

Модернизация ионного источника нейтронного генератора ИПФ РАН

© С.С. Выбин, И.В. Изотов, В.А. Скалыга, О.В. Палашов, Е.А. Миронов

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: vybinss@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2022 г.

В окончательной редакции 31 августа 2022 г.

Принято к публикации 14 сентября 2022 г.

Представлены результаты модернизации ионного источника нейтронного генератора, позволяющего работать в непрерывном режиме. Разработана магнитная ловушка, состоящая из постоянных магнитов (NdFeB). Для извлечения пучка ионов дейтерия использовалась 3-х электродная система экстракции, дополненная магнитной линзой. Сделаны расчеты формирования пучка ионов дейтерия с током более 500 мА и энергией 100 keV практически без потерь в системе экстракции.

Ключевые слова: система экстракции, магнитная ловушка, нейтронный генератор, ионный пучок.

DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53752.178-22

Введение

Источники нейтронов широко используются в фундаментальных и прикладных исследованиях [1]. Существуют нейтронные источники различных типов (ядерные реакторы [2], радиоизотопные источники [3], источники на основе ускорителей [4–12] и т.д.). Они востребованы для различных приложений (нейтронография, бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), нейтронная томография и т.д.).

В настоящей работе рассматривается нейтронный генератор в контексте его применения для БНЗТ. Для проведения БНЗТ необходим поток эпитепловых нейтронов с плотностью не менее $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [13]. В настоящее время разрабатывается и внедряется ряд нейтронных источников, построенных на базе протонных ускорителей во многих странах мира [14], которые удовлетворяют этому требованию. Для этих установок характерны токи пучка до десятков мА, а характерная энергия ионов составляет единицы–десятки MeV. Данные установки включают в себя ионный инжектор, ускоритель, мишень и модератор. Наиболее продвинутым источником такого типа сегодня является установка на базе тандемного ускорителя в ИЯФ СО РАН. В данной системе достигается полный нейтронный выход на уровне $5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ и обеспечивается необходимая плотность потока, достаточная для проведения терапии [15].

Однако количество нейтронных источников на базе протонного ускорителя насчитывает несколько десятков по всему миру. Следовательно, развитие технологии БНЗТ все еще сдерживается из-за нехватки доступных нейтронных источников достаточной интенсивности [16].

Среди генераторов нейтронов меньшего масштаба по сравнению с источниками, включающими в свой состав ускоритель, можно выделить портативные и компактные. Портативные источники (например, газонаполненные или вакуумные нейтронные трубки, производимые

ВНИИА им. Н.Л. Духова [17]) имеют пиковый нейтронный выход до 10^{10} s^{-1} , что недостаточно для применения в БНЗТ.

Под компактными нейтронными генераторами подразумеваются источники, построенные на ускоренных ионных пучках, извлекаемых из плазмы. В качестве примера можно рассмотреть следующие источники: Adelphi [18], НИИЭФА им. Д.В. Ефремова [19], LBNL [20], Lanzhou University [21]. Характерная энергия пучка составляет 100–300 keV при токе в единицы–десятки мА. Источники такого типа могут быть рассмотрены для приложений БНЗТ, но требуют существенных доработок для достижения требуемых характеристик.

В Институте прикладной физики РАН был ранее разработан компактный импульсный нейтронный генератор [22] на базе ЭЦР ионного источника SMIS (Simple Mirror Ion Source) с газодинамическим режимом удержания [23]. Плазма создается при помощи СВЧ излучения гиротрона [24,25] на частоте 37.5 GHz с мощностью до 100 kW и длительностью импульса 1 ms. Была проведена генерация нейтронов в ходе $D-D$ -реакции с выходом быстрых нейтронов (2.5 MeV) $1.2 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ при токе пучка 50 мА и энергии 75 keV в импульсном режиме с длительностью импульса порядка 1 ms [26]. Данный нейтронный генератор рассматривается не только для приложений БНЗТ [22,27], но и для нейтронной томографии [28–30,26].

Разработки Phoenix Nuclear Labs являются ближайшим аналогом источника ИПФ РАН [31]. Основным отличием нашей разработки является существенно больший проектный ток ионного пучка, сочетающийся с его высоким качеством. Также в разработках ИПФ РАН рассматривается как твердотельная, так и газовая мишень, в то время как Phoenix Nuclear Labs ориентированы только на газовые мишени большого объема, что приводит к снижению максимальной доступной плотности потока нейтронов на образце.

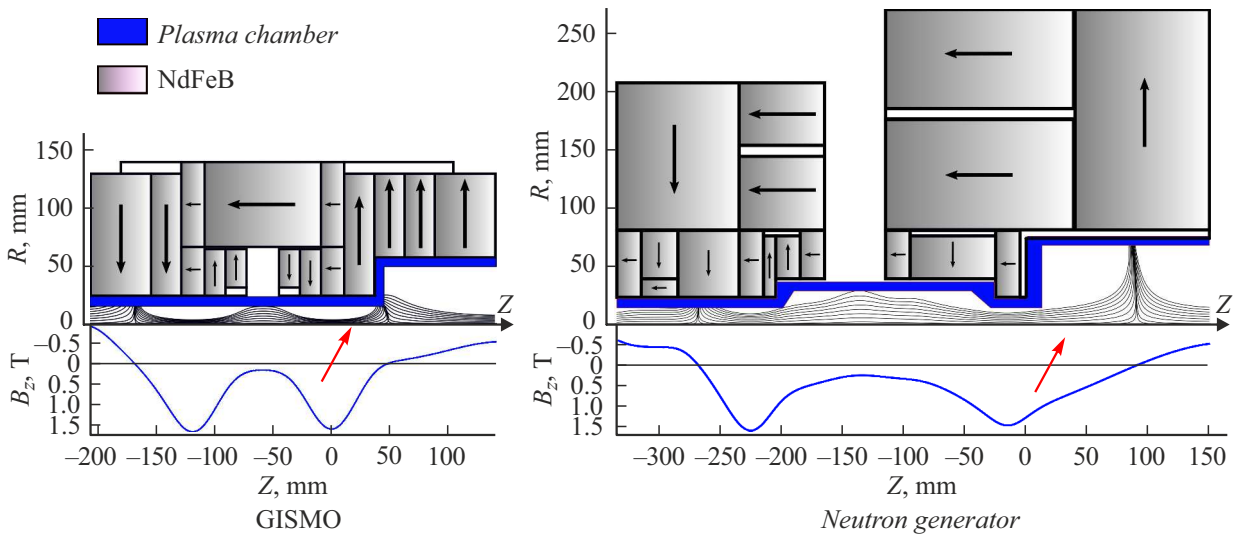


Рис. 1. Сравнение магнитных ловушек для установки GISMO (слева) и нейтронного источника (справа). На рисунках изображены постоянные магниты (направление намагниченности указано стрелками), показано сечение плазменной камеры. Построены силовые линии магнитного поля и его профиль на оси Z. В обоих случаях с левой стороны подается СВЧ излучение и производится напуск нейтрального газа, а с правой извлекается ионный пучок. Стрелкой отмечено приблизительное расположение системы экстракции. Схемы магнитных систем приведены в одинаковом масштабе.

Целью дальнейших разработок источника ИПФ РАН является повышение нейтронного выхода до 10^{11} s^{-1} за счет увеличения энергии пучка и его тока. Также необходим переход к непрерывному режиму работы и разработка системы замедления нейтронов для применения в БНЗТ.

На данном этапе модернизация нейтронного генератора включает в себя разработку следующих компонентов: магнитная система для удержания плазмы, система формирования ионного пучка, охлаждаемая плазменная камера, охлаждаемая мишень, модератор. В рамках настоящей работы рассматриваются первые две задачи.

Таким образом, целью работы является разработка магнитной системы и системы экстракции ионного пучка, позволяющие формировать пучок ионов дейтерия с током более 500 мА и энергией до 100 кэВ. При достижении указанных параметров пучка проектной величиной нейтронного выхода является 10^{11} s^{-1} .

1. Новая магнитная система

Основой для магнитной ловушки доработанного источника является магнитная система установки GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) [32,33]. Она состоит из набора постоянных магнитов с радиальной и аксиальной намагниченностью, представляющих собой кольца, которые формируют открытую магнитную ловушку конфигурации пробкотрон. Магнитная ловушка также имеет расширение внутреннего диаметра со стороны извлечения ионного пучка для более удобного размещения системы экстракции. Текущая плазменная камера не позволяет в полной мере при-

менять ее для интенсивного компактного нейтронного источника из-за того, что систему экстракции необходимо размещать в узкой части (рис. 1). Ловушка установки GISMO имеет следующие параметры: магнитное поле в пробке со стороны инжекции $B_{inj} = 1.61 \text{ T}$, минимальное поле на оси $B_{min} = 0.26 \text{ T}$, поле в пробке со стороны экстракции $B_{ext} = 1.61 \text{ T}$, масса магнитов $M = 132 \text{ kg}$, объем плазмы $V_{plasma} = 36 \text{ cm}^3$, максимальная площадь поперечного сечения плазменной трубки $S_{plasma} = 8 \text{ cm}^2$, расстояние между пробками $L = 120 \text{ mm}$.

При разработке новой магнитной системы преследовались следующие цели: перенос пробки магнитной ловушки ближе к расширителю (для того, чтобы разместить экстрактор непосредственно в расширенной части), а также увеличение поперечного сечения плазмы (для повышения максимально доступного тока пучка, который можно извлечь). Необходимо увеличить линейные размеры плазменной трубки приблизительно в 2 раза. При этом величины B_{inj} , B_{min} , B_{ext} новой ловушки должны быть примерно равны значениям для магнитной ловушки GISMO (с точностью до 10%) при минимально возможной массе магнитов. Расчеты магнитного поля проводились с использованием COMSOL Multiphysics.

Для снижения массы магнитного материала используется плазменная камера с переменным сечением (рис. 1), которая имеет широкую часть в области пространства между магнитными зеркалами и тем самым повторяет форму плазменной трубки. Магнит состоит из двух частей, что обусловлено формой плазменной камеры. Дополнительным преимуществом такой конфигурации является возможность размещения портов для

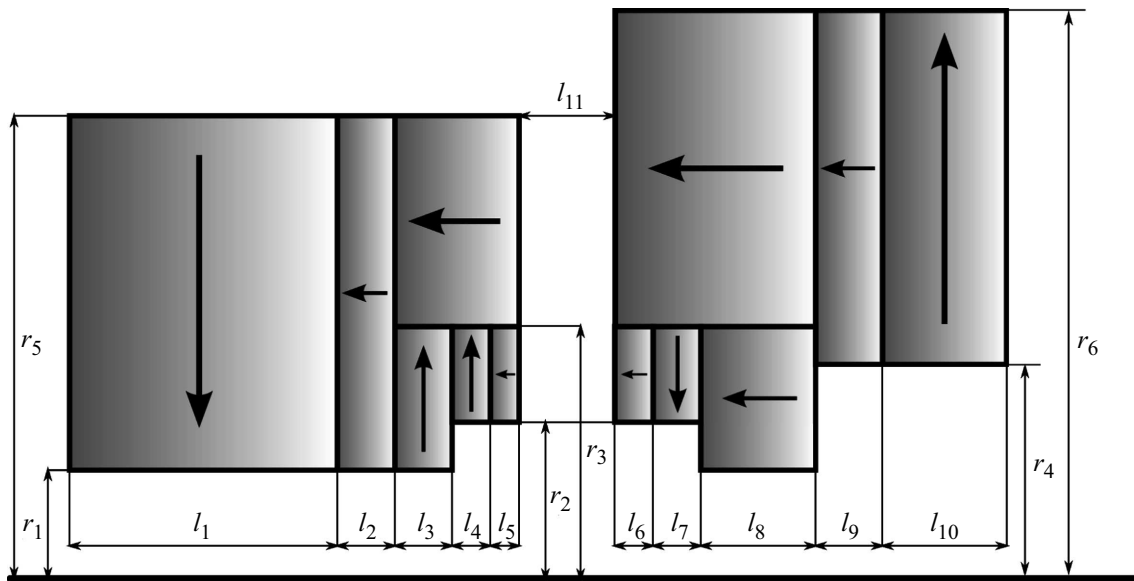


Рис. 2. Сечение магнитной системы и ее геометрические параметры. Стрелками указано направление вектора намагниченности. Нижняя горизонтальная линия является осью симметрии. СВЧ излучение подается слева в плазменную камеру, а ионный пучок извлекается справа.

непосредственной диагностики плазмы в пространстве между магнитами.

Магнитная ловушка однозначно задается геометрическими параметрами своих составных частей (внутренним диаметром, толщиной, наружным диаметром каждого из колец) (рис. 2). Некоторые из параметров ($r_1 = 25 \text{ mm}$, $r_2 = 40 \text{ mm}$, $r_4 = 80 \text{ mm}$, $l_{11} = 50 \text{ mm}$, $l_9 + l_{10} = 150 \text{ mm}$) определяются внешними факторами (например, ограничения на параметры расширителя, накладываемые со стороны экстрактора). Остальные параметры варьировались для получения магнитной ловушки с требуемыми характеристиками.

По результатам расчетов магнитная ловушка имеет следующие параметры: магнитное поле в пробке со стороны инжекции $B_{inj} = 1.6 \text{ T}$, $B_{min} = 0.26 \text{ T}$, $B_{ext} = 1.49 \text{ T}$, суммарная масса магнитов $M = 550 \text{ kg}$, $V_{plasma} = 288 \text{ cm}^3$, $S_{plasma} = 30 \text{ cm}^2$, $L = 210 \text{ mm}$. Для нагрева плазмы в непрерывном режиме предполагается использование технологического гиротрона с частотой 28 GHz и мощностью до 10 kW [34]. Также будет спроектирована плазменная камера с принудительным водяным охлаждением.

2. Система формирования пучка

При формировании ионного пучка с током в несколько сотен мА важную роль играет его собственный пространственный заряд. Для эффективного формирования данного ионного пучка необходимо добиться высокой компенсации пространственного заряда пучка. Двухэлектродная система экстракции пучка, обладающая наиболее простой конструкцией, не обеспечивает необходи-

мой степени компенсации. Причина этого в том, что электроны, компенсирующие пространственный заряд, теряются из пучка под действием электрического поля, ускоряющего ионы. Для того чтобы исключить этот канал потерь электронов, применяется трехэлектродная система, состоящая из плазменного электрода, вытягивающего электрода (пуллера) и заземленного электрода. Аналогичные системы (например, такие экстракторы описаны в монографии под редакцией Я. Брауна [35]) широко применяются в ионных источниках [36,37]. Пуллер имеет отрицательный потенциал и создает потенциальный барьер для электронов, компенсирующих пространственный заряд пучка. Применение электростатических линз для управления формой пучка недопустимо, так как при этом локально нарушается компенсация пространственного заряда. Поэтому система экстракции дополнена магнитной линзой, которая формирует слабо расходящийся ионный пучок (рис. 3). Введем следующие параметры экстрактора: D_1 — диаметр отверстия плазменного электрода в [mm], L — межэлектродное расстояние в [mm], D_2 — диаметр отверстия пуллера в [mm].

Для проведения расчета используется пакет библиотек для численного моделирования IBSimu [38]. Необходимо знать следующие характеристики потока плазмы, из которого формируется ионный пучок: температура ионов ($T_i = 1 \text{ eV}$, что является характерным значением для ЭЦР ионных источников), электронная температура ($T_e = 50 \text{ eV}$ — значение, соответствующее экспериментальным результатам [39]), энергия поступательного движения ионов ($E_0 = 50 \text{ eV}$, что соответствует критерию Бома [40]), потенциал плазмы ($U_{plasma} = 50 \text{ V}$ — численное значение выбрано равным электронной температуре в качестве оценки величины). Для простоты считается,

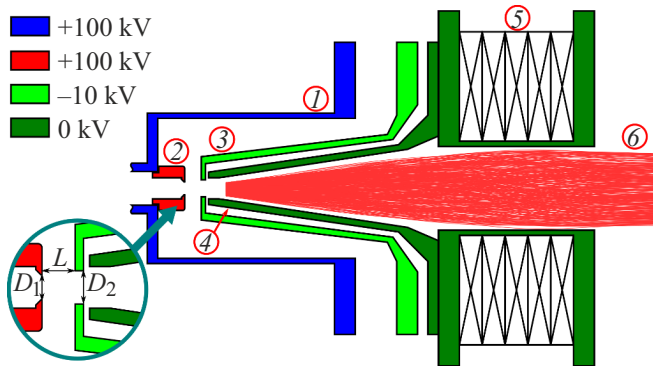


Рис. 3. Изображение системы экстракции, в которую включены плазменный электрод 2 с плазменной камерой 1, пуллер 3, заземленный электрод 4, соленоид 5. Также указаны траектории ионного пучка 6. Система экстракции со своими геометрическими параметрами показана крупным планом.

что ионный пучок состоит полностью из ионов дейтерия. В расчетах предполагается, что степень компенсации пространственного заряда пучка равна 90%, что является характерным значением для пучков легких ионов с энергией порядка 100 keV и током в сотни mA [41,42]. Потенциал плазменного электрода равен $\varphi_{pl} = +100$ kV, пуллера — $\varphi_{pu} = -10$ kV. Магнитное поле от соленоида имеет величину 0.5 T в его центре. При расчете предполагается плотность потока ионов, извлекаемого из плазмы, равная $500 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Указанная плотность потока ионов дейтерия предполагается достижимой, так как на установке GISMO было экспериментально показано, что эмиссионная способность водородной плазмы превышает $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ [43].

Основная трудность при построении системы формирования пучка для ускоряющих напряжений порядка 100 kV — это учет электрического пробоя пространства между плазменным электродом и пуллером. Для конкретной системы экстракции определить частоту возникновения пробоев можно лишь экспериментально из-за наличия ионного пучка и внешнего магнитного поля в межэлектродном пространстве. Однако существует оценка минимального расстояния между плоскими электродами, при котором не происходит возникновение пробоев (критерий Килпатрика) [44]:

$$L = 0.01414 U^{3/2},$$

где L — межэлектродное расстояние в [mm], а U — напряжение экстракции в [kV]. Для используемого напряжения $U = \varphi_{pl} - \varphi_{pu} = 110$ kV минимальное межэлектродное расстояние составляет $L = 16$ mm, что дает ограничение этого параметра снизу.

Для определения оптимальных параметров экстрактора проведем расчеты формирования пучка для различных значений (D_1, L, D_2). Важно получить максимальный ток пучка на выходе из экстрактора при минимальных его потерях. На рис. 4. показаны зависимости токов

пучка на выходе из экстрактора и тока на заземленный электрод. При этом ток пучка на пуллер во всех случаях равен нулю.

Для значений апертуры плазменного электрода $D_1 = 8$ и 10 mm формируемый ионный пучок не имеет потерь, но его полный ток меньше требуемого значения. В рассматриваемом диапазоне межэлектродных расстояний ($L \geq 16$ mm) ионный пучок на выходе имеет приблизительно одинаковый ток для экстракторов с $D_1 = 12$ и 14 mm, т.е. увеличение апертуры не привело к повышению тока на выходе, а дополнительные ионы осели на заземленном электроде. Таким образом, оптимальными параметрами системы экстракции являются $D_1 = 12$ mm и $L = 16$ mm. Полный ионный ток на выходе из экстрактора составляет 560 mA, а потери пучка около 5 mA, что является пренебрежимо малой величиной с точки зрения эффективности системы формирования пучка. При этом ионный пучок будет оседать на заземленном электроде и на нем будет непрерывно выделяться порядка 500 W тепловой мощности. Для обеспечения теплоотвода будет организовано принудительное водяное охлаждение.

Рассмотрим еще один возможный вариант системы экстракции. Предлагается использовать систему формирования пучка с неоднородным электрическим полем [45,46] (рис. 5).

Отличительной особенностью данного экстрактора является вытянутая форма плазменного электрода, обеспечивающая увеличение электрического поля вблизи плазменного мениска. Это позволяет формировать ион-

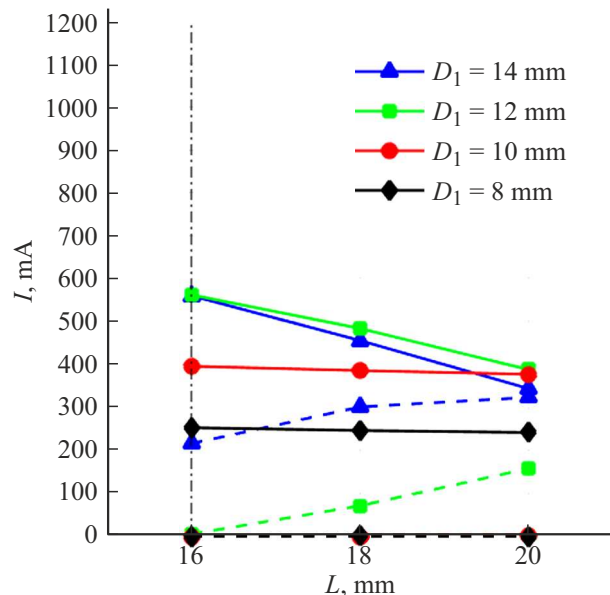


Рис. 4. Зависимость тока пучка на выходе из экстрактора (сплошная линия) и тока на заземленный электрод (штриховая линия) от межэлектродного расстояния для различных величин апертуры плазменного электрода. Вертикальной чертой обозначена оценка минимального допустимого расстояния между электродами.

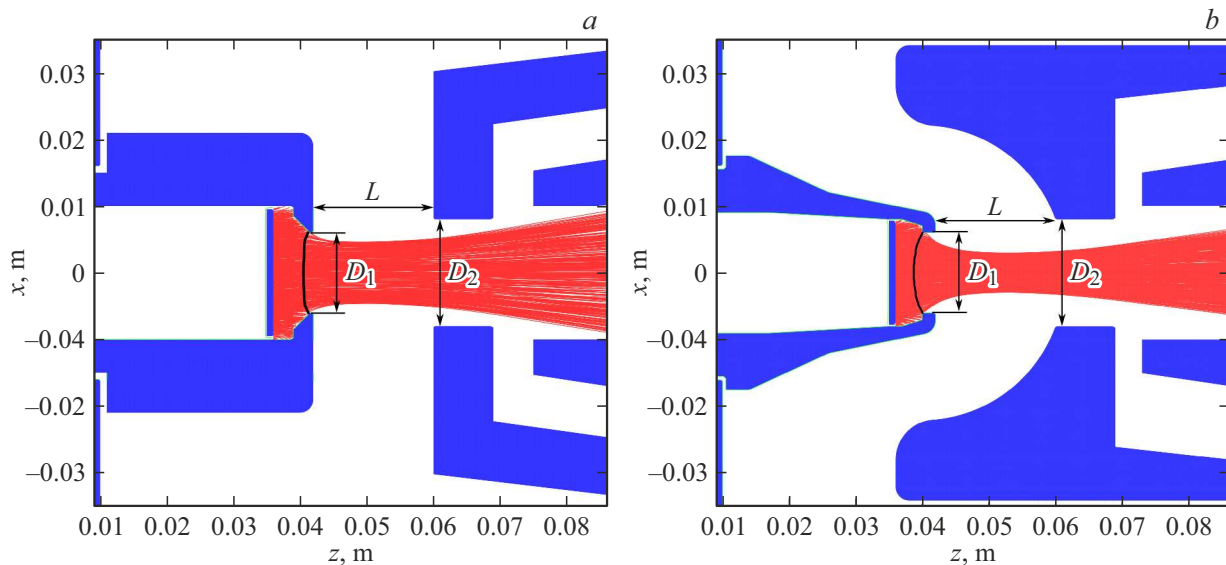


Рис. 5. Сравнение систем формирования пучка: плоской (а) и системы с неоднородным полем (b). Синим цветом (в онлайн версии) обозначены электроды, красным (в онлайн версии) — траектории ионов. Черная линия обозначает плазменный мениск.

ный пучок с большей плотностью тока по сравнению с плоским экстрактором. Также перераспределение электрического поля в ускоряющем промежутке приводит к уменьшению поля на поверхности пуллера, что снижает вероятность пробоев. Последний фактор является важным в рассматриваемом случае. На рис. 5 приведено сравнение формирования ионного пучка для экстракторов с параметрами $D_1 = 12$ mm, $L = 18$ mm и $D_2 = 16$ mm для случаев плоской геометрии и экстрактора с неоднородным полем. Видно, что мениск сильнее изогнут в сторону плазмы для последнего случая, что говорит о меньшем пространственном заряде пучка в этой области. Для плоской геометрии в этой конфигурации потери пучка составляют 70 mA, а для экстрактора с неоднородным полем — 5 mA. Меньшие потери являются следствием меньшей расходимости ионного пучка на выходе из ускоряющего промежутка. Большая расходимость пучка в плоском случае обусловлена действием пространственного заряда.

Заключение

В работе проведена разработка магнитной системы и системы формирования пучка в ионном источнике нейтронного генератора. Основной целью является переход нейтронного генератора на непрерывный режим работы и достижение необходимого запаса электропрочности для достижения ускоряющего напряжения порядка 100 kV. Были определены параметры системы экстракции, позволяющие формировать пучок ионов дейтерия с током более 500 mA и малыми потерями в экстракторе. Также предложено использование экстрактора с неоднородным полем, который при той же эффективности извлечения пучка обеспечивает значительно

большую электропрочность ускоряющего промежутка. В дальнейшем необходимо будет изготовить и провести испытания системы экстракции для того, чтобы убедиться в отсутствии пробоев межэлектродного пространства.

Следующим этапом в разработке компактного непрерывного источника является проектировка нейтронообразующей мишени, способной работать в непрерывном режиме. Мощность тепловой нагрузки на мишень от попадания пучка с током 500 mA и энергией 100 keV составляет 50 kW в непрерывном режиме, поэтому основной задачей в реализации интенсивного компактного нейтронного источника является отвод тепла от мишени.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научного проекта „Новые источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц“, финансируемого Министерством образования Российской Федерации 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] Y. Kiyonagi. AAPPS Bull., **31** (1), 1–19 (2021). DOI: 10.1007/s43673-021-00022-3
- [2] M.V. Kovalchuk, S.L. Smolskiy, K.A. Konoplev. Crystallogr. Rep., **66** (2), 188–194 (2021). DOI: 10.1134/S106377452102005X

- [3] M. Schulc, M. Košťál, E. Novák, R. Kubín, J. Šimon. *Appl. Radiat. Isotopes*, **151**, 187–195 (2019). DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.06.012
- [4] Y.K. Batygin, R.W. Garnett, L. Rybarczyk. *Proc. 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB'18)* (Daejeon, Korea, 2018), p. 70–74.
- [5] J.W.G. Thomason. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **917**, 61–67 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.11.129
- [6] N. Holtkamp. *Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2004)* (Lübeck, Germany, 2004), p. 837–841.
- [7] M.L. Friend. *Proc. IBIC'18* (Shanghai, China, 2018), p. 85–88. DOI: 10.18429/JACoW-IBIC2018-MOPB07
- [8] A. Pisent, E. Fagotti, P. Colautti. *Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2014)* (Geneva, Switzerland, 2014), p. 261–263.
- [9] M. Eshraqi, I. Bustinduy, L. Celona, M. Comunian, H. Danared, R. De Prisco, F. Grespan, M. Lindroos, D. McGinnis, R. Miyamoto, M. Muñoz, S. Møller, A. Ponton, E. Sargsyan, H. Thomsen. *Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14)* (Dresden, Germany, 2014), p. 3320–3322. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2014-THPME043
- [10] I. Mardor, O. Aviv, M. Avrigeanu, D. Berkovits, A. Dahan, T. Dickel, I. Eliyahu, M. Gai, I. Gavish-Segev, S. Halfon, M. Hass, T. Hirsh, B. Kaiser, D. Kijel, A. Kreisel, Y. Mishnayot, I. Mukul, B. Ohayon, M. Paul, A. Perry, H. Rahangdale, J. Rodnizki, G. Ron, R. Sasson-Zukran, A. Shor, I. Silverman, M. Tessler, S. Vaintraub, L. Weissman. *Eur. Phys. J. A*, **54** (5), (2018). DOI: 10.1140/epja/i2018-12526-2
- [11] U. Ratzinger, M. Basten, L.P. Chau, H. Dinter, M. Droba, M. Heilmann, M. Lotz, D. Mäder, O. Meusel, I. Müller, Y. Nie, D. Noll, H. Podlech, A. Schempp, W. Schweizer, K. Volk, C. Wiesner, C. Zhang. *Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2011)* (San Sebastián, Spain, 2011), p. 2577.
- [12] G. Kropachev, T. Kulevoy, A. Sitnikov. *J. Surf. Invest. X-Ray*, **13** (6), 1126–1131 (2019). DOI: 10.1134/S1027451019060399
- [13] *IAEA-TECDOC-1223. Current Status of Neutron Capture Therapy* (IAEA, 2001), 302 p.
- [14] Y. Kiyonagi, Y. Sakurai, H. Kumada, H. Tanaka. *AIP Conf. Proc.*, **2160**, 050012 (2019). DOI: 10.1063/1.5127704
- [15] L. Zaidi, M. Belgaid, S. Taskaev, R. Khelifi. *Appl. Radiat. Isotopes*, **139**, 316–324 (2018). DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.05.029
- [16] M.A. Dymova, S.Y. Taskaev, V.A. Richter, E.V. Kuligina. *Cancer Commun.*, **40** (9), 406–421 (2020). DOI: 10.1002/cac2.12089
- [17] Е.П. Боголюбов, В.И. Рыжков. *ПТЭ*, **2**, 160–163 (2004).
- [18] J.H. Vainionpää, J.L. Harris, M.A. Piestrup, C.K. Gary, D.L. Williams, M.D. Apodaca, J.T. Cremer, Q. Ji, B.A. Ludewigt, G. Jones. *AIP Conf. Proc.*, **1525**, 118–122 (2013) DOI: 10.1063/1.4802303
- [19] Join Stock Company „D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus“. High-voltage accelerators for activation analysis. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.niefa.spb.su/site/left/accelerat/direct/activation_/?lang=en, свободный. (дата обращения: 08.10.2022)
- [20] M. Ayllon, P.A. Adams, J.C. Batchelder, J.D. Bauer, T.A. Becker, L.A. Bernstein, S.-A. Chong, J. James, L.E. Kirsch, K.-N. Leung, E.F. Matthews, J.T. Morrell, P.R. Renne, A.M. Rogers, D. Rutte, A.S. Voyles, K. Van Bibber, C.S. Waltz. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **903**, 193–203 (2018). DOI: 10.1016/j.nima.2018.04.020
- [21] Z.-W. Huang, J.-R. Wang, Z. Wei, X.-L. Lu, Z.-W. Ma, J.-L. Ran, Z.-M. Zhang, Z.-E. Yao, Y. Zhang. *J. Instrum.*, **13** (1), P01013 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/p01013
- [22] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Strelkov, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas. *J. Appl. Phys.*, **118** (9), 093301 (2015). DOI: 10.1063/1.4929955
- [23] V.A. Skalyga, S.V. Golubev, I.V. Izotov, R.L. Lapin, S.V. Razin, A.V. Sidorov, R.A. Shaposhnikova. *Plasma Phys. Rep.*, **45** (10), 984–989 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19080087
- [24] M.K.A. Thumm, G.G. Denisov, K. Sakamoto, M.Q. Tran. *Nucl. Fusion*, **59** (7), 073001 (2021). DOI: 10.1088/1741-4326/ab2005
- [25] T. Idehara, S.P. Sabchevski, M. Glyavin, S. Mitsudo. *Appl. Sci.*, **10** (3), 980 (2020). DOI: 10.3390/app10030980
- [26] S.V. Golubev, V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S.S. Vybin, A.F. Bokhanov, M.Yu. Kazakov, S.P. Shlepnev, K.F. Burdonov, A.A. Soloviev, M.V. Starodubtsev. *J. Instrum.*, **16** (2), T02008–T02008 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/02/T02008
- [27] V.A. Skalyga, S.V. Golubev, I.V. Izotov, R.A. Shaposhnikov, S.V. Razin, A.V. Sidorov, A.F. Bokhanov, M.Yu. Kazakov, R.L. Lapin, S.S. Vybin. *Rev. Sci. Instrum.*, **90** (12), 123511 (2019). DOI: 10.1063/1.5128458
- [28] S. Golubev, V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov. *J. Instrum.*, **12** (2), T02003–T02003 (2017). DOI: 10.1088/1748-0221/12/02/T02003
- [29] S.V. Golubev, V.A. Skalyga, I.V. Izotov, A.V. Sidorov, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, R.L. Lapin, A.F. Bokhanov, M.Yu. Kazakov. *J. Instrum.*, **14** (1), C01007–C01007 (2019). DOI: 10.1088/1748-0221/14/01/C01007
- [30] V.A. Skalyga, S.V. Golubev, I.V. Izotov, R.A. Shaposhnikov, S.V. Razin, A.V. Sidorov, A.F. Bokhanov, M.Yu. Kazakov, R.L. Lapin, S.S. Vybin. *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (1), 013331 (2020). DOI: 10.1063/1.5128639
- [31] G.L. Kulcinski, R.F. Radel, A. Davis. *Fusion Eng. Des.*, **109–111**, 1072–1076 (2016). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.01.022
- [32] V.A. Skalyga, A.F. Bokhanov, S.V. Golubev, I.V. Izotov, M.Yu. Kazakov, E.M. Kiseleva, R.L. Lapin, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S.S. Vybin. *Rev. Sci. Instrum.*, **90** (12), 123308 (2019). DOI: 10.1063/1.5128489
- [33] V.A. Skalyga, I.V. Izotov, E.A. Mironov, A.V. Voitovich, O.V. Palashov. *AIP Conf. Proc.*, **1771**, 070014 (2016). DOI: 10.1063/1.4964238
- [34] Y. Bykov, G. Denisov, A. Ereemeev, V. Gorbatushkov, V. Kurkin, G. Kalynova, V. Kholoptsev, A. Luchinin, I. Plotnikov. *Rev. Sci. Instrum.*, **75** (5), 1437–1439 (2004). DOI: 10.1063/1.1690480
- [35] Я. Браун. *Физика и технология источников ионов* (Мир, 1998), 496 с.
- [36] V. Toivanen, C. Barué, C. Feierstein, P. Jardin, F. Lemagnen, L. Maunoury, F. Noury, P. Rousseau. *Proc. 17th Int. Conf. Ion Sources*. **2011**, 040008 (2018). DOI: 10.1063/1.5053282
- [37] Q. Wu, Z.M. Zhang, L.T. Sun, Y. Yang, H.Y. Ma, Y. Cao, X.Z. Zhang, H.W. Zhao. *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2), 02A703 (2014). DOI: 10.1063/1.4824804
- [38] T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje, H. Clark. *Rev. Sci. Instrum.*, **81** (2), 02B703 (2010). DOI: 10.1063/1.3258608

- [39] V.A. Skalyga, I.V. Izotov, A.V. Sidorov, S.V. Golubev, S.V. Razin. *Rev. Sci. Instrum.*, **88** (3), 033503 (2017). DOI: 10.1063/1.4978278.
- [40] K.-U. Riemann. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24** (4), 493–518 (1991). DOI: 10.1088/0022-3727/24/4/001
- [41] R. Ferdinand, J. Sherman, R.R. Stevens, T. Zaugg. *Proc. Particle Accelerat. Conf.*, **3**, 2723–2725 (1997). DOI: 10.1109/PAC.1997.752744
- [42] N. Chauvin, O. Delferrière, R. Duperrier, R. Gobin, P.A.P. Nghiem, D. Uriot. *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2), 02B320 (2012). DOI: 10.1063/1.3678658
- [43] V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.S. Vybin, T.V. Kulevoy, G.N. Kropachev, A.L. Sitnikov, S.V. Grigoriev. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2244** (1), 012092 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2244/1/012092
- [44] W.D. Kilpatrick. *Rev. Sci. Instrum.*, **28** (10), 824–826 (1957). DOI: 10.1063/1.1715731
- [45] S.S. Vybin, I.V. Izotov, V.A. Skalyga. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29** (11), 11LT02 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/abbf9c
- [46] S.S. Vybin, V.A. Skalyga, I.V. Izotov, S.V. Golubev, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, M.Yu. Kazakov, A.F. Bokhanov, S.P. Shlepnev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **30** (12), 125008 (2021). DOI: 10.1088/1361-6595/ac38af