замедления нейтронного потока для нейтронного генератора Института прикладной физики РАН

© С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, В.А. Скалыга

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: vybinss@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 31 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Представлены результаты численных расчетов системы формирования нейтронного потока для D–D нейтронного генератора, разрабатываемого в ИПФ РАН. Его основой является высокоточный газодинамический ионный источник GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation), который способен выдавать пучки ионов дейтерия с энергией до 100 keV и током на уровне сотен миллиампер. Проведена оптимизация геометрических параметров системы замедления нейтронов. Рассматриваемую систему предполагается использовать для проведения облучения клеточных культур, выполняемого в рамках исследований по бор-нейтронозахватной терапии рака.

Ключевые слова: нейтронный генератор, высокоточный газодинамический ионный источник, нейтроны, численные расчеты.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56876.202A

В настоящее время развитие технологии бор-нейтронозахватной терапии рака сдерживается из-за недостаточного количества доступных нейтронных источников, обладающих достаточной интенсивностью [1]. В Институте прикладной физики РАН ведутся разработки непрерывного интенсивного (ожидаемый нейтронный выход порядка 10^{11} s^{-1}) нейтронного генератора, основанного на D–D-реакции [2]. Установка включает в себя газодинамический ионный источник, который формирует пучок ионов дейтерия (с полным током в несколько сотен миллиампер), направленный на нейтроногенерирующую мишень. Генерация нейтронов со средней энергией около 2.5 MeV происходит в результате D–D-реакции при бомбардировке пучком ионов дейтерия твердотельной (медной) мишени, работающей в режиме автонасыщения. Проектное значение полного тока пучка составляет 500 mA при его энергии, равной 100 keV. Планируется реализовать полный нейтронный выход на уровне 10^{11} s^{-1} с возможностью дальнейшего его увеличения за счет повышения энергии пучка до 200–300 keV.

Предполагается использование данного нейтронного генератора для проведения экспериментов по облучению нейтронами клеточных культур, а также лабораторных животных. В зависимости от постановки задачи необходимо воздействовать на биологический образец потоком нейтронов теплового (менее 0.5 eV) или эпитеплового (от 0.5 до 30 keV) диапазонов энергии. Для снижения энергии генерируемых быстрых нейтронов используется замедлитель нейтронов, который располагается между источником и образцом.

Для подготовки к эксперименту необходимо провести оптимизацию параметров замедляющей системы. Это позволит уменьшить негативное влияние излучения быстрых нейтронов, а также снизить требуемое время

облучения образцов для достижения биологического эффекта.

В настоящей работе представлены результаты численных расчетов системы формирования нейтронного потока, которая включает в себя замедлитель, отражатель и нейтронную защиту. Последняя необходима для уменьшения радиационного фона вблизи установки до допустимого уровня во время проведения экспериментов. В работе описан дизайн системы для проведения эксперимента по облучению клеточных культур. В ходе оптимизации преследовалась цель увеличения потока тепловых нейтронов через образец при снижении потока нейтронов с более высокой энергией. Были оптимизированы геометрические размеры системы формирования нейтронного потока.

Основу нейтронного генератора данного типа составляет источник ионов. Это газодинамический электронно-циклотронный резонансный ионный источник [3], в котором плазма поддерживается излучением технологического гиротрона [4] с частотой 28 GHz и мощностью до 10 kW. Поперечное удержание плазмы обеспечивается за счет наличия открытой магнитной ловушки типа пробкотрон, создаваемой набором постоянных магнитов из сплава Nd–Fe–B. Также в состав установки входят система извлечения ионного пучка, узел мишени и система формирования нейтронного потока (рис. 1). Для обеспечения работы установки в непрерывном режиме предусмотрено принудительное водяное охлаждение элементов, на которых возможно оседание ионного пучка.

Система формирования нейтронного потока представляет собой многослойную структуру, состоящую из замедлителя, окружающего мишень, нейтронного отражателя и биологической защиты, снижающей фоновый

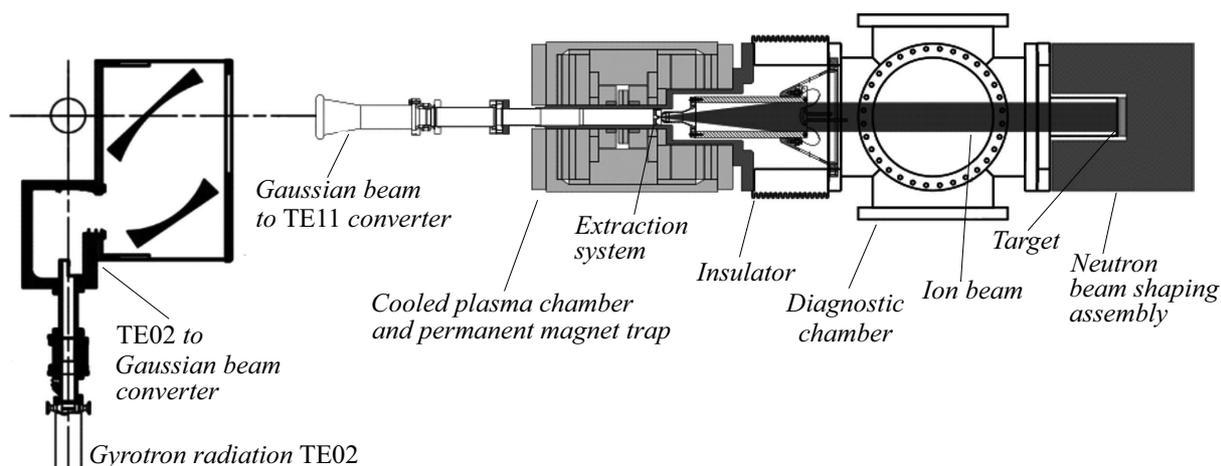


Рис. 1. Схема нейтронного генератора, включающего в себя гиротрон, охлаждаемую плазменную камеру и ловушку из постоянных магнитов, систему извлечения ионного пучка, мишень, систему формирования нейтронного потока. Обозначения TE11 и TE02 соответствуют модам электромагнитной волны, распространяющейся в круглом волноводе.

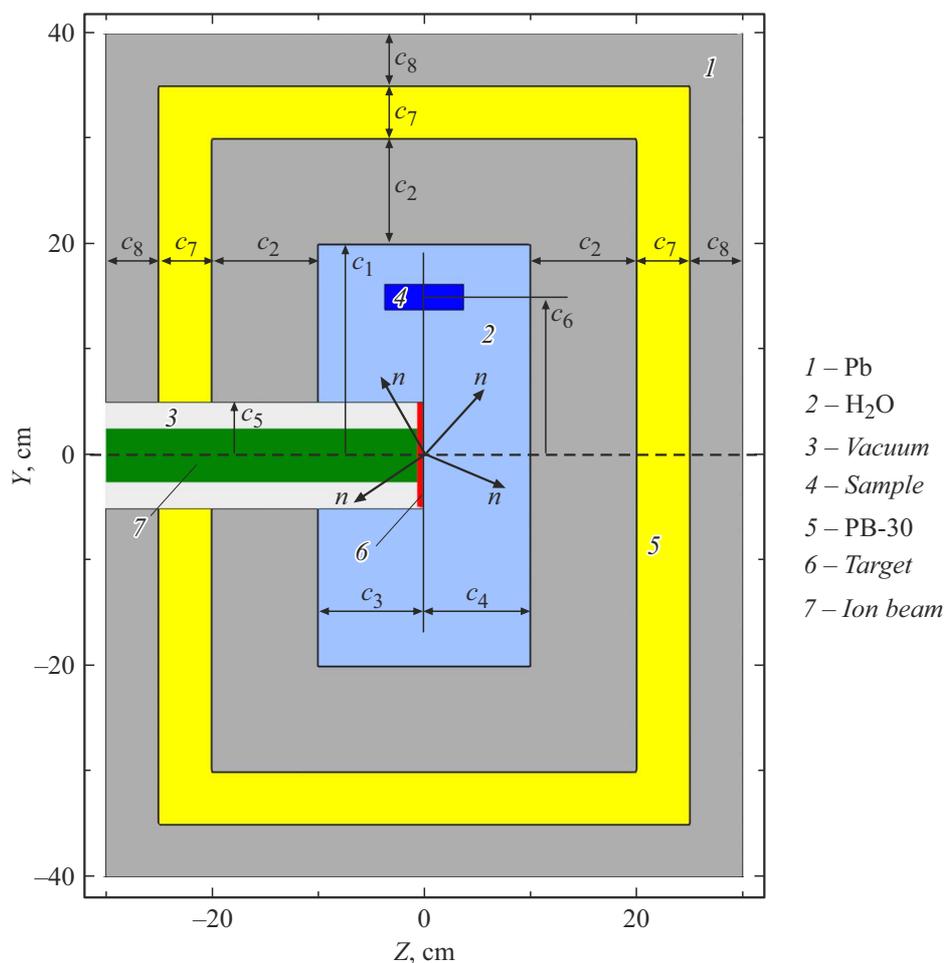


Рис. 2. Схема системы замедления нейтронов с указанием ее геометрических параметров. Представлено вертикальное сечение при $X = 0$ см. Стрелками показаны возможные направления распространения образующихся нейтронов.

уровень излучений в помещении (рис. 2). В качестве материала замедлителя использовалась вода. Материа-

лом нейтронного отражателя был выбран свинец. В состав нейтронной защиты входят слои из борированного

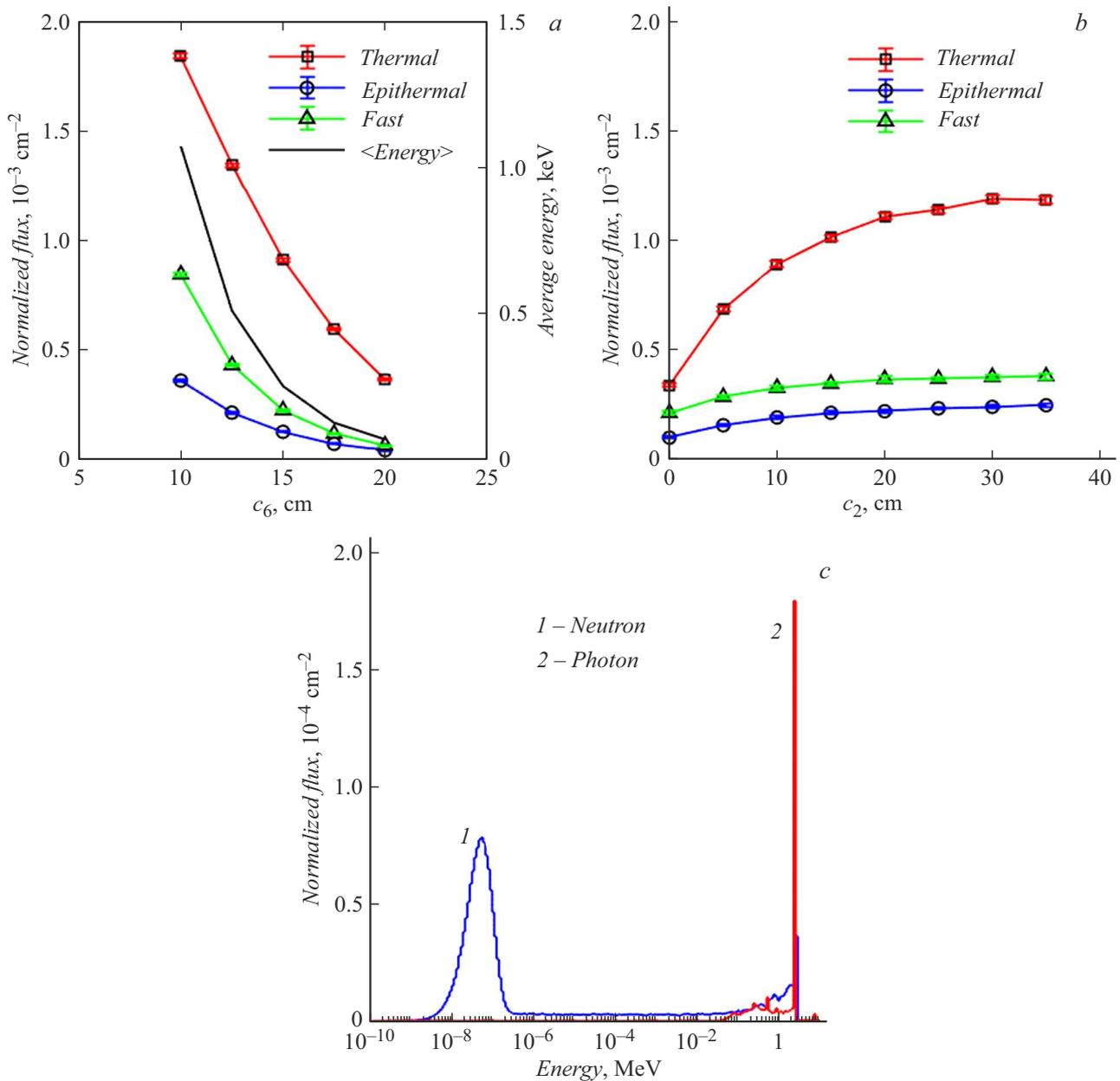


Рис. 3. *a* — зависимости потока нейтронов различных диапазонов энергии (тепловых, эпитепловых, быстрых) (левая шкала) и средней энергии нейтрона (правая шкала) от расстояния до образца. *b* — зависимость потока нейтронов различных диапазонов энергии от толщины отражателя. *c* — энергетический спектр нейтронного потока, проходящего через образец, рассчитанный при следующих параметрах: $c_1 = 25$ cm, $c_2 = 30$ cm, $c_3 = 5$ cm, $c_4 = 5$ cm.

полиэтилена с содержанием бора 30% по массе (PB-30), а также слои свинца, необходимые для ослабления потока вторичного γ -излучения.

Численное моделирование с использованием кода RHITS [5] осуществлялось методом Монте-Карло в трехмерном пространстве. В модель входят источник нейтронов, система формирования нейтронного потока и образец. Источник нейтронов представляет собой круг, в каждой точке которого нейтроны излучаются изотропно с энергией 2.5 MeV. Такая модель приближенно описывает реальную ситуацию, в которой нейтроны генерируют-

ся в ходе D–D-реакции при попадании круглого ионного пучка на твердотельную дейтерийсодержащую мишень. В модели учитываются процессы взаимодействия нейтронов с веществом (упругие и неупругие), а также процессы захвата нейтронов, которые характеризуются образованием вторичных γ -квантов. Значения сечений столкновения нейтрона с ядрами взяты из базы данных JENDL-4.0 [6].

Схема системы формирования нейтронного потока с указанием ее геометрических параметров (c_1 – c_8) представлена на рис. 2. Она имеет цилиндрическую

симметрию относительно оси Z (без учета образца). Модель образца представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $5 \times 2.5 \times 10$ см и располагается внутри замедлителя. При таком расположении образца относительно мишени достигается наилучшая однородность потока по сравнению с другими положениями. Поперечный размер канала распространения ионного пучка является заданным ($c_5 = 5$ см), так как определяется шириной формируемого ионного пучка. Параметры c_7 и c_8 определяют толщину радиационной защиты, непосредственно окружающей источник нейтронов ($c_7 = c_8 = 5$ см).

По результатам каждого расчета вычисляется средний нейтронный поток (различных энергетических диапазонов) через облучаемый образец. В данном случае интерес представляет поток тепловых нейтронов. Необходимо максимизировать абсолютную величину потока и долю тепловых нейтронов в пучке. Эти условия не могут выполняться одновременно. Важно найти баланс между содержанием фракции тепловых нейтронов в пучке и абсолютным значением потока. Наибольшее влияние на поток оказывает расстояние между источником нейтронов и образцом (параметр c_6). По мере удаления от источника доля тепловых нейтронов в полном потоке растет (рис. 3, *a*), при этом средняя энергия нейтронов уменьшается. Выберем значение $c_6 = 15$ см в качестве оптимального, так как при дальнейшем увеличении расстояния нейтронный поток уменьшается значительно, а доля тепловых нейтронов меняется слабо.

Параметры c_1 – c_4 определяют размеры замедлителя и отражателя. Они оказывают меньшее влияние на нейтронный поток по сравнению с параметром c_6 . Заметим, что при увеличении толщины отражателя (параметр c_2) нейтронный поток монотонно растет (рис. 3, *b*). В качестве оптимального значения выберем $c_2 = 30$ см, так как далее поток изменяется незначительно. Параметры c_1 , c_3 и c_4 определяют геометрические размеры водного замедлителя. Поиск оптимальных размеров осуществлен путем перебора возможных комбинаций параметров с шагом сетки, равным 5 см. Максимальное значение потока тепловых нейтронов достигается при $c_1 = 25$ см, $c_3 = 5$ см, $c_4 = 5$ см. Расчет показал, что увеличение параметров c_3 , c_4 приводит к снижению потока тепловых нейтронов и увеличению потока γ -излучения на образце (при фиксированном значении c_1). Это объясняется тем, что увеличение толщины водного замедлителя вдоль оси Z приводит к тому, что часть нейтронов успевает поглотиться до попадания на образец.

На рис. 3, *c* показан энергетический спектр потока нейтронного и γ -излучения, усредненный по образцу. Пик нейтронного потока при больших энергиях соответствует быстрым нейтронам, которые не успели замедлиться до попадания на образец. Пик γ -излучения при энергии около 2.2 MeV обусловлен вторичными

квантами, образующимися при захвате нейтронов ядрами водорода.

Была проведена оптимизация геометрических параметров системы формирования нейтронного потока для D–D нейтронного генератора в ИПФ РАН. По результатам численных расчетов были определены оптимальные размеры водного замедлителя, свинцового отражателя и расстояние между областью генерации нейтронов и образцом. Результаты расчетов будут использованы на этапе конструкторских работ и изготовления первого опытного образца для данного экспериментального стенда.

Дальнейший план исследований включает в себя разработку системы формирования нейтронного потока эпитеплового энергетического диапазона. В ней будут использованы другие материалы в качестве замедлителя нейтронов (в основном MgF_2).

Также необходимо уточнить расчетную модель с учетом реальной геометрии и более корректно задать источник нейтронов (учесть разброс по начальным энергиям нейтронов и анизотропию). Это позволит сопоставлять результаты экспериментов по облучению клеточных культур с численными расчетами.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научного проекта „Новые источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц“, финансируемого Министерством образования РФ и реализуемого в соответствии с соглашением № 075-15-2021-1361 от 07.10.2021 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Dymova, S.Yu. Taskaev, V.A. Richter, E.V. Kuligina, *Cancer Commun.*, **40** (9), 406 (2020). DOI: 10.1002/cac2.12089
- [2] С.С. Выбин, И.В. Изотов, В.А. Скалыга, О.В. Палашов, Е.А. Миронов, *ЖТФ*, **92** (12), 1930 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53752.178-22 [S.S. Vybin, I.V. Izotov, V.A. Skalyga, O.V. Palashov, E.A. Mironov, *Tech. Phys.*, **67** (12), 1682 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.12.55205.178-22].
- [3] V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, S.V. Razin, A.V. Sidorov, M.E. Viktorov, *Rev. Sci. Instrum.*, **93** (3), 033502 (2022). DOI: 10.1063/5.0075486
- [4] Yu. Bykov, G. Denisov, A. Ereemeev, V. Gorbatushkov, V. Kurkin, G. Kalynova, V. Kholoptsev, A. Luchinin, I. Plotnikov, *Rev. Sci. Instrum.*, **75** (5), 1437 (2004). DOI: 10.1063/1.1690480

- [5] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P.-E. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, K. Niita, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55** (6), 684 (2018).
DOI: 10.1080/00223131.2017.1419890
- [6] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, J. Katakura, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48** (1), 1 (2011).
DOI: 10.1080/18811248.2011.9711675