

УДК 533.9.0

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПРОТОННОГО ИНЖЕКТОРА КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА DARIA

© 2023 г. С. С. Выбин^а, *, И. В. Изотов^а, Е. А. Миронов^а,
О. В. Палашов^а, В. А. Скалыга^а

^аФедеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: vybins@ipfran.ru

Поступила в редакцию 30.12.2022 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принята к публикации 28.02.2023 г.

Настоящая статья посвящена усовершенствованию магнитной ловушки и системы формирования пучка электронного циклотронного резонансного ионного источника GISMO для его применения в качестве протонного инжектора – составной части линейного ускорителя компактного источника нейтронов. Была разработана открытая магнитная ловушка, состоящая из постоянных магнитов (на основе сплава Nd–Fe–B). Она адаптирована для более технологичного размещения системы экстракции в части плазменной камеры с большим внутренним диаметром по сравнению с источником GISMO. Затем была проведена оптимизация трехэлектродной системы формирования пучка. Показано, что при проектных параметрах системы возможно эффективное использование дополнительной магнитной линзы в виде соленоида для получения на выходе протонного пучка с малым углом расходимости. В результате численного моделирования была показана возможность использования данной магнитной ловушки и системы экстракции в составе протонного инжектора для проекта DARIA. Обсуждены следующие шаги в построении протонного источника.

Ключевые слова: ионные источники, сильноточные ионные пучки, электронный циклотронный резонансный разряд, газодинамический ионный источник, магнитная ловушка, постоянные магниты, система формирования ионного пучка, численное моделирование, протонный пучок.

DOI: 10.31857/S1028096023070191, **EDN:** TENEJK

ВВЕДЕНИЕ

Ионные источники на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) [1] имеют долгую историю. Первые ЭЦР ионные источники (MAFIOS и SUPERMAFIOS) были разработаны научной группой под руководством Р. Желлера в 60–70-х гг. XX века в Гренобле [2]. В источниках такого типа электроны в плазме удерживаются в магнитной ловушке, а их нагрев под действием внешнего СВЧ-излучения происходит в результате прохода через резонансные зоны. Отличительной особенностью генераторов плазмы данного типа является возможность получения многозарядных ионов с низким разбросом по энергиям, а удобство использования и надежность конструкции обеспечили широкое распространение. ЭЦР ионные источники очень разнообразны. Существуют компактные установки [3] с мощностью СВЧ-излучения на уровне 0.1–10.0 Вт и в то же время есть ионные источники с поглощаемой мощностью излучения в сотни кВт [4]. По мере развития источников ЭЦР-типа стали ясны шаги по улучшению таких установок: увеличение ча-

стоты внешнего СВЧ-излучения приводит к повышению концентрации плазмы и средней кратности ионизации [5]. И по сей день этот путь модернизации источников является основным. Уже существуют и функционируют 3 поколения ЭЦР ионных источников и разрабатывают источники четвертого поколения [6]. Принцип работы источников разных поколений оставался неизменным, но росла величина магнитного поля в ловушке и, соответственно, частота нагрева. Для первого поколения ЭЦР ионных источников характерны частоты излучения в диапазоне от 5 до 10 ГГц, для второго – от 10 до 20 ГГц. Для создания ловушки в этих источниках применяют теплые магниты и соленоиды. С переходом к источникам третьего поколения [7, 8] (с частотой нагрева в диапазоне от 20 до 30 ГГц) неизбежным стало использование сверхпроводников. Источники четвертого поколения [9] (с частотой нагрева более 30 ГГц) также проектируют с использованием сверхпроводящих магнитов, но более совершенной конструкции (а также с учетом опыта,

полученного при работе с источниками третьего поколения).

Для нагрева плазмы используют генераторы микроволнового излучения различных типов. Широко распространенные ЭЦР ионные источники на частоте 2.45 ГГц используют магнетрон [10, 11]. В ЭЦР ионных источниках второго поколения часто применяют клистроны и лампы бегущей волны [12, 13]. При увеличении частоты и мощности СВЧ-излучения безальтернативными источниками являются гиротроны [14]. Последние отличаются от остальных СВЧ-генераторов высоким уровнем выходной мощности (вплоть до 1 МВт в непрерывном режиме [15]) и высокой частотой излучения (до 1 ТГц [16]). Кроме использования в ионных источниках, их активно применяют для нагрева плазмы в установках термоядерного синтеза, для проведения спектроскопических исследований и для микроволновой обработки материалов.

Для создания и удержания плазмы применяют различные конфигурации: многокасповая [17]; типа “min-B” в конфигурации с гексаполем [18]; типа “min-B” в конфигурации “бейсбол” [19]; простой пробкотрон [20]; пробкотрон с объемной резонансной зоной [21]; касповая [22].

ЭЦР ионные источники можно разделить на два вида по типу удержания плазмы: классические [23] и газодинамические [24].

Классический режим удержания можно охарактеризовать бóльшим временем кулоновского рассеяния электронов по сравнению с газодинамическим временем выноса плазмы из ловушки. Следовательно, “конус потерь” – область в пространстве скоростей, частицы в которой (т.е. с такими скоростями) не могут быть удержаны ловушкой – остается незаполненным, так как время жизни электронов в этой области меньше, чем характерное время их переноса в “конус потерь”. Для существующих ионных источников характерное время жизни электрона в ловушке составляет ~ 1 мс. За это время в процессе нагрева электроны могут приобрести высокую энергию (~ 100 кэВ). Электроны с такой энергией участвуют в получении ионов с высокой кратностью заряда. Для таких источников характерен высокий средний заряд ионного пучка, но ток пучка относительно небольшой (< 10 мА), что является следствием относительно долгого времени жизни плазмы. Плазменные неустойчивости могут снизить время жизни плазмы и поэтому их необходимо подавлять. В источниках классического типа в основном используют магнитные ловушки типа “min-B”, обеспечивающие подавление магнито-гидродинамических неустойчивостей.

Газодинамические ЭЦР ионные источники были разработаны в Институте прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН) в ходе исследований ЭЦР разряда в простой зер-

кальной магнитной ловушке под воздействием мощного излучения гиротронов с длиной волны внутри диапазона 1–1000 мм. Изначально эти исследования были мотивированы попыткой существенного усовершенствования традиционных источников многозарядных ионов за счет значительного повышения частоты греющего излучения в соответствии с хорошо известными правилами подобия для таких систем. Однако первые эксперименты на установке в ИПФ РАН были возможны только в импульсном режиме при длительности импульса ~ 1 мс. Это наложило принципиальные ограничения на диапазон давлений нейтрального газа в плазменной камере, в котором было возможно развитие разряда за столь короткое время. Рабочие давления оказались существенно выше, чем в традиционных источниках многозарядных ионов, что не позволило реализовать характерные для таких систем условия горения плазмы. Высокие частоты столкновений в формируемой плотной плазме привели к тому, что механизм удержания плазмы оказался сильностолкновительным с газодинамическим истечением плазмы через пробки ловушки (время рассеяния электронов в “конус потерь” оказалось меньше времени газодинамического выноса плазмы из ловушки), в отличие от бесстолкновительного режима удержания разреженной горячей плазмы в традиционных ЭЦР источниках.

Время жизни частиц газодинамической плазмы в компактной магнитной ловушке составило несколько десятков мкс, что на несколько порядков меньше, чем в классических системах. В этом случае плотность потока ионов на два порядка превосходит показатели классических источников, а ток пучка может достигать нескольких сотен мА [25]. Большие, по сравнению с классическими источниками, потери электронов существенно сказались на их средней энергии. Даже при мощности нагрева на уровне 100 кВт температура электронов не превышала нескольких сотен эВ. Из этого следует тот факт, что средняя кратность заряда ионов в плазме меньше по сравнению с классическими источниками. Плотность плазмы была в диапазоне $10^{13}–10^{14}$ см $^{-3}$. Для удержания плазмы используют осесимметричные ловушки (пробкотрон, касп), имеющие более простую конструкцию. В них достижимы более высокие значения магнитного поля (по сравнению с классическими источниками), что позволяет применять нагрев на более высокой частоте (например, был реализован нагрев на частоте 75 ГГц [26]).

Газодинамическим ЭЦР ионным источникам нашли заметное число применений, где описанное выше сочетание параметров плазмы (температура несколько сотен эВ, плотность $10^{13}–10^{14}$ см $^{-3}$) оказалось крайне выгодно. Ионные источники на основе этого разряда позволили формировать ионные пучки легких ионов или тяжелых ионов с умеренным средним зарядом с рекордными то-

ками при их высоком качестве (с низким эмиттансом).

Газодинамические источники можно применять как источник многозарядных ионов [27]; инжектор пучков легких ионов высокой интенсивности [20]; источник пучков отрицательных ионов водорода [28]; источник вакуумного ультрафиолетового излучения [29]; источник широкоапертурных плотных пучков ионов [30]; компактный нейтронный генератор для бор-нейтронозахватной терапии [31]; точечный источник нейтронов для нейтронной томографии [32, 33].

На данный момент в Институте прикладной физики РАН разработаны два ЭЦР ионных источника с газодинамическим типом удержания. Экспериментальная установка SMIS 37 [4] (Simple Mirror Ion Source) предназначена для работы в импульсном режиме. Плазма поддерживается излучением гиротрона с частотой 37.5 ГГц и мощностью до 100 кВт, магнитное поле создается соленоидами, работающими в импульсном режиме. Другая установка GISMO [34] может работать в непрерывном режиме. Ее магнитная ловушка состоит из постоянных магнитов [35]. Плазма создается с помощью СВЧ-излучения гиротрона на частоте 28 ГГц и с мощностью до 10 кВт.

Рассмотрим подробнее ионный источник в контексте его использования для компактного нейтронного источника на базе линейного ускорителя. Среди существующих установок и проектов нейтронных генераторов этого типа (IFMIF [36], SARAF [37], FRANZ [38], MUNES [39], DARIA [40]) большинство имеет в качестве инжектора легких ионов источник на основе ЭЦР разряда.

К ионному инжектору предъявляют следующие требования. Он должен создавать пучок легких ионов с низким эмиттансом и высоким током (порядка нескольких сотен мА). Также важным условием является продолжительная и стабильная работа источника ионов, что является залогом бесперебойной работы нейтронной установки в целом. Не всегда указанные требования могут быть выполнены.

С этой точки зрения, газодинамические ЭЦР ионные источники обладают всеми необходимыми свойствами для того, чтобы быть использованными в качестве инжекторов легких ионов для компактных нейтронных источников.

ПРОТОТИП ПРОТОННОГО ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ПРОЕКТА DARIA

Для начала опишем подробно требования, которым должен удовлетворять протонный инжектор. На выходе из инжектора необходимо создать импульсный протонный пучок с током 100 мА, длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения до 1 кГц, энергией в диапазоне 40–60 кэВ,

полным нормализованным эмиттансом (по доле пучка 95%) около $1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

В ИПФ РАН оба газодинамических источника (SMIS и GISMO) могут быть рассмотрены в качестве инжектора протонов в линейный ускоритель для использования в рамках проекта DARIA. На установке SMIS ранее был получен протонный пучок с током 500 мА при нормализованном среднеквадратичном эмиттансе, равном $0.07 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ [41]. А на установке GISMO были ранее проведены измерения эмиттанса протонного пучка [42], которые продемонстрировали перспективность использования источника данного типа в качестве протонного инжектора проекта DARIA.

Как было сказано ранее, импульсная установка SMIS работает на большей частоте нагрева и с большей входной мощностью излучения по сравнению с непрерывной установкой, что приводит к формированию пучка большей интенсивности. И с этой точки зрения построение протонного инжектора на базе установки SMIS более оправдано. Однако мощная высокочастотная система является существенно более дорогой и в тоже время предварительные результаты на установке GISMO говорят о наличии принципиальной возможности достижения проектных параметров пучка. При исследовании состава ионного пучка было установлено, что содержание примесей не превышает 1%. Следовательно, высокая чистота протонного пучка на входе в ускоритель достигается без использования поворотных магнитов. Дополнительным фактором, снижающим долю примесей в пучке, является наличие магнитных линз в канале транспортировки пучка.

Таким образом, для реализации протонного инжектора в рамках проекта DARIA выбрана непрерывная установка GISMO. С учетом сказанного ранее, применен следующий способ формирования последовательности импульсов тока ионного пучка: плазма горит непрерывно, ионный пучок также извлекается непрерывно, а затем с помощью прерывателя пучка формируют требуемые импульсы. Данный способ является наиболее гибким и позволяет создавать импульсы любой наперед заданной конфигурации. Импульсную подачу ускоряющего напряжения не применяют, так как характерное время установления стационарного режима формирования пучка составляют 10–100 мкс.

Одной из составляющих переходных процессов является достижение компенсации пространственного заряда пучка. Для этого необходимо ионизовать ионным пучком достаточное количество молекул фонового газа. Характерное время установления компенсации τ можно оценить следующим образом:

$$\tau = \frac{1}{\sigma v n},$$

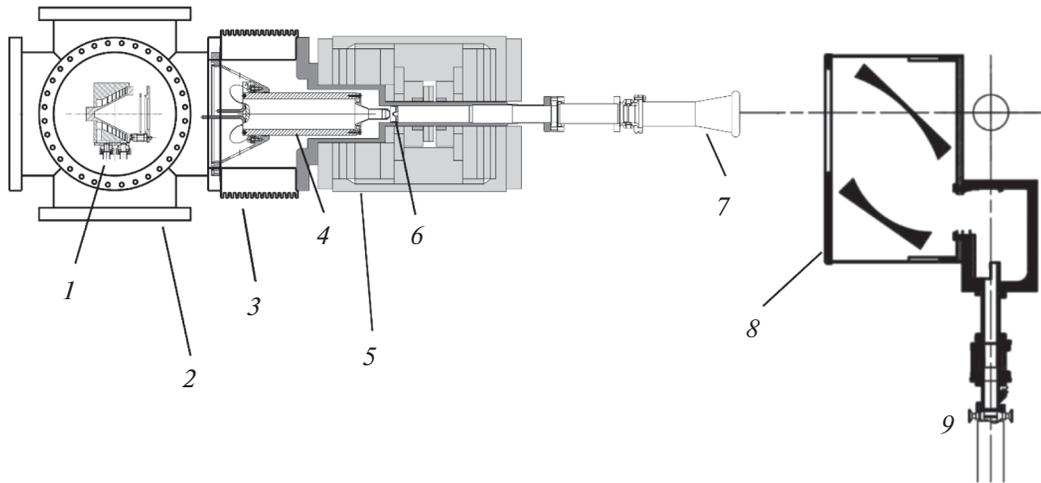


Рис. 1. Схема экспериментальной установки GISMO: 1 – цилиндр Фарадея; 2 – диагностическая камера; 3 – изолятор; 4 – пуллер; 5 – охлаждаемая плазменная камера и ловушка из постоянных магнитов; 6 – плазменный электрод; 7 – преобразователь гауссового пучка в моду TE_{11} круглого волновода; 8 – преобразователь моды TE_{21} круглого волновода в гауссов пучок; 9 – выходной тракт излучения гиротрона, в котором распространяется электромагнитное излучение на моде TE_{21} круглого волновода.

где σ – сечение ионизации молекул фонового газа ионным ударом (оценка дает значение $\sim 10^{-16}$ см²), v – скорость ионов в пучке, n – концентрация частиц фонового газа. Для протонного пучка с энергией 40 кэВ и характерного фонового давления в диагностической камере порядка 10^{-5} Торр время установления составляет около 100 мкс.

Общая схема установки GISMO представлена на рис. 1. Плазма создается с помощью непрерывного СВЧ-излучения гиротрона на частоте 28 ГГц с мощностью до 10 кВт. Излучение гиротрона проходит сначала через зеркальный преобразователь, на выходе из которого формируется пучок с гауссовым поперечным профилем. Затем он проходит через воздушный промежуток пространства, необходимый для высоковольтной изоляции плазменной камеры от волноводного тракта гиротрона и направляется в приемный рупор, проходит по СВЧ-вводу со встроенным каналом подачи газа. В сам разрядный объем СВЧ-излучение поступает, пройдя через согласующую электродинамическую систему, выполненную в виде клина. Плазменная камера имеет внутренний диаметр 32 мм. Для создания и удержания плазмы используют простую магнитную ловушку, выполненную из постоянных магнитов. “Пробочное отношение” – отношение величины магнитного поля в пробке к минимальному значению поля в ловушке на оси симметрии – равно $R_{\text{mirror}} = 6$, а магнитное поле в пробке составляет 1.6 Тл (значение магнитного поля, при котором реализуется холодный ЭЦР, для частоты 28 ГГц составляет 1 Тл). Расстояние между пробками составляет $L_{\text{plug}} = 120$ мм.

Приведем параметры плазмы, характерные для данной установки. В качестве рабочего газа ис-

пользуют водород. С помощью греющего излучения создается плазма с плотностью на уровне 10^{13} см⁻³, температурой электронов порядка 50 эВ и степенью ионизации, близкой к 100%. Экспериментально получены потоки плазмы с плотностью в пробке на уровне $1.5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Диапазон рабочих давлений напускаемого газа, при котором проводят эксперименты по формированию ионного пучка, находится от 1.0 до 4.0 мТорр.

Стоит обратить внимание на особенности магнитной ловушки установки GISMO. Из-за использования постоянных магнитов снаружи от простой магнитной ловушки образуются каспы (рис. 2).

На установке GISMO система экстракции расположена внутри магнитов (рис. 1). Несмотря на то, что в ловушке сделано расширение для размещения экстрактора, оседанием ионного пучка на вытягивающем электроде (пуллере) нельзя пренебрегать. Также после каспа в расширителе образуется область с градиентом магнитного поля, которая выступает в качестве магнитной линзы, что приводит к зависимости угла расходимости пучка от энергии. Сила этой линзы такова, что слабо расходящийся протонный пучок формируется при энергии протонов около 30 кэВ.

В текущей конфигурации установки есть существенные недостатки, которые не позволяют полностью соответствовать требованиям проекта DARIA в настоящий момент. В первую очередь, не удастся сформировать на выходе пучок с требуемым током. Основная причина в том, что экстрактор находится достаточно глубоко внутри узкой части плазменной камеры. Это накладывает физические ограничения на размещение там электродов (в частности, размещение трехэлек-

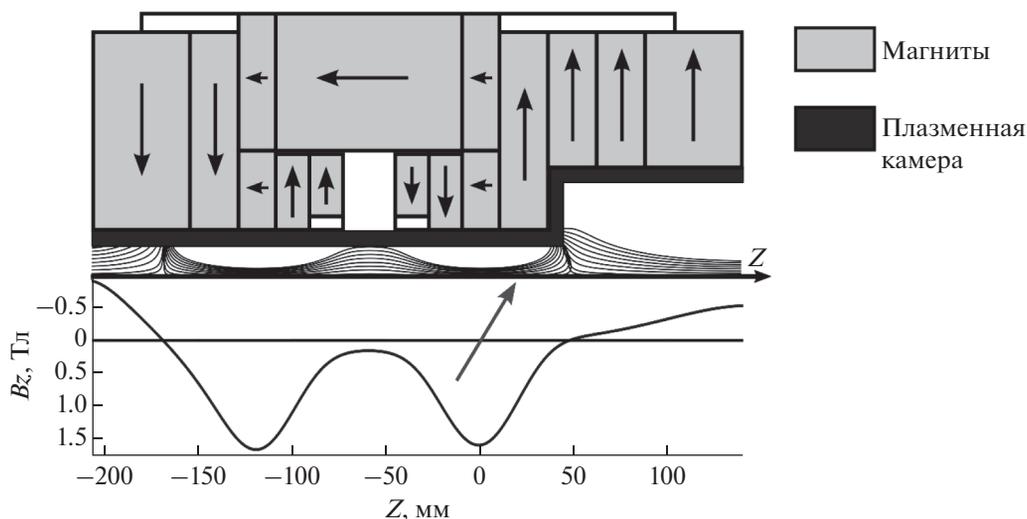


Рис. 2. Картина силовых линий магнитного поля установки GISMO. На рисунке изображены постоянные магниты (с указанием направления намагниченности), показано сечение плазменной камеры. Построены силовые линии магнитного поля и его профиль на оси Z . С левой стороны подается СВЧ-излучение и производится напуск нейтрального газа, а с правой извлекается ионный пучок. Стрелкой отмечено примерное расположение системы экстракции.

тродной системы на текущий момент невозможно при соблюдении необходимых зазоров с учетом величины подаваемых напряжений). Также, для характерной энергии пучка в 40–60 кэВ собственная магнитная линза ловушки имеет недостаточную силу. Это приводит существенным потерям ионного пучка на пуллере, так как ионный пучок проходит длинную дистанцию (около 300 мм) внутри трубы пуллера.

Еще одним ограничением является развитие паразитного разряда между плазменной камерой и пуллером. Для иллюстрации приведем зависимость тока паразитного разряда от напряжения между плазменной камерой и пуллером (рис. 3), которая была получена при следующих условиях: СВЧ-излучение не подавали в плазменную камеру и газ не напускали. Напряжение между плазменной камерой и пуллером подавали в условиях фонового вакуума (на уровне 5×10^{-6} Торр). С паразитным разрядом необходимо бороться, так как из-за этого происходит распыление материала с поверхности плазменной камеры и пуллера, что впоследствии приводит к оседанию его на внутренней поверхности высоковольтного изолятора, из-за чего изолятор загрязняется и происходит его пробой по поверхности. К тому же ток паразитного разряда придает дополнительную тепловую нагрузку на плазменную камеру и электроды, что нежелательно.

Для формирования пучка в импульсном режиме с требуемыми временными характеристиками необходимо разработать прерыватель.

РАЗРАБОТКА ПРОТОННОГО ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ПРОЕКТА DARIA

Ранее были указаны недостатки текущей конфигурации ионного источника GISMO, которые не позволяют достичь проектных параметров пучка. Поэтому был запланирован комплекс работ, направленных на адаптацию существующего прототипа под конкретную задачу.

В этот план входит разработка следующих элементов протонного инжектора: магнитной системы удержания плазмы; охлаждаемой плазменной

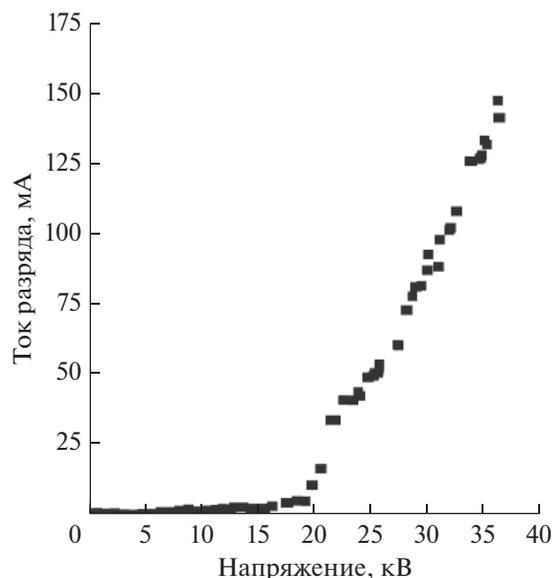


Рис. 3. Зависимость тока паразитного разряда от напряжения между плазменной камерой и пуллером.

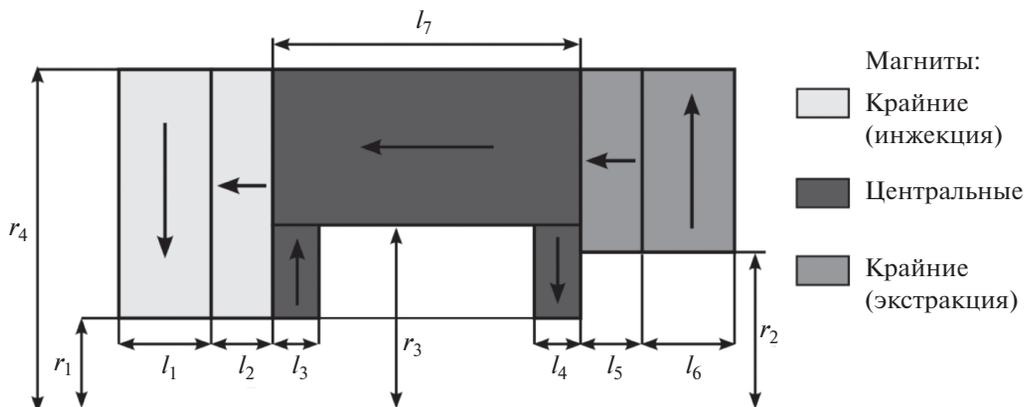


Рис. 4. Схема магнитной ловушки с указанием геометрических параметров ее составных частей. Ловушка имеет ось симметрии, обозначенную горизонтальной чертой снизу. Направление намагниченности указано стрелками. Цветом показано разделение магнитов на группы. Инжекция нейтрального газа и подача СВЧ-излучения осуществляется слева, а извлечение ионного пучка – справа.

камеры; системы извлечения пучка из плазмы (непосредственно, экстрактор); системы формирования пучка (магнитная линза); системы прерывания пучка (чоппер); поглотитель отклоненного пучка. В настоящий момент закончена разработка магнитной системы и системы извлечения пучка. Разработка остальных составляющих инжектора еще не окончена. Далее будут представлены результаты уже завершенных исследований, направленных на модернизацию ионного источника GISMO для его полного соответствия требованиям и использования в качестве протонного инжектора для линейного ускорителя проекта DARIA.

Разработка магнитной системы удержания плазмы

Данную задачу решали путем численного моделирования характеристик магнитной ловушки и подбора ее оптимальных параметров. Для проведения расчетов использовали программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Данная магнитная ловушка для протонного инжектора состоит из постоянных магнитов из сплава Nd–Fe–В (N48). Ловушка похожа на осесимметричный пробкотрон, но имеет дополнительные каспы снаружи из-за особенностей постоянных магнитов. Общий вид магнитной системы показан на рис. 4. Она однозначно задана геометрическими параметрами своих составных частей.

Основными характеристиками ловушки, рассматриваемыми в данном случае, являлись: значения магнитного поля в пробках на оси симметрии (со стороны инжекции нейтрального газа – B_{inj} и со стороны экстракции пучка – B_{ext}); минимальная величина магнитного поля на оси симметрии ловушки в области между пробками (B_{min});

расстояние между пробками (L_{plug}). Для удобного извлечения ионов из ловушки (за счет большего доступного пространства для расположения системы формирования пучка) магнит имел расширение справа.

К ловушке предъявляют следующие основные требования. Значение магнитного поля в пробках должно быть примерно 1.5 Тл, что определяется оптимальными условиями нагрева плазмы и зависит от частоты СВЧ-излучения. В данном ионном источнике предполагали использование излучения гиротрона (частота 28 ГГц, мощность до 10 кВт в непрерывном режиме). Поле в пробке магнитной ловушки должно быть выше резонансного (равного 1 Тл) для обеспечения эффективного нагрева плазмы. Исходя из того условия, что новая магнитная ловушка должна быть сходной по своим параметрам с уже существующей, введем следующие допустимые значения параметров: “пробочное отношение” должно находиться в пределах 5.5 ± 0.5 , а расстояние между пробками – 120 ± 10 мм.

Минимальный внутренний диаметр магнита составлял 50 мм, что соответствует текущей ловушке GISMO. Следующие параметры выбраны с учетом более удобного размещения экстрактора внутри магнита: внутренний диаметр магнита в расширении – 160 мм, длина расширенной части магнита – 100 мм. Положение пробки со стороны экстракции ионного пучка должно быть как можно ближе к расширению магнита.

Оптимизацию магнитной ловушки для макета плазменной части ЭЦР протонного инжектора проводят по параметрам, которыми описана конфигурация магнитов (как показано на рис. 4). Среди параметров $r_1 - r_4, l_1 - l_7$ есть те, которые определяются внешними условиями (так были

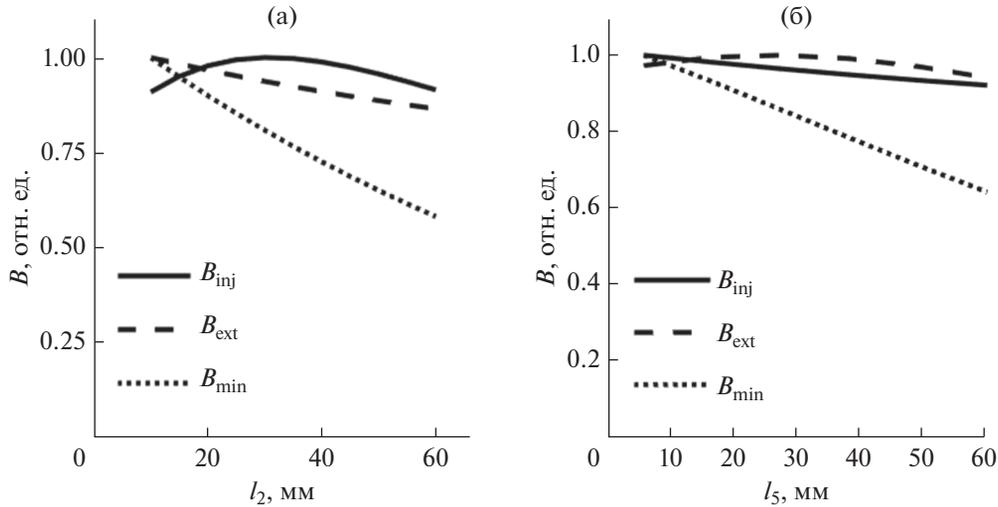


Рис. 5. Графики зависимости параметров магнитной ловушки B_{inj} , B_{min} , B_{ext} от параметров l_2 (а) и l_5 (б). Магнитные поля нормированы на свое максимальное значение.

выбраны $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 80$ мм, $l_5 + l_6 = 100$ мм). По остальным параметрам необходимо провести оптимизацию. Также есть параметры, которые заведомо увеличивают магнитное поле (l_1 , r_4), однако их увеличение приводит к повышению массы магнита. Их оптимизация проведена в последнюю очередь.

Основная задача заключалась в том, чтобы обеспечить высокое значение магнитного поля в пробке со стороны экстракции, так как в этой части имеется недостаток магнитного материала (в связи с наличием экстрактора).

Можно мысленно разбить ловушку на 3 составные части (рис. 4): крайняя часть со стороны инъекции, центральная часть, крайняя часть со стороны экстракции. Из-за большого числа параметров магнитной ловушки оптимизация проведена в несколько этапов, с переходом от крайних магнитов и к центральными. При таком способе результаты варьирования параметров можно более наглядно анализировать. Поэтому на первом этапе оптимизированы размеры l_2 и l_5 , что соответствует магнитам из крайних частей. Затем — параметры l_3 , l_4 , r_3 и l_7 , что соответствует центральной части. В последнюю очередь варьировали величины l_1 и r_4 .

Рассмотрим первый этап оптимизации параметров l_2 и l_5 . Первый соответствует толщине кольца с аксиальной намагниченностью в крайней части ловушки со стороны инъекции, а второй — аналогичному кольцу со стороны экстракции. На графике (рис. 5) представлены нормированные значения магнитного поля для большей информативности. Параметр l_2 в основном влия-

ет на величину B_{inj} и у зависимости $B_{inj}(l_2)$ существует максимум. С другой стороны, увеличение l_2 приводит к снижению полей B_{min} и B_{ext} . Для параметра l_5 рассуждения аналогичные, но относятся к пробке со стороны экстракции. Исходя из этого, возьмем $l_5 = 30$ мм, что соответствует максимуму $B_{ext}(l_5)$ и $l_2 = 15$ мм, что является компромиссным между увеличением поля в пробке со стороны инъекции и уменьшением со стороны экстракции. Также из соотношения $l_5 + l_6 = 100$ мм следует, что $l_6 = 70$ мм.

В качестве второго этапа провели оптимизацию параметров l_3 и l_4 (рис. 6), которые задают толщины внутренних колец с радиальной намагниченностью в центральной части магнита. Эти два магнита находятся в центре ловушки и существенно влияют на B_{min} . В качестве оптимальных значений выберем $l_3 = 15$ мм и $l_4 = 90$ мм. Это позволит добиться значений магнитного поля, близких к требуемым. Далее рассмотрим параметры r_3 и l_7 (рис. 7), которые соответствуют внутреннему радиусу и толщине центрального кольца с аксиальной намагниченностью. Величина r_3 меняет соотношение между внутренними центральными магнитами и внешним. Эта величина существенно влияет на минимальное значение магнитного поля ловушки на оси симметрии. Выберем $r_3 = 80$ мм, что дает близкое к требуемому значение B_{min} . Параметр l_7 определяет расстояние между крайними частями ловушки. При увеличении этого расстояния уменьшается взаимное влияние крайних частей ловушки друг на друга. Также увеличивается расстояние между пробками. Выберем значение $l_7 = 120$ мм, так как оно обеспечива-

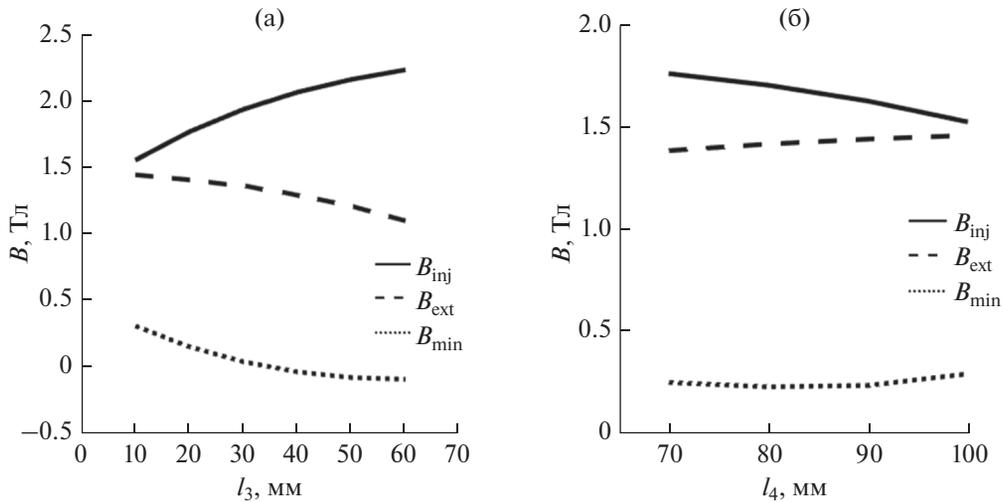


Рис. 6. Графики зависимости параметров магнитной ловушки B_{inj} , B_{min} , B_{ext} от параметров l_3 (а) и l_4 (б).

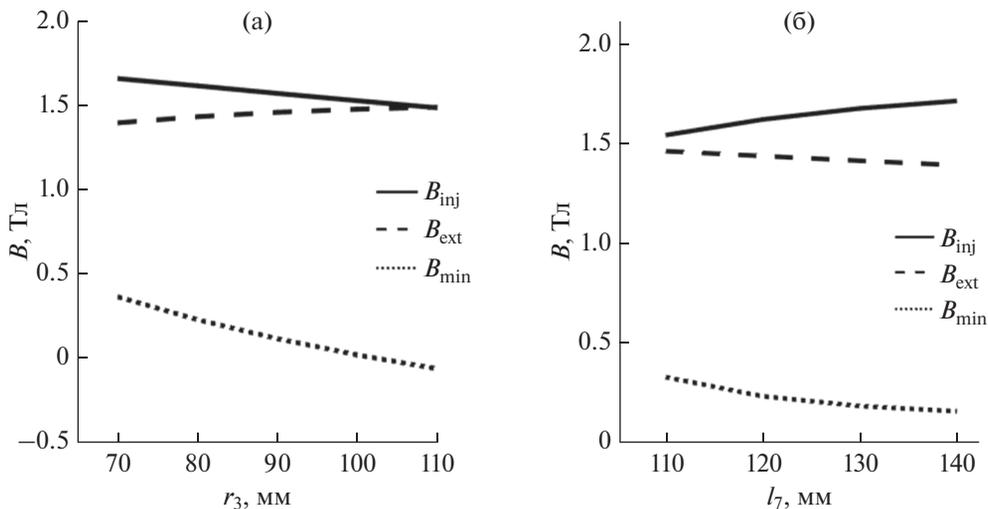


Рис. 7. Графики зависимости параметров магнитной ловушки B_{inj} , B_{min} , B_{ext} от параметров r_3 (а) и l_7 (б).

ет близкие к необходимым значения поля B_{min} и расстояния между пробками L_{plug} .

На третьем этапе провели оптимизацию магнитной ловушки с параметрами r_4 и l_1 (рис. 8), которые соответствуют радиусу всего магнита и толщине кольца с радиальной намагниченностью в крайней части магнита со стороны инжекции. В данном случае важно учитывать массу магнита. Оптимальными значениями являются следующие: $l_1 = 170$ мм, $r_4 = 200$ мм.

Для удобства дальнейшего описания введем цилиндрическую систему координат, в которой ось Z направлена вдоль оси симметрии магнита, а начало отсчета выбрано так, чтобы плоскость $Z = 0$ совпадала с границей между центральной обла-

стью и крайней со стороны инжекции. Ось Z направлена от области инжекции в сторону экстракции.

До этого момента магнитную ловушку рассматривали в идеализированном случае без учета каких-либо внешних факторов. Однако существуют некоторые условия, которые приводят к изменению конфигурации ловушки. Во-первых, рассмотрим зависимость величины магнитного поля на оси системы от продольной координаты (рис. 9), на которой присутствует пик магнитного поля вблизи $Z = -300$ мм. Он находится вне разрядной камеры (где непосредственно зажигается плазма) и располагается в СВЧ-вводе. Для текущей конфигурации величина этого поля выше 1 Тл, что говорит о наличии зон ЭЦР на оси

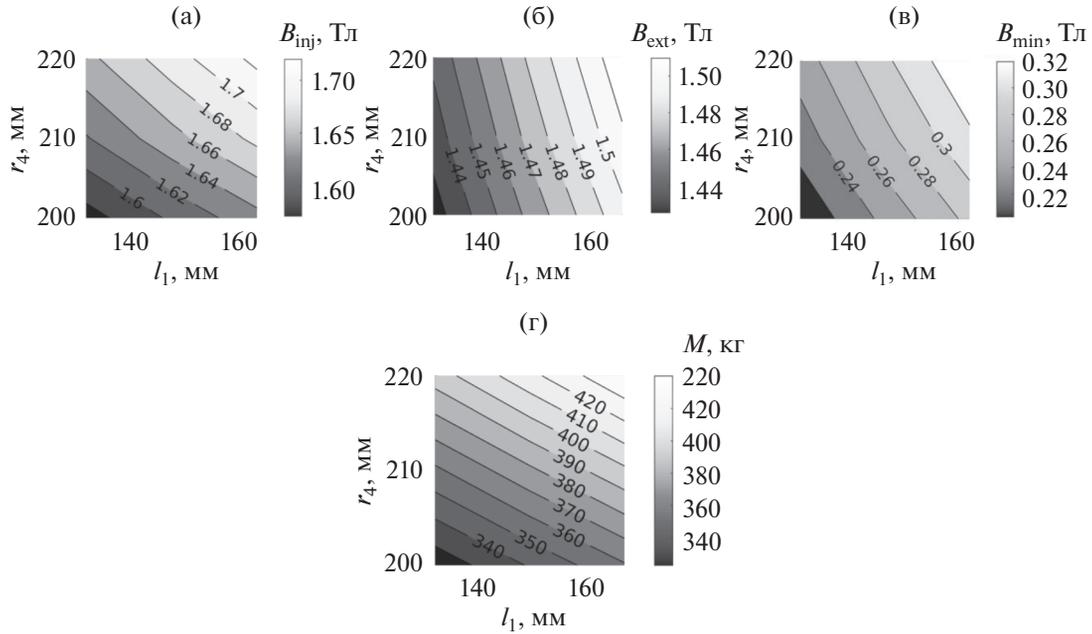


Рис. 8. Зависимость параметров магнитной ловушки B_{inj} , B_{min} , B_{ext} и массы магнита M от параметров r_4 и l_1 .

СВЧ-ввода. Так как давление газа в этом месте не может быть существенно ниже, чем давление в плазменной камере (из-за наличия окон для ввода СВЧ-излучения в плазменную камеру), то в этом месте возникнет паразитный ЭЦР разряд в волноводном тракте, которого необходимо избежать. Важно, что разряд будет загораться в силовых трубках магнитного поля, которые опираются на вводное окно для СВЧ-излучения, что за короткое время приведет к его прогару. Следовательно, необходимо уменьшить магнитное поле в этом пике. Снижение магнитного поля достигается за счет введения дополнительных магнитов с аксиальной намагниченностью в угол ловушки (магниты 1, 2 на рис. 10).

Во-вторых, существуют механические ограничения, которые не позволят собрать ловушку с рассчитанными геометрическими параметрами. Необходимо учесть зазоры между магнитами и предусмотреть наличие бандажей, без которых невозможно будет собрать магниты воедино. Это приведет к незначительному уменьшению величины магнитного поля по сравнению с идеализированной магнитной системой.

После учета указанных выше факторов был проведен расчет для оптимальной конфигурации, согласно которому магнитная ловушка имеет следующие характеристики: значение магнитного поля в пробке со стороны инъекции газа $B_{inj} = 1.55$ Тл и со стороны экстракции пучка $B_{ext} = 1.44$ Тл, минимальная величина поля в ловушке $B_{min} = 0.28$ Тл (“пробочное отношение” равно

5.14), расстояние между пробками $L_{plug} = 125$ мм, масса магнитов $M = 376$ кг. Схема магнитной ловушки представлена на рис. 10.

Разработка системы извлечения пучка из плазмы

Следующей частью исследований была разработка системы формирования протонного пучка, что было реализовано путем численного моделирования, результаты которого приведены ниже. Требования к характеристикам пучка ионного источника были следующими: полный ток пучка – 100 мА; энергия частиц в пучке – 40 кэВ; полный нормализованный эмиттанс (95% пучка) – не более $1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

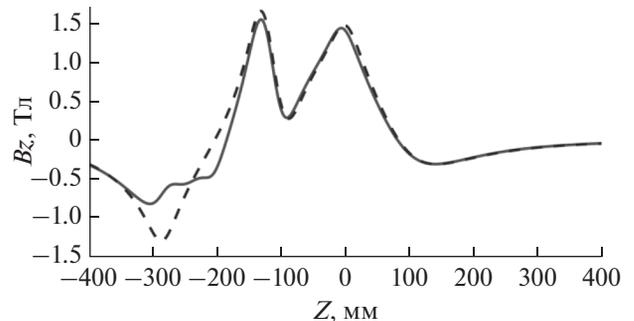


Рис. 9. Распределение магнитного поля на оси для магнитной ловушки, полученной в результате оптимизации. Красной сплошной линией обозначена финальная конфигурация, а синим пунктиром – идеализированный случай.

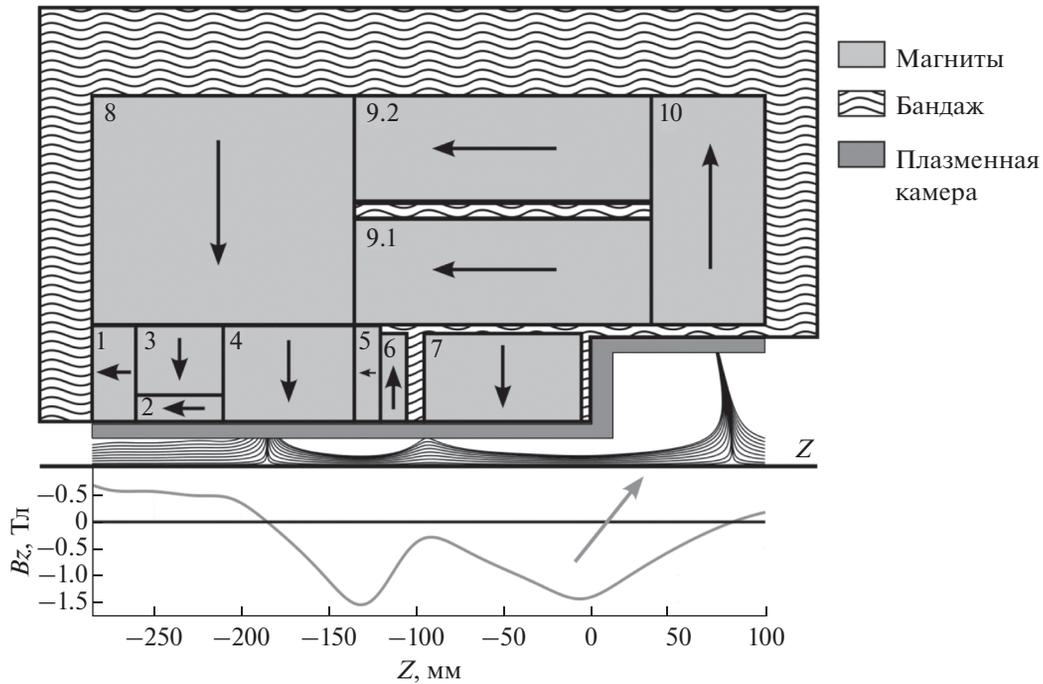


Рис. 10. Схема финального дизайна магнитной ловушки DARIA. На рисунке изображены и пронумерованы постоянные магниты (с указанием направления намагниченности), показано примерное сечение плазменной камеры. Построены силовые линии магнитного поля и его профиль на оси Z . С левой стороны подается СВЧ-излучение и производится напуск нейтрального газа, а с правой извлекается ионный пучок. Стрелкой отмечено примерное расположение системы экстракции.

Моделирование процесса формирования сильноточного пучка ионов проводили с использованием пакета библиотек с открытым исходным кодом IBSimu [43]. С помощью данного программного пакета были рассчитаны траектории движения ионов для различных конфигураций системы экстракции. Моделирование проводили в трехмерном пространстве с учетом внешнего магнитного поля и пространственного заряда пучка. В расчетах использована модель плазмы, в которой концентрация электронов заданы аналитически и соответствует распределению Больцмана.

Поток плазмы, из которого формируется ионный пучок, задан следующими параметрами: температурой ионов ($T_i = 1 \text{ эВ}$); электронной температурой ($T_e = 50 \text{ эВ}$); энергией поступательного движения ионов в направлении их извлечения ($E_0 = 50 \text{ эВ}$); потенциалом плазмы ($U_{pl} = 50 \text{ В}$). Указаны значения величин, характерные для плазмы ЭЦР разряда, получаемые в эксперименте. Для простоты считали, что в ионный пучок состоит на 100% из протонов.

Для данного протонного инжектора рассмотрена трехэлектродная одноапертурная система экстракции, которая состоит из плазменного, вы-

тягивающего (пуллера) и заземленного электродов. Она дополнена магнитной линзой, которая формирует слабо расходящийся ионный пучок. Схема системы формирования ионного пучка показана на рис. 11. В данном случае использовано магнитное поле от идеализированной магнитной линзы, то есть не учтена ее конструктивные осо-

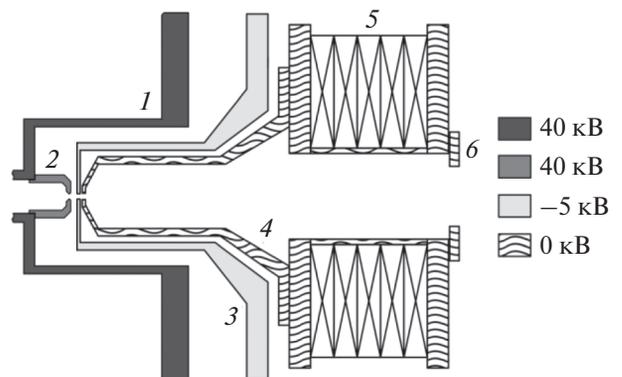


Рис. 11. Система формирования ионного пучка (система экстракции и магнитная линза): 1 – плазменная камера; 2 – плазменный электрод; 3 – вытягивающий электрод (пуллер); 4 – заземленный электрод; 5 – соленоид магнитной линзы; 6 – диафрагма.

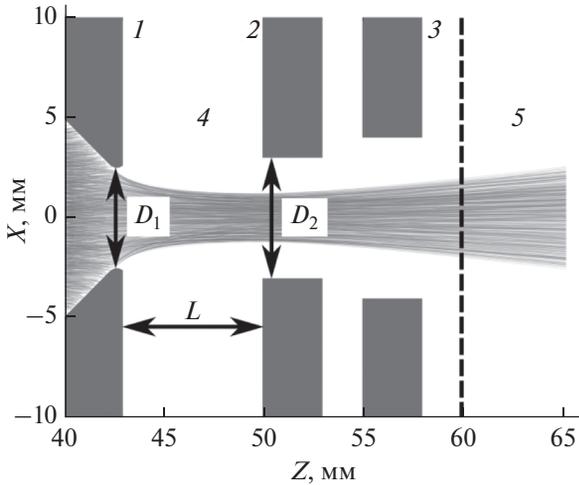


Рис. 12. Система экстракции с указанием геометрических параметров: 1 – плазменный электрод; 2 – вытягивающий электрод (пуллер); 3 – заземленный электрод; 4 – область пространства, в которой, предположительно, компенсация пространственного заряда нулевая; 5 – часть расчетной области, в которой степень компенсации составляет 90%. Граница между областями 4 и 5 обозначена пунктирной линией. Ионный пучок показан красным цветом.

бенности, которые могут лишь незначительно исказить магнитное поле.

Плазменный электрод электрически связан с плазменной камерой и имеет заданный потенциал 40 кВ относительно заземленного электрода, который определяется требованиями к энергии пучка на выходе. Вытягивающий электрод имеет потенциал -5 кВ и необходим для создания потенциального барьера для электронов, компенсирующих пространственный заряд пучка. В расчете учтено наличие компенсации пространственного заряда пучка на уровне 90%, что является характерным значением для ионных пучков с аналогичными значениями тока и энергии [44, 45].

Система формирования пучка характеризуется тремя параметрами – диаметром отверстия плазменного электрода D_1 , межэлектродным расстоянием L и диаметром отверстия пуллера D_2 . Ток соленоида магнитной линзы подбирают таким образом, чтобы сформировать пучок с малым углом расходимости (с максимальным углом расходимости в несколько десятков мрад). При расчете траекторий ионного пучка напряженность магнитного поля (создаваемого только соленоидом) в центре линзы составила 0.33 Тл.

Из плазмы извлекается пучок с током больше необходимого для того, чтобы затем удалить его часть на периферии с помощью диафрагмы. Это

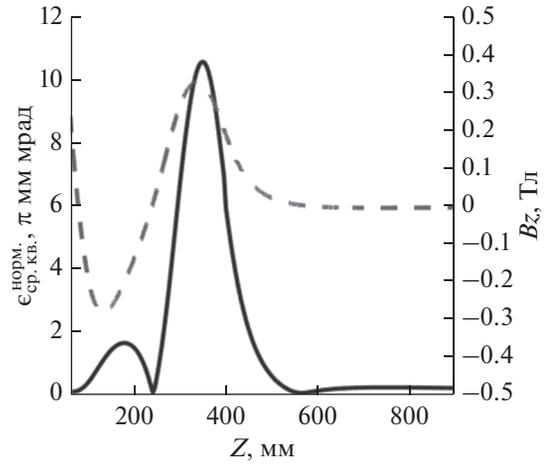


Рис. 13. Зависимость эмиттанса пучка (сплошная линия) и Z-компоненты магнитного поля на оси (пунктирная линия) от продольной координаты.

улучшит качество пучка, так как снижается негативное влияние aberrаций на краях электродов.

Найдем оптимальную конфигурацию (набор параметров D_1, L, D_2) системы экстракции, позволяющую получить пучок с минимальным эмиттансом. Геометрия системы экстракции показана на рис. 12.

На рис. 13 показана характерная зависимость эмиттанса от продольной координаты на оси. Для удобства будем рассматривать нормализованные среднеквадратичные эмиттансы пучков. Сравнение конфигураций экстрактора проводится по значению эмиттанса пучка в сечении $Z = 700$ мм, на выходе из области с магнитным полем.

Рассмотрим конфигурации для $D_1 = 4, 5, 6$ мм. В этих случаях площадь эмитирующей поверхности различается. Исходя из этого, начальная плотность потока ионов в плазме выбирали таким образом, чтобы полный ток оставался неизменным. Изменение плотности потока реализуется при перемещении экстрактора вдоль оси за счет изменения величины магнитного поля на срезе экстрактора. Однако магнитный поток через отверстие плазменного электрода поддерживали постоянным. Следовательно, вклад в эмиттанс пучка со стороны магнитного поля остается неизменным, так как он пропорционален величине магнитного поля и квадрату начального радиуса пучка. Предполагаем, что плотность тока ионов в пробке магнитной ловушки ($B = B_{\text{plug}}$) составляет $J_{\text{plug}} = 1.5$ А/см². Эту величину можно пересчитать в сечение с произвольным значением магнитного поля $B = B_0$ следующим образом: $J_0 = J_{\text{plug}} (B_0/B_{\text{plug}})$. Для $D_1 = 4$ мм начальная плот-

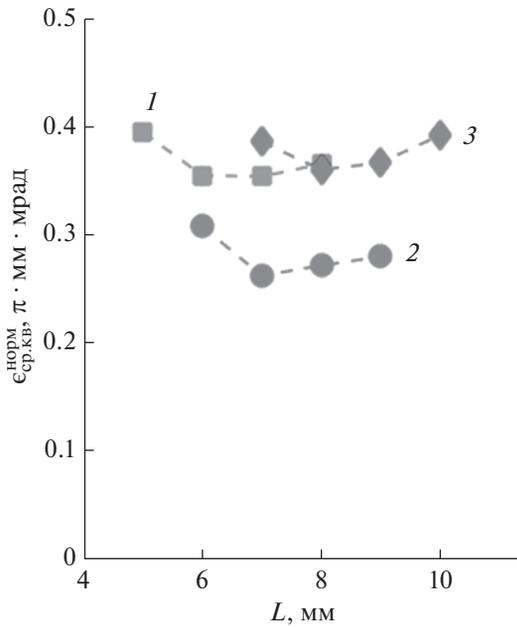


Рис. 14. Зависимость среднеквадратичного эмиттанса в сечении $Z = 700$ мм от межэлектродного расстояния L для различных конфигураций: $D_1 = 4$ (1); 5 (2); 6 мм (3).

ность тока составила 1 А/см^2 , для $D_1 = 5$ мм – 640 мА/см^2 , для $D_1 = 6$ мм – 450 мА/см^2 , что соответствует полному извлекаемому току 125 мА .

Выберем $D_2 = 6$ мм для всех конфигураций. Графики зависимости среднеквадратичного эмиттанса от межэлектродного расстояния приведены на рис. 14. Таким образом, конфигурация $D_1-L-D_2 = 5-7-6$ является наиболее оптимальной среди рассматриваемых.

Дальнейшая оптимизация экстрактора связана с уменьшением aberrаций в пучке. Этого можно достичь за счет изменения профиля электродов. Добавим дополнительную фаску в плазменном электроде. Пусть ее толщина составляет 1 мм , а его поперечный размер dR будем варьировать. Следует отметить, что межэлектродное расстояние необходимо уменьшить на величину толщины фаски. На рис. 15 показано сравнение результатов расчета пучка для двух случаев – с фаской и без нее.

Из сравнения диаграмм эмиттанса в сечении $Z = 43$ мм можно сделать вывод о том, что добав-

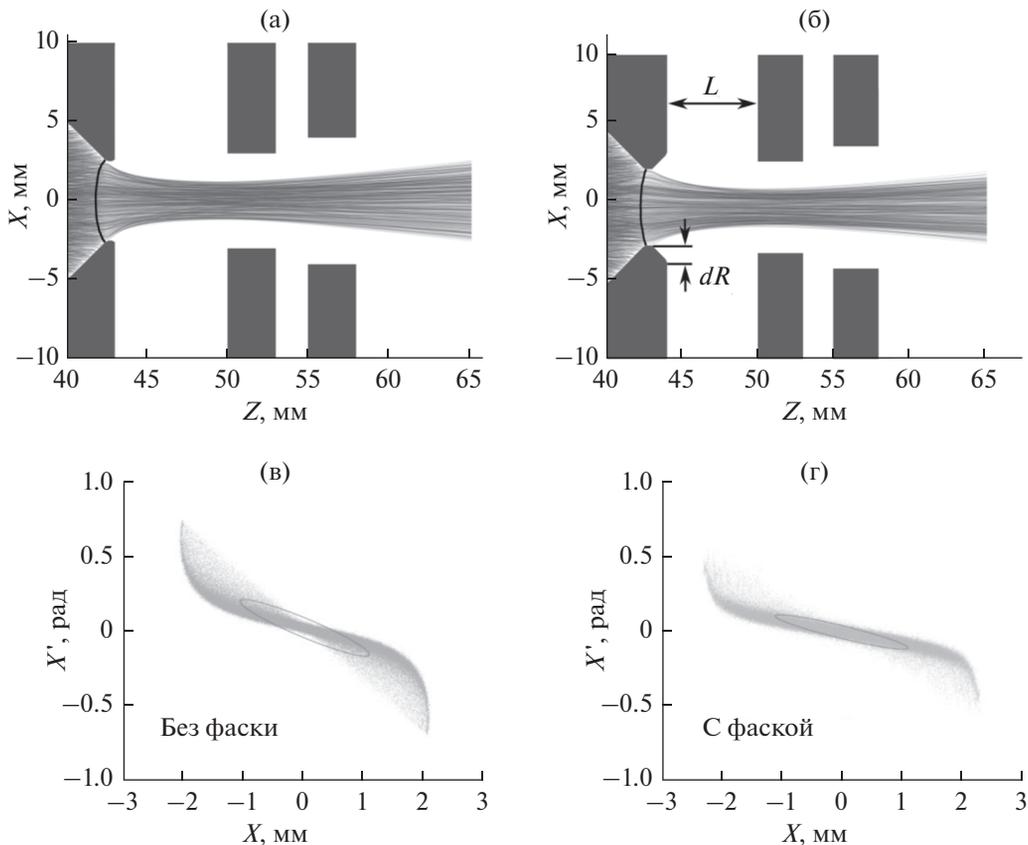


Рис. 15. Сравнение результатов формирования ионных пучков для различных систем экстракции (а, б). Красным цветом показаны траектории ионов (черной линией обозначен плазменный мениск), а также приведены диаграммы эмиттансов (в, г) в сечении, близком к положению мениска ($Z = 43$ мм).

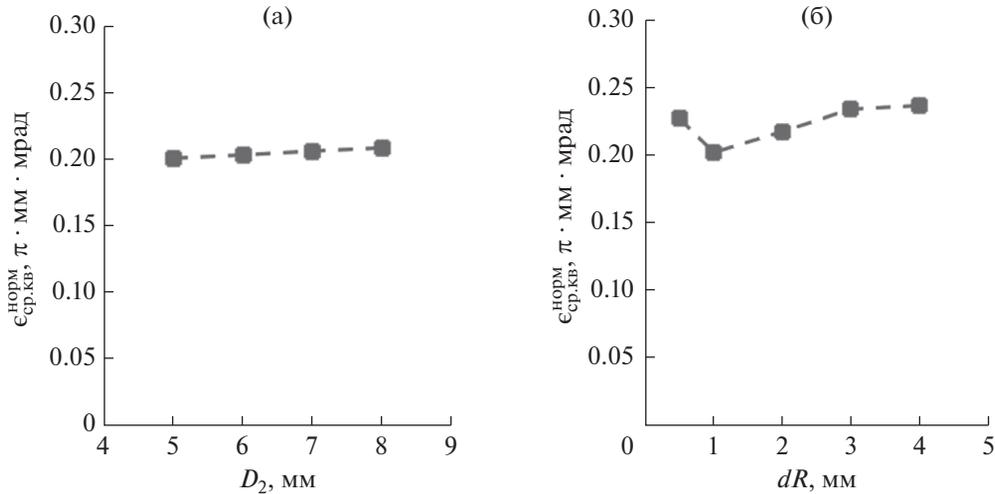


Рис. 16. График зависимости среднеквадратичного эмиттанса в сечении $Z = 700$ мм от величин D_2 (а) и dR (б).

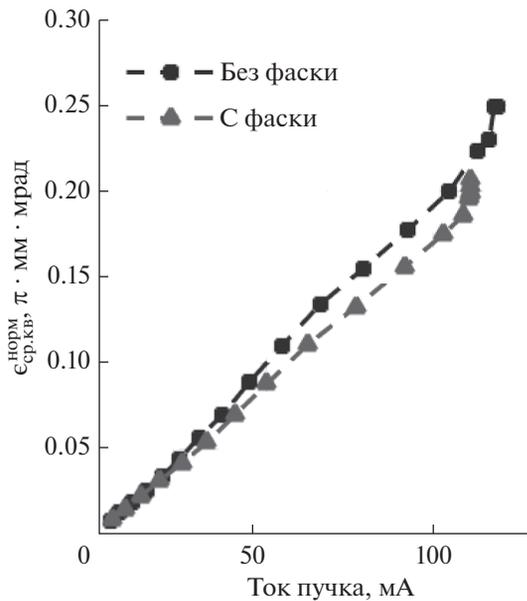


Рис. 17. Зависимость среднеквадратичного эмиттанса от выходного тока пучка после прохождения через диафрагму для двух случаев: с фаской (1) и без нее (2).

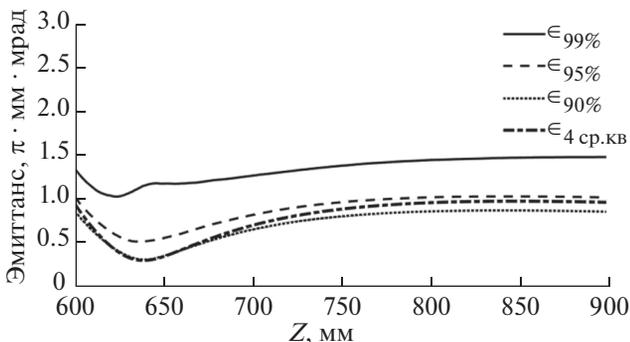


Рис. 18. Зависимость учетверенного среднеквадратичного эмиттанса и полного эмиттанса долей пучка от продольной координаты.

ление фаски в системе приводит к уменьшению S -образных хвостов на диаграмме эмиттанса. Путем варьирования параметров было установлено, что $dR = 1$ мм и $D_2 = 5$ мм являются оптимальными (рис. 16).

Еще одним способом уменьшения эмиттанса пучка является использование диафрагмы, удаляющей часть пучка с периферии. Несмотря на то, что ток пучка в результате этого уменьшается, диафрагма снижает негативное влияние краевых эффектов. График зависимости эмиттанса от тока пучка для разных размеров диафрагмы представлен на рис. 17. Выберем наименьший размер диафрагмы, который обеспечивает ток пучка не ниже заданного.

На этом оптимизация экстрактора завершена. В результате можно построить зависимость эмиттанса пучка (как учетверенного среднеквадратичного, так и полного для 90%, 95% и 99% долей пучка) от продольной координаты для полученной конфигурации экстрактора (рис. 18). В итоге (в результате проведения расчетов) получен ионный пучок с энергией 40 кэВ, током 103 мА и полным нормализованным эмиттансом (по доле пучка 95%), равным $1.02 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана магнитная ловушка из постоянных магнитов, адаптированная для использования в протонном инжекторе. Основное отличие новой ловушки — возможность размещения экстрактора непосредственно в расширителе. За счет большего доступного пространства расстояние между заземленным электродом и плазменной камерой может быть увеличено, что приведет к

повышению напряжения, при котором загорается паразитный разряд. Вопрос самого возникновения паразитного разряда при работе рассмотренного источника подлежит экспериментальной проверке.

Был проведен поиск оптимальной конфигурации экстрактора, в которой формируется протонный пучок, удовлетворяющий требованиям. После определения геометрических размеров экстрактора была проведена работа по снижению краевых эффектов, негативно влияющих на качество пучка. Для этого был изменен профиль плазменного электрода и применена диафрагма. В итоге был проведен расчет, в котором получен протонный пучок с необходимыми характеристиками.

Следующими шагами в адаптации ионного источника для использования в качестве протонного инжектора проекта DARIA являются: борьба с паразитным разрядом между заземленным электродом и плазменной камерой (в случае его возникновения); разработка охлаждаемой плазменной камеры, солениода магнитной линзы, прерывателя пучка (чоппер) и поглотителя отклоненного пучка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научного проекта № 075-15-2022-830 “Разработка компактных источников фотонов и нейтронов на базе новых технологий линейных ускорителей — основных элементов лазера на свободных электронах и импульсных нейтронных источников”, финансируемого Министерством образования Российской Федерации.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Geller R.* Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. Institute of Physics. Bristol, 1996. P. 434.
2. *Geller R.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1976. V. 23. № 2. P. 904. <https://www.doi.org/10.1109/TNS.1976.4328376>
3. *Sortais P., Lamy T., Médard J., Angot J., Latrasse L., Thuillier T.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 2. P. 02B314. <https://www.doi.org/10.1063/1.3272878>
4. *Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Lapin R.L., Razin S.V., Sidorov A.V., Shaposhnikov R.A.* // Plasma Phys. Rep. 2019. V. 45. № 10. P. 984. <https://www.doi.org/10.1134/S1063780X19080087>
5. *Geller R.* // Annual Rev. Nucl. Particle Sci. 1990. V. 40. № 1. P. 15. <https://www.doi.org/10.1146/annurev.ns.40.120190.000311>
6. *Lyneis Claude M., Leitner D., Todd D.S., Sabbi G., Prestemon S., Caspi S., Ferracin P.* // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. № 2. P. 02A321. <https://www.doi.org/10.1063/1.2816793>
7. *Benitez J.Y., Franzen K.Y., Hodgkinson A., Loew T., Lyneis C.M., Phair L., Saba J., Strohmeier M., Tarvainen O.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 2. P. 02A311. <https://www.doi.org/10.1063/1.3662119>
8. *Sun L., Zhang W.H., Fang X., Guo J.W., Wu W., Feng Y.C., Zhang X.Z., Ma Y.M., Ma H.Y., Shen Z., Yang T.J., Yang Y., Zhao B., Zhao H.W., Ma L.Z.* // Proceedings of ECRIS2016, Busan, Korea, 2016. P. 43.
9. *Sun L., Lu W., Zhao H.W., Guo J.W., Wu W., Wu B. M., Ou X.J., Mei E.M., Zheng S.J., Zhang X.Z., Li L.B., Zhu L., Xin C.J., Guan M.Z., Chen Y.Q., Wang X.D.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2244. № 1. P. 012021. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/2244/1/012021>
10. *Wu W., Peng Sh., Ma T., Ren H., Zhang J., Zhang T., Jiang Y., Li K., Xu Y., Zhang A., Wen J., Guo Z., Chen J.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. № 10. P. 101501. <https://www.doi.org/10.1063/1.5109240>
11. *Gammino S., Celona L., Ciavola G., Maimone F., Mascali D.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 2. P. 02B313. <https://www.doi.org/10.1063/1.3266145>
12. *Pham A.N., Leitner D., Glennon P., Ottarson J., Lawton D., Portillo M., Machicoane G., Wenstrom J., Lajoie A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. V. 376. P. 77. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.02.016>
13. *Skalyga V.A., Izotov I.V., Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Kiseleva E.M., Tarvainen O., Koivisto H., Toivanen V.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54. № 38. P. 385201. <https://www.doi.org/10.1088/1361-6463/ac0e59>
14. *Denisov G.G., Glyavin M.Yu., Tsvetkov A.I., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Plotnikov I.V., Bykov Y.V., Orlov V.B., Morozkin M.V., Shmelev M.Yu., Kopelovich E.A., Troitsky M.M., Kuznetsov M.V., Zhurin K.A., Novikov A.Yu., Bakulin M.I., Sobolev D.I., Tai E.M., Soluyanov E.A., Sokolov E.V.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. V. 65. № 9. P. 3963. <https://www.doi.org/10.1109/TED.2018.2859274>
15. *Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. № 7. P. 073001. <https://www.doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005>
16. *Idehara T., Sabchevski S.P., Glyavin M., Mitsudo S.* // Appl. Sci. 2020. V. 10. № 3. P. 980. <https://www.doi.org/10.3390/app10030980>
17. *Mathew J.V., Bhattacharjee S.* // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. № 1. P. 013501. <https://www.doi.org/10.1063/1.3514989>
18. *Bekhterev V., Bogomolov S., Efremov A.* // Proceedings of HIAT2015, Yokohama, Japan, 2015. P. 238.
19. *Kalvas T., Tarvainen O., Toivanen V., Koivisto H.* // J. Instrumentation. 2020. V. 15. № 6. P. P06016. <https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/p06016>

20. *Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 2. P. 02A702. <https://www.doi.org/10.1063/1.4825074>
21. *Bilheux H.* // AIP Conference Proceedings. 2003. V. 680. № 1. P. 1058. <https://www.doi.org/10.1063/1.1619890>
22. *Bokhanov A.F., Zorin V.G., Izotov I.V., Razin S.V., Sidorov A.V., Skalyga V.A.* // Plasma Phys. Rep. 2007. V. 33. № 5. P. 347. <https://www.doi.org/10.1134/s1063780x07050017>
23. *Shirkov G.D.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1993. V. 2. № 4. P. 250. <https://www.doi.org/10.1088/0963-0252/2/4/004>
24. *Skalyga V.A., Izotov I.V., Golubev S.V., Razin S.V., Sidorov A.V., Viktorov M.E.* // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. № 3. P. 033502. <https://www.doi.org/10.1063/5.0075486>
25. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. № 2. P. 02A716. <https://www.doi.org/10.1063/1.4934213>
26. *Skalyga V.A., Izotov I.V., Sidorov A.V., Golubev S.V., Razin S.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 3. P. 033503. <https://www.doi.org/10.1063/1.4978278>
27. *Sidorov A., Dorf M., Zorin V., Bokhanov A., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Roßbach J., Spädtke P., Balabaev A.* // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. № 2. P. 02A317. <https://www.doi.org/10.1063/1.2805640>
28. *Lapin R.L., Skalyga V.A., Izotov I.V., Golubev S.V., Razin S.V., Bokhanov A.F., Kazakov M.Yu., Shaposhnikov R.A., Kiseleva E.M., Tarvainen O.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1647. № 1. P. 012012. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012012>
29. *Lapin R.L., Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Razin S.V., Tarvainen O.* // J. Appl. Phys. 2022. V. 131. № 9. P. 093301. <https://www.doi.org/10.1063/5.0074388>
30. *Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Shaposhnikov R.A., Razin S.V., Sidorov A.V., Bokhanov A.F., Kazakov M.Yu., Lapin R.L., Vybin S.S.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. № 12. P. 123511.
31. *Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Strelkov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 9. P. 093301. <https://www.doi.org/10.1063/1.4929955>
32. *Golubev S.V., Skalyga V.A., Izotov I.V., Sidorov A.V., Razin S.V., Shaposhnikov R.A., Lapin R.L., Bokhanov A.F., Kazakov M.Yu.* // J. Instrumentation. 2019. V. 14. № 01. P. C01007. <https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/14/01/c01007>
33. *Golubev S.V., Skalyga V.A., Izotov I.V., Razin S.V., Shaposhnikov R.A., Vybin S.S., Bokhanov A.F., Kazakov M.Yu., Shlepnev S.P., Burdonov K.F., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V.* // J. Instrumentation. 2021. V. 16. № 2. P. T02008. <https://www.doi.org/10.1088/1748-0221/16/02/t02008>
34. *Skalyga V.A., Bokhanov A.F., Golubev S.V., Izotov I.V., Kazakov M.Yu., Kiseleva E.M., Lapin R.L., Razin S.V., Shaposhnikov R.A., Vybin S.S.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. № 12. P. 123308. <https://www.doi.org/10.1063/1.5128489>
35. *Skalyga V.A., Izotov I.V., Mironov E.A., Voitovich A.V., Palashov O.V.* // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1771. № 1. P. 070014-1. <https://www.doi.org/10.1063/1.4964238>
36. *Knaster J., Garin P., Matsumoto H., Okumura Y., Sugimoto M., Arbeiter F., Cara P., Chel S., Facco A., Favuzza P., Furukawa T., Heidinger R., Ibarra A., Kanemura T., Kasugai A., Kondo H., Massaut V., Molla J., Micciche G., O'hira S., Sakamoto K., Yokomine T., Wakai E.* // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. № 10. P. 102016. <https://www.doi.org/10.1088/1741-4326/aa6a6a>
37. *Mardor I., Aviv O., Avrigeanu M., Berkovits D., Dahan A., Dickel T., Eliyahu I., Gai M., Gavish-Segev I., Halfon S., Hass M., Hirsh T., Kaiser B., Kijel D., Kreisel A., Mishnayot Y., Mukul I., Ohayon B., Paul M., Perry A., Rahangdale H., Rodnizki J., Ron G., Sasson-Zukran R., Shor A., Silverman I., Tessler M., Vaintraub S., Weissman L.* // Europ. Phys. J. A. 2018. V. 54. № 5. <https://www.doi.org/10.1140/epja/i2018-12526-2>
38. *Schweizer W., Ratzinger U., Klump B., Volk K.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 2. P. 02A743. <https://www.doi.org/10.1063/1.4842335>
39. *Pisent A., Fagotti E., Colautti P.* // Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland. 2014. P. 261–263.
40. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <https://www.doi.org/10.1134/s1027451019060399>
41. *Izotov I., Skalyga V., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O.* // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014. P. 604. <https://www.doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRI012>
42. *Barabin S.V., Kropachev G.N., Lukashin A.Yu., Kulevoy T.V., Vybin S.S., Golubev S.V., Izotov I.V., Kiseleva E.M., Skalyga V.A., Grigoriev S.V., Kovalenko N.A.* // Technical Phys. Lett. 2021. V. 47. № 7. P. 485. <https://www.doi.org/10.1134/s1063785021050199>
43. *Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Ärje J., Clark H.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. № 2. P. 02B703. <https://www.doi.org/10.1063/1.3258608>
44. *Ferdinand R., Sherman J., Stevens R.R., Zaugg T.* // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. 1997. V. 3. P. 2723. <https://www.doi.org/10.1109/PAC.1997.752744>
45. *Chauvin N., Delferrière O., Duperrier R., Gobin R., Nghiem P.A.P., Uriot D.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 2. P. 02B320. <https://www.doi.org/10.1063/1.3678658>

Proton Injector for Compact Neutron Source DARIA Systems Optimization

S. S. Vybin¹ *, I. V. Izotov¹, E. A. Mironov¹, O. V. Palashov¹, V. A. Skalyga¹

¹*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

**e-mail: vybinss@ipfran.ru*

This paper is devoted to magnetic trap and extraction system upgrade of ECR ion source GISMO to utilize it as a proton injector for linear accelerator of compact neutron source DARIA. An open permanent magnet (Nd–Fe–B) trap was designed. It was adjusted to place the extraction system inside a part of magnet with larger inner diameter. Then, the three-electrode extractor optimization was made. It was shown that the use of additional magnetic lens allows to produce the proton beam with a low divergence angle. The use of the magnetic trap and the extraction system as a part of the proton injector for DARIA project possibility was shown using computer modeling. The following steps of the proton injector creation are discussed.

Keywords: ion sources, high current ion beams, ECR discharge, gasdynamic ion source, magnetic trap, permanent magnets, ion beam formation system, numerical modeling, IBSimu, proton beam.