

Компьютерное моделирование системы экстракции источника отрицательных ионов водорода с помощью пакета IBSimu

В.А. Батури^{*}, С.А. Еремин

Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40000 Сумы, Украина

(Получено 02.04.2018; опубликовано online 25.08.2018)

Предложена конструкция и представлены результаты численного моделирования системы экстракции для разрабатываемого в ИПФ НАН Украины источника отрицательных ионов водорода. Моделирование проведено с помощью разработанной компьютерной программы, использующей возможности свободно распространяемого пакета IBSimu. Детально описана методика моделирования данной системы. Проведен анализ распределения мощности, выделяемой в поглотителе электронного пучка. Исследована зависимость нормализованного эмиттанса пучка ионов H^- на выходе системы экстракции от тока ионов. Приведено объяснение полученных результатов с точки зрения кривизны границы плазмы и предложен способ минимизации эмиттанса в широком диапазоне ионного тока.

Ключевые слова: Источник ионов, Отрицательные ионы водорода, Плазменная граница, Эмиттанс.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04021](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04021)

PACS numbers: 41.75.Cn, 41.85.Ar, 52.40.Kh

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий наблюдается значительный рост введенных в эксплуатацию ускорителей заряженных частиц. Они активно используются в промышленности, медицине, физике элементарных частиц, исследованиях по термоядерному синтезу и т. д. [1]. В настоящее время в мире существует более 30000 ионных ускорительных комплексов, в которых первой и, возможно, наиболее важной частью является источник ионов вместе с его системой экстракции частиц [2]. Разработка и эксплуатация современных ускорителей стоят слишком дорого, поэтому особое значение уделяется высокой эффективности работы ионного источника, который должен обеспечить высокие значения плотности ионного тока и яркости ионного пучка.

Значительное количество современных высокоэнергетических ускорителей для инжекции используют отрицательные ионы водорода H^- [3]. Несмотря на физические и технические сложности генерации отрицательных ионов по сравнению с положительными, некоторые виды ускорителей используют отрицательные ионы с целью их дальнейшей перезарядки в положительные. Это, например, циклотроны, большие протонные накопительные кольца, а также тандемные ускорители. Отрицательные ионы также используются для генерации высокоэнергичных нейтральных пучков для дополнительного нагрева плазмы в термоядерных установках, например, в проекте термоядерного реактора ITER [4], так как имеют более высокую эффективность нейтрализации по сравнению с положительными ионами при высоких энергиях пучка.

В Институте прикладной физики НАН Украины в последние годы ведется разработка и исследование новых типов источников отрицательных ионов водорода для импульсного и стационарного режимов работы. В частности, разработано несколько версий высокоинтенсивных безцеэиевых источников ионов

H^- [5]. Это плазменные двухкамерные источники с объемной генерацией отрицательных ионов и большим ресурсом работы. Они надежны и просты в обслуживании. Эмиссионная плотность тока ионов H^- достигает 550 mA/cm^2 в импульсном режиме и является рекордной для безцеэиевых источников, отношение электронного тока к ионному составляет порядка 10.

Ионный инжектор современного ускорительного комплекса должен обеспечить высокую яркость ионного пучка и низкий эмиттанс на входе в ускоритель ($\sim 0,1 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$). Поэтому важной конструктивной частью плазменных ионных источников является система экстракции частиц, в которой происходит отбор частиц из плазменной границы, а также первичное формирование пучка. Данная система в значительной степени определяет эмиттансные характеристики источника ионов, которые должны быть согласованы с аксептансом конкретного ускорительного комплекса, в котором планируется использовать источник. При разработке систем экстракции широко используется компьютерное моделирование, в ходе которого определяется оптимальная геометрия и потенциалы элементов системы, а также такие параметры как эмиттанс экстрагируемого пучка, яркость ионного источника и т. п. В данной работе будут представлены результаты такого моделирования на примере разрабатываемого в ИПФ НАН Украины источника ионов H^- . В перспективе планируются испытания этого источника с доработанной системой первичной экстракции ионов на испытательном стенде ускорителя Linac4 в ЦЕРНе.

2. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Характерной особенностью источников отрицательных ионов является наличие в генерируемом пучке помимо собственно отрицательных ионов значительной электронной компоненты, которая может

^{*} baturin49@gmail.com

превышать ионную в 5-100 раз в зависимости от конструкции ионного источника. На практике нейтрализация электронного пучка осуществляется его отклонением на определенный угол с помощью поперечного магнитного поля с последующим поглощением на одном из электродов системы экстракции. Это отклонение может быть реализовано на выходе из эмиссионного электрода или на определенном расстоянии от него. С точки зрения компьютерного моделирования это означает, что система в целом не является аксиально-симметричной, несмотря на аксиальную симметрию отдельных элементов оптики, и должны использоваться трехмерные декартовы координаты.

Система экстракции, разрабатываемая в ИПФ НАН Украины, состоит из эмиссионного 1 и экстрагирующего 2 электродов, поглотителя электронов 3, блока постоянных магнитов 4 и системы электродов 5 – 7, образующих одиночную линзу (рис. 1).

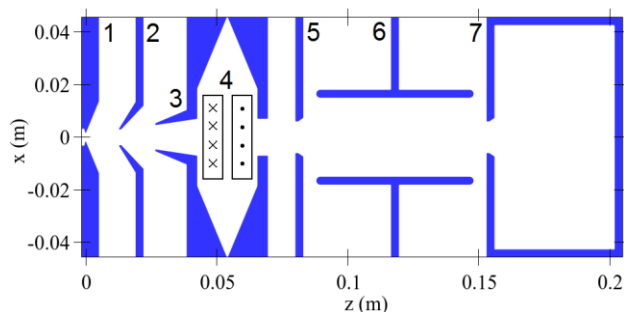


Рис. 1 – Геометрия системы экстракции источника отрицательных ионов ИПФ НАН Украины в плоскости XZ

Пучок ионов экстрагируется вдоль оси Z. Плоскость апертуры эмиссионного электрода пересекает данную ось в точке $z = 0$, а размер системы вдоль оси составляет 200 мм. Именно на расстоянии 200 мм планируется поместить входную диафрагму измерителя эмиттанса пучка. Ось Y направлена перпендикулярно плоскости рисунка, а отклонение электронного пучка происходит в плоскости XZ.

В области апертуры эмиссионного электрода происходит формирование плазменной границы, являющейся эмиттирующей поверхностью для пучка частиц. Радиус апертуры в данной конструкции составляет 1,6 мм и определяется эффективным размером области генерации отрицательных ионов водорода внутри источника. Эмиссионный электрод имеет классическую для систем с объемным зарядом пирсову геометрию. Экстракция частиц из источника осуществляется электрическим полем между эмиссионным и экстрагирующим электродами.

Отклонение электронного пучка с последующим его поглощением осуществляется с помощью двух пар самарий-кобальтовых постоянных магнитов размером $30 \times 13 \times 7,5$ мм, размещенных внутри поглотителя электронов и формирующих поперечное магнитное поле, направленное вдоль оси Y, как показано на рис. 2. Магнитное поле первой пары магнитов непосредственно отклоняет электронный пучок (и в значительно меньшей степени ионный). Вторая пара создает поле, противоположное по направлению полю первой.

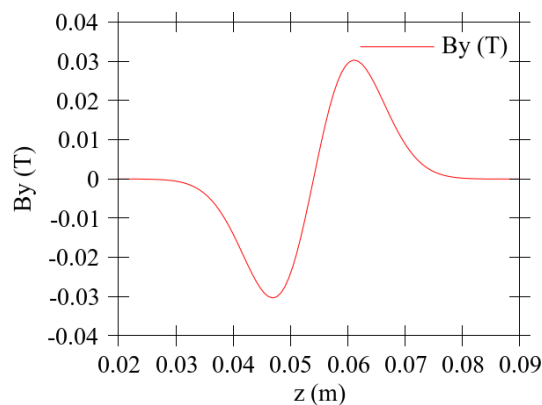


Рис. 2 – Распределение поперечного магнитного поля вдоль оптической оси внутри поглотителя электронов

Это поле, с одной стороны, компенсирует отклонение ионного пучка, а с другой стороны, несколько расфокусирует отклоненный электронный пучок, снижая при этом локальную тепловую нагрузку на поглотитель электронов. Разность потенциалов между эмиссионным электродом и поглотителем электронов зафиксирована на уровне 12 кВ, что обеспечивает постоянство энергии электронов на входе в поглотитель и, соответственно, радиуса кривизны их траекторий под действием магнитного поля, соответствующего рис. 2. Для охлаждения постоянных магнитов будет использована проточная вода, подаваемая через специальные каналы внутри поглотителя, а сам поглотитель планируется изготовить из меди ввиду ее высокой теплопроводности.

Прототипом разрабатываемой системы является модернизированная система экстракции отрицательных ионов водорода, генерируемых мультикасповым источником с ВЧ-нагревом плазмы для установки SNS (Spallation Neutron Source) в Окриджской Национальной Лаборатории, США [6]. Преимуществом данной системы экстракции является возможность изменения формы плазменного мениска путем регулирования потенциала экстрагирующего электрода при фиксированном потенциале эмиссионного. Это позволяет оптимизировать эмиттанс пучка отрицательных ионов водорода при разных значениях тока пучка.

3. МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСТРАКЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Для моделирования систем экстракции плазменных источников ионов в разное время различными группами были разработаны соответствующие алгоритмы и реализованы в виде готовых компьютерных программ. Коммерческие продукты, такие как PVBguns [7] и IGun [8], позволяют моделировать системы экстракции положительных и отрицательных ионов в двумерной и цилиндрически-симметричной геометрии, а программа Kobra-INP [9] – в трехмерной, но только для положительных ионов. Единственным подходящим вариантом в нашем случае оказался код IBSimu [10], разработанный Т. Кальвасом для моделирования экстракции отрицательных ионов в трехмерном случае и представ-

ляющий собой свободно распространяемую библиотеку для языка C++ с открытым исходным кодом [11]. С помощью данной библиотеки пользователь сам программирует процесс моделирования конкретной системы экстракции и тип результата, который он желает получить. Преимуществом такого подхода является его гибкость и широкий спектр решаемых задач. Данный код прошел успешную апробацию на целом ряде источников отрицательных ионов [6, 12, 13].

В общем случае моделирование систем экстракции плазмы в стационарном режиме осуществляется путем решения системы уравнений Пуассона-Власова

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \tag{1}$$

$$\vec{v} \nabla f - \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0, \tag{2}$$

где уравнение Пуассона (1) описывает связь между электрическим потенциалом ϕ и величиной плотности объемного заряда ρ (ϵ_0 – электрическая постоянная), а стационарное уравнение Власова (2) – поведение ансамбля частиц с зарядом q и массой m , имеющего распределение по координатам и скоростям $f(\vec{r}, \vec{v})$, в электрическом $\vec{E} = \nabla \phi$ и магнитном \vec{B} полях. При этом плотность объемного заряда в уравнении (1) определяется формулой

$$\rho = q \int f d\vec{v} + \rho_{PL}(\phi). \tag{3}$$

Первое слагаемое в данной формуле отвечает объемному заряду, создаваемому непосредственно пучком частиц. Второе представляет собой нелинейную функцию потенциала и определяется использованной моделью плазмы, описывающей распределение частиц плазмы в окрестности границы раздела плазма-вакуум (более подробно см. [14]). Решение системы уравнений (1)-(3) по указанным ранее причинам должно производиться в трехмерных декартовых координатах (x, y, z) в пределах расчетного объема, соответствующего габаритным размерам системы экстракции, при четко заданных граничных условиях. Для решения данной системы численными методами используется итеративный процесс, общая схема алгоритма которого показана на рис. 3.

Вся расчетная область покрывается прямоугольной сеткой с шагом h , узлы которой представляют значения потенциала ϕ и напряженности \vec{E} электрического поля, а также плотности объемного заряда ρ в данной точке. Численное решение уравнений Лапласа и Пуассона осуществляется методом конечных разностей. Пучок частиц формируется путем последовательного запуска N частиц ($N \sim 10^4 - 10^5$), начальные положения которых равномерно распределены в пределах апертуры эмиссионного электрода на левой границе расчетной области. Начальные скорости частиц определяются исходя из установленной начальной энергии частиц и их температуры (разброса по энергии). Расчет траекторий запускаемых частиц выполняется путем численного интегри-

рования их уравнений движения. Каждая из траекторий обладает током $I = JS / N$, где J – задаваемая плотность тока пучка, а S – его площадь сечения. Это значение тока используется при распределении объемного заряда по узлам сетки, вблизи которых проходит траектория, по специальному алгоритму.

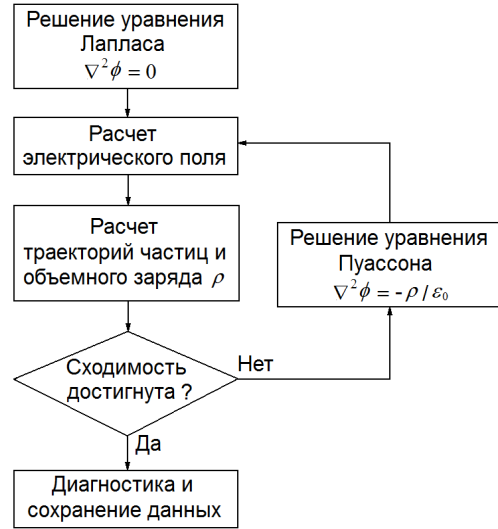


Рис. 3 – Схема алгоритма нахождения самосогласованного решения

Критерием сходимости решения задачи в данной работе выбрана величина эмиттанса пучка отрицательных ионов с координатами (x, y, z) и импульсами (p_x, p_y, p_z) в фазовых плоскостях (x, x') или (y, y') в конце ионно-оптического тракта. Здесь $x' = p_x / p_z$ и $y' = p_y / p_z$ представляют собой тангенсы углов наклона траекторий частиц относительно оси Z. В качестве численного значения эмиттанса, например, для фазовой плоскости (x, x') используется среднеквадратичная величина

$$\epsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}, \tag{4}$$

в которой

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\iint x^2 I(x, x') dx dx'}{\iint I(x, x') dx dx'}$$

$$\langle x'^2 \rangle = \frac{\iint x'^2 I(x, x') dx dx'}{\iint I(x, x') dx dx'}$$

$$\langle xx' \rangle = \frac{\iint xx' I(x, x') dx dx'}{\iint I(x, x') dx dx'}$$

где весовая функция $I(x, x')$ означает величину ионного тока на дифференциальной площади $dx dx'$ фазовой плоскости (x, x') .

В начале итеративного процесса наблюдаются значительные флуктуации среднеквадратичного эмиттанса, связанные с перераспределениями плотности тока пучка и, соответственно, создаваемого им объемного заряда. В дальнейшем величина эмиттанса стабилизируется и, начиная примерно с 16 итерации, его вариация не превышает 1 % (рис. 4).

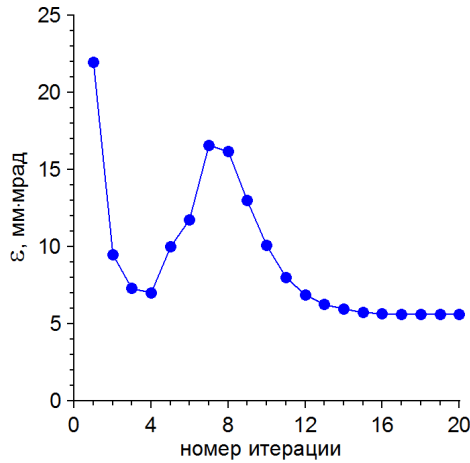


Рис. 4 – Зависимость среднеквадратичного эмиттанса пучка отрицательных ионов водорода на фазовой плоскости (x, x') в конце ионного тракта от текущего номера итерации

В данной работе в качестве результата моделирования будет использоваться нормализованное значение среднеквадратичного эмиттанса, которое в нерелятивистском случае определяется по формуле

$$\varepsilon_n = \varepsilon \frac{v_z}{c}, \tag{5}$$

где v_z – среднее значение компоненты скорости частиц, направленной вдоль оси ионно-оптической системы (в данном случае оси Z), c – скорость света в вакууме. Это позволит нейтрализовать эффект увеличения (уменьшения) среднеквадратичного эмиттанса как следствие торможения (ускорения) частиц при движении вдоль оси системы экстракции.

Для оценки величин эмиттансов пучков ионов заряженных частиц, полученных в ходе экспериментальных измерений или численного моделирования, вводится понятие минимального эмиттанса, которым может обладать пучок, экстрагируемый из данной оптической системы (т.е. при полном отсутствии аббераций). Он определяется радиусом эмиссионного отверстия r_0 и температурой ионов плазмы T_i . Этот минимальный эмиттанс может быть рассчитан из уравнения (4) с учетом круглой формы отверстия и гауссового распределения поперечных скоростей ионов, которое имеет вид

$$I(x, x') = \frac{2}{\pi r_0^2} \sqrt{r_0^2 - x^2} \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_i}} \exp\left(\frac{-m(x'v_z)^2}{2k T_i}\right),$$

где m – масса ионов, k – постоянная Больцмана. После нормализации величина минимального среднеквадратичного эмиттанса равна

$$\varepsilon_{n,\min} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k T_i}{m}} \frac{r_0}{c}. \tag{6}$$

Температура ионов T_i , определяющая энергетический разброс ионов плазмы, является одним из входных параметров моделирования. Ее точное значение нам заранее не известно. Исходя из имеющихся литературных данных [14], эта температура для

данного типа источников (в пересчете на электрон-вольты) находится в интервале 0,5-1 эВ.

Моделирование системы экстракции ионов проводилось на ЭВМ следующей конфигурации: процессор Intel Core-i3 3,7 ГГц, оперативная память 8 Мб, операционная система Windows 7 64-bit. Программа на языке C++, использующая библиотеку IBSimu, выполнялась в среде MinGW 64-bit.

При моделировании данной системы возникла проблема, связанная с тем, что геометрические размеры моделируемой области значительно превышают радиус апертуры эмиссионного электрода r_0 . Разработчиком пакета IBSimu установлено, что для минимизации вычислительных погрешностей при моделировании шаг расчетной сетки h должен удовлетворять соотношению $r_0 / h \geq 15$, что ограничивает величину h на уровне примерно 0,1 мм. При этом общее количество узлов расчетной сетки составляет порядка 10^8 - 10^9 , что делает моделирование абсолютно непригодным как в плане времени вычислений, так и потребляемой оперативной памяти. Для таких случаев автором пакета предложен алгоритм нахождения самосогласованного решения [14], который состоит из трех этапов:

1. Сначала находится самосогласованное решение в пределах вычислительного домена DOM1, ограниченного габаритными размерами системы экстракции, с большим шагом сетки (в нашем случае $h = 0,3$ мм).

2. Следующее решение находится уже в пределах другого домена меньшего объема DOM2, находящегося в области апертуры эмиссионного электрода, с меньшим шагом сетки (в нашем случае $h = 0,1$ мм). При этом используются граничные условия на основе потенциалов, полученных на этапе 1.

3. Наконец, находится самосогласованное решение в пределах вычислительного домена DOM1 как на этапе 1, но при фиксированных потенциалах узлов сетки в пределах домена DOM3, чуть меньшего по размеру, чем DOM2. При этом начальные условия для траекторий пучка частиц при моделировании задаются как продолжение траекторий, выходящих из домена DOM2.

Как показала практика, такой подход позволил сократить полное время моделирования данной системы в среднем с 4-5 часов до 20-25 мин, при этом погрешность вычисления эмиттанса в обеих фазовых плоскостях не превышает 1-2 %.

В процессе моделирования часть параметров системы была зафиксирована. К таким параметрам относятся: геометрические размеры системы, распределение магнитного поля в поглотителе, потенциал эмиссионного электрода (0 В), потенциал поглотителя электронов (12 кВ), а также потенциал крайних электродов одиночной линзы и приемника ионов (поз. 5 и 7 на рис. 1), который задает конечную энергию отрицательных ионов водорода (50 кВ). В данной работе для определенности использовано типичное для такого рода ионных источников отношение электронного тока к ионному $I_e / I_H = 10$. Помимо этого в библиотеке IBSimu имеется ряд второстепенных и специфических параметров, которые были зафиксированы в данной работе (начальная

энергия частиц, энергия и относительная доля быстрых и тепловых протонов для используемой плазменной модели и др.).

К параметрам, которые менялись в том или ином моделировании, относится ток отрицательных ионов водорода I_H , потенциал экстрагирующего электрода (или напряжение экстракции) V_{extr} , потенциал фокусирующего электрода (поз. 6 на рис. 1) V_{foc} и температура ионов T_i (0,5 и 1 эВ).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера на рис. 5 показано изображение полученных в результате моделирования (согласно схеме рис. 3) траекторий электронов и отрицательных ионов водорода, а также эквипотенциальной электрического поля при $I_H = 20$ мА, $V_{extr} = 50$ кВ и $V_{foc} = 14$ кВ. Цвет траекторий экстрагируемых частиц отражает их плотность тока в данной точке плоскости XZ : чем темнее цвет – тем выше плотность тока. Это позволяет отслеживать не только огибающую пучка частиц, но и его объемную структуру.

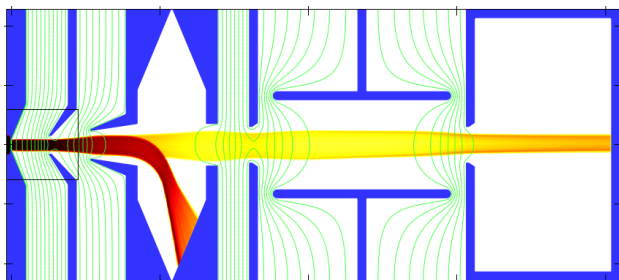


Рис. 5 – Траектории электронов и отрицательных ионов водорода с токами соответственно 200 и 20 мА при оптимальных потенциалах электродов ионно-оптической системы (черной сплошной линией обозначена граница между вычислительными доменами DOM1 и DOM2)

Особенностью библиотеки IBSimu является возможность построения распределения плотности мощности пучка частиц, попадающих на определенную поверхность. В нашем случае интерес представляет поглощение отклоненного электронного пучка током в сотни мА на поверхности поглотителя электронов, что вследствие неравномерности распределения тока может привести к локальному перегреву поверхности. На рис. 6 показан один из результатов такого моделирования, который соответствует траекториям частиц на рис. 5 (ток электронного пучка 200 мА, энергия 12 кВ).

Интегральная мощность, идущая на нагрев поглотителя, составляет 2,4 кВт. При этом локальная плотность мощности максимальна в нижней части поверхности и постепенно уменьшается в направлении вверх. Это связано с фокусирующим действием на электронный пучок магнитного поля первой пары постоянных магнитов и дефокусирующим действием магнитного поля второй. Максимальное из полученных в результате всей серии моделирований значений локальной плотности выделяемой мощности на коллекторе (около 80 Вт/мм²) более чем на порядок уступает критическому уровню в 1 кВт/мм², при котором начинается плавление поверхности.

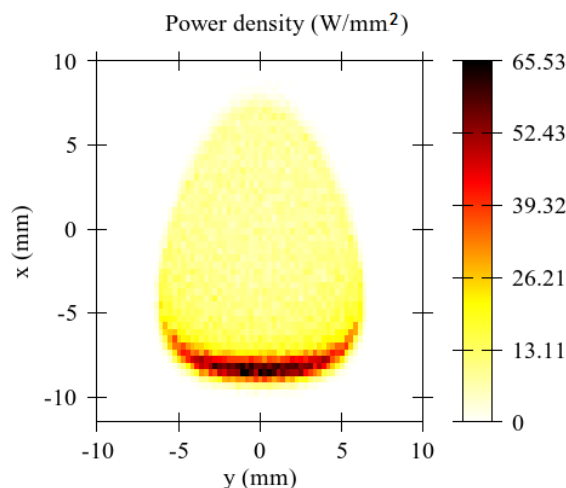


Рис. 6 – Распределение мощности электронного пучка на поверхности поглотителя электронов

Данная критическая величина получена в результате термодинамического моделирования нагрева медного поглотителя толщиной 3 мм, охлаждаемого водой [14]. Таким образом, можно говорить об умеренной тепловой нагрузке на материал поглотителя электронов.

Далее были проведены исследования влияния различных параметров ионного инжектора на эмиттанс пучка отрицательных ионов водорода, полученного в результате моделирования. Эмиттанс измерялся в плоскости, перпендикулярной оси Z , на расстоянии $z = 200$ мм. На рис. 7 представлены гистограммы распределения тока отрицательных ионов на фазовых плоскостях (x, x') и (y, y') , на основе которых программа рассчитывает величины среднеквадратичного (в т. ч. нормализованного) эмиттанса, параметры Твисса для построения соответствующего эллипса, характеризующего площадь, занимаемую пучком ионов на фазовой плоскости, а также чертит сам эллипс. Представленные рисунки соответствуют следующим параметрам моделирования: $I_H = 10$ мА, $V_{extr} = 35$ кВ, $V_{foc} = 20$ кВ и $T_i = 0,5$ эВ. Шкала цветовой палитры гистограмм отображена в единицах измерения [мкА/(мм·мрад)].

Представленные гистограммы соответствуют пучку, имеющему малую расходимость, что было достигнуто подбором фокусирующего напряжения. Об этом свидетельствует близкое к горизонтальному расположение большой оси эллипса. Кроме того, имеется возможность оценить отклонение оси ионного пучка от оптической оси системы экстракции на расстоянии 200 мм, возникающее вследствие действия на ионный пучок магнитного поля поглотителя электронов. Сила Лоренца магнитного поля, задаваемого в программе, действует вдоль оси X . Поэтому на диаграмме (x, x') отклонение центра пучка относительно оси системы составило около 0,5 мм, а наклон траекторий в среднем составил 5 мрад. На диаграмме (y, y') , как и следовало ожидать, центр пучка практически совпадает с началом координат. Необходимость компенсации отклонения траекторий пучка, генерируемых инжекторами отрицательных ионов, является типичной задачей при проектировании ускорительной техники.

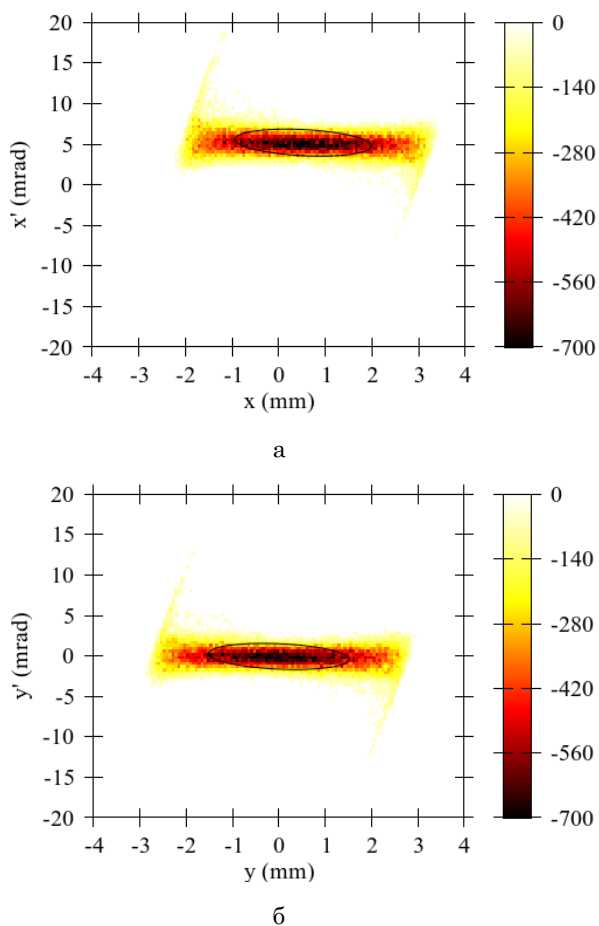


Рис. 7 – Распределение тока пучка ионов H^- на расстоянии $z = 200$ мм: а – на фазовой плоскости (x, x') , б – на фазовой плоскости (y, y')

Обращают на себя внимание также характерные «усь» на левом и правом концах распределения частиц на фазовой плоскости, вызванные действием на пучок ионов нелинейных сил при прохождении в ионно-оптическом тракте.

Для измерений эмиттанса в данной работе выбрана фазовая плоскость (x, x') , поскольку именно в направлении оси X происходит отклонение частиц магнитным полем поглотителя электронов. Тем не менее, как показывает моделирование, для пучка ионов H^- разница среднеквадратичных эмиттансов в фазовых плоскостях (x, x') и (y, y') на расстоянии 200 мм не превышает 2-3 %.

Наибольший интерес представляет исследование зависимости эмиттанса пучка ионов H^- от тока экстрагируемых частиц. В реальном эксперименте ток пучка регулируется изменением концентрации плазмы в источнике ионов, то есть регулированием тока разряда. На рис. 8а показан соответствующий полученный график при фиксированных потенциалах электродов системы экстракции, за исключением потенциала фокусирующего электрода. Напряжение экстракции составляло 35 кэВ, а потенциал фокусирующего электрода одиночной линзы подбирался так, чтобы на выходе из системы расходимость пучка ионов была минимальной. Соответствующие оптимальные значения V_{foc} для каждой величины тока ионов показаны на графике рис. 8б.

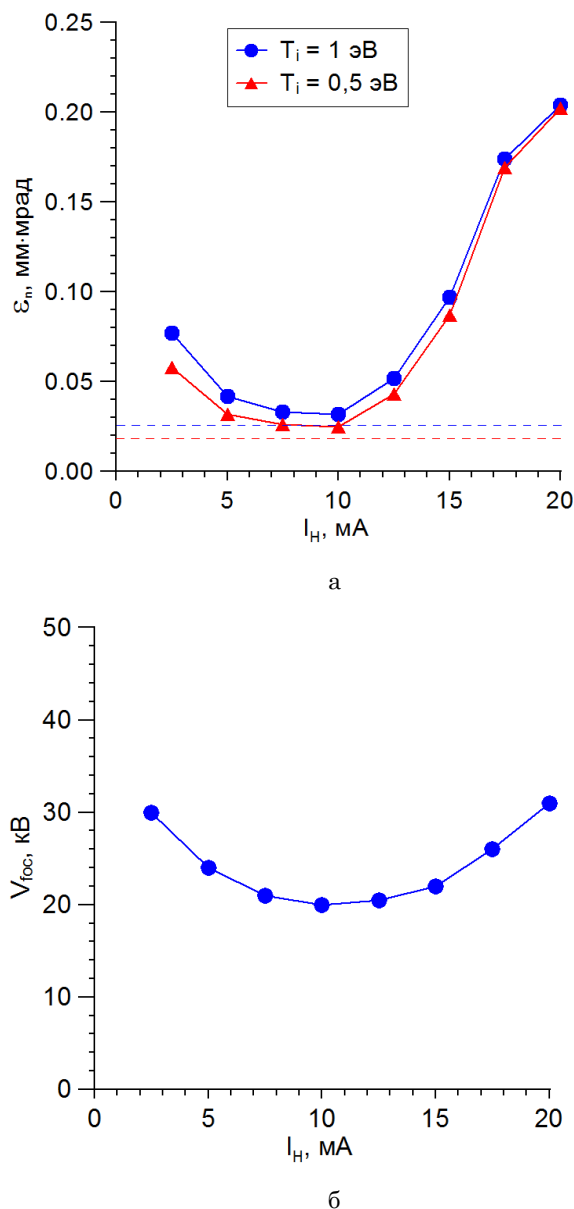


Рис. 8 – Результаты исследований эмиттанса пучка ионов при фиксированном $V_{extr} = 35$ кВ: а – графики зависимостей нормализованного эмиттанса от тока пучка ионов H^- (пунктиром обозначены минимально возможные значения эмиттансов для соответствующих температур); б – график зависимости величины оптимального V_{foc} от тока пучка ионов

Согласно полученным результатам, для определенного значения напряжения экстракции имеется оптимальное значение экстрагируемого ионного тока, при котором эмиттанс ионного пучка минимален. В данном случае этот минимум находится в интервале 8-10 мА. Минимально возможные значения нормализованного среднеквадратичного эмиттанса пучка в моделируемой системе, полученные по формуле (6), равны 0,0185 мм мрад при $T_i = 0,5$ эВ и 0,0262 мм мрад при $T_i = 1$ эВ. При этом величина среднеквадратичного нормализованного эмиттанса в минимуме всего на 25 % превышает соответствующий теоретический минимум для данной температуры ионов. Величина нормализованного эмиттанса, измеренная при 20 мА ионного тока, имеет несколь-

ко меньшее значение, чем следовало бы ожидать по виду графика. Это связано со значительным уширением пучка ионов при больших токах и потере некоторой части пучка на элементах поглотителя электронов.

В целом рост эмиттанса при больших и малых ионных токах объясняется изменением формы плазменной границы (мениска) в апертуре эмиссионного электрода при изменении тока частиц. Поскольку

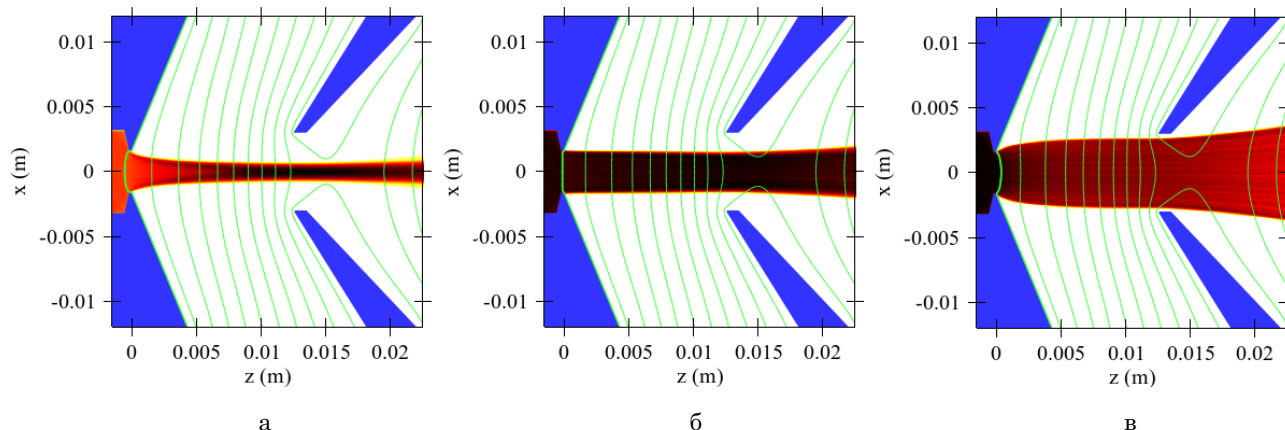


Рис. 9 – Форма плазменного мениска при фиксированном $V_{extr} = 35$ кВ, соответствующая разным токам экстрагируемых ионов водорода: 5 мА (а), 10 мА (б), 20 мА (в)

Здесь для визуализации формы границы плазмы использовалась группа из трех эквипотенциалей (с потенциалами +1, +2 и +4 В), близких к потенциалу эмиссионного электрода (0 В).

Характерно, что минимум эмиттанса достигается при значении ионного тока (10 мА), соответствующем плоской форме плазменной границы. Значительное искривление границы плазмы в ту или иную сторону приводит к появлению нелинейных сил (аббераций), действующих на частицы, что выражается в увеличении эффективной фазовой площади, занимаемой ансамблем частиц, и соответственно эмиттанса пучка. Рост эмиттанса связан также с влиянием объемного заряда пучка и неоднородностей поперечного магнитного поля.

Были проведены исследования динамики изменения нормализованного эмиттанса вдоль оси ионно-оптического тракта (рис. 10) для малых, средних и больших значений тока отрицательных ионов (5, 10 и 17,5 мА). В точке $z = 0$, соответствующей плоскости апертуры эмиссионного электрода, эмиттанс выше в случае малых токов вследствие вогнутой поверхности плазменного мениска. Соответствующее значение для больших токов отсутствует, т.к. в этом случае форма мениска выпуклая и плоскость $z = 0$ находится внутри плазмы.

Согласно представленным графикам, рост нормализованного эмиттанса наблюдается на двух участках ионно-оптического тракта. Первый участок ($z = 26-65$ мм) соответствует прохождению пучка ионов внутри поглотителя электронов (см. рис. 1), а второй ($z = 65-80$ мм) – промежутку между выходной диафрагмой поглотителя и входной диафрагмой одиночной линзы. При этом максимальный рост эмиттанса наблюдается при больших токах ионов.

плазменная граница обладает электропроводностью, вытягивающее электростатическое поле перпендикулярно к ней. Поэтому заряженные частицы двигаются вдоль нормалей к границе плазмы, и если эта граница имеет вогнутую форму, пучок частиц будет сходящимся, а если выпуклую – наоборот [15]. Этот факт демонстрируют изображения пучков, полученные в пределах домена DOM2 (рис. 9).

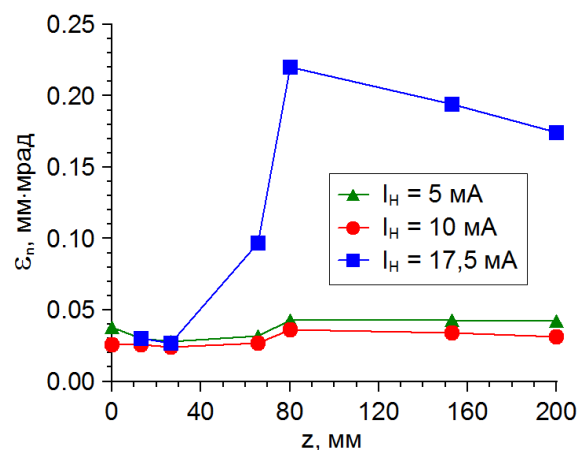


Рис. 10 – Распределение нормализованного эмиттанса ионов H^- вдоль оси ионно-оптического тракта при различных токах ионов

Как уже было отмечено выше, преимуществом данной конструкции системы экстракции ионов является возможность изменения формы плазменного мениска при фиксированном ионном токе путем регулирования экстрагирующего напряжения. Это позволяет для каждого значения тока отрицательных ионов водорода подобрать такое значение V_{extr} , при котором граница плазмы будет иметь минимальную кривизну, а эмиттанс при этом будет минимален. В результате серии экспериментов была получена зависимость минимального значения нормализованного эмиттанса и соответствующего оптимального V_{extr} от величины ионного тока (рис. 11).

Как можно видеть на рис. 11а, в результате нам удалось в значительной степени стабилизировать

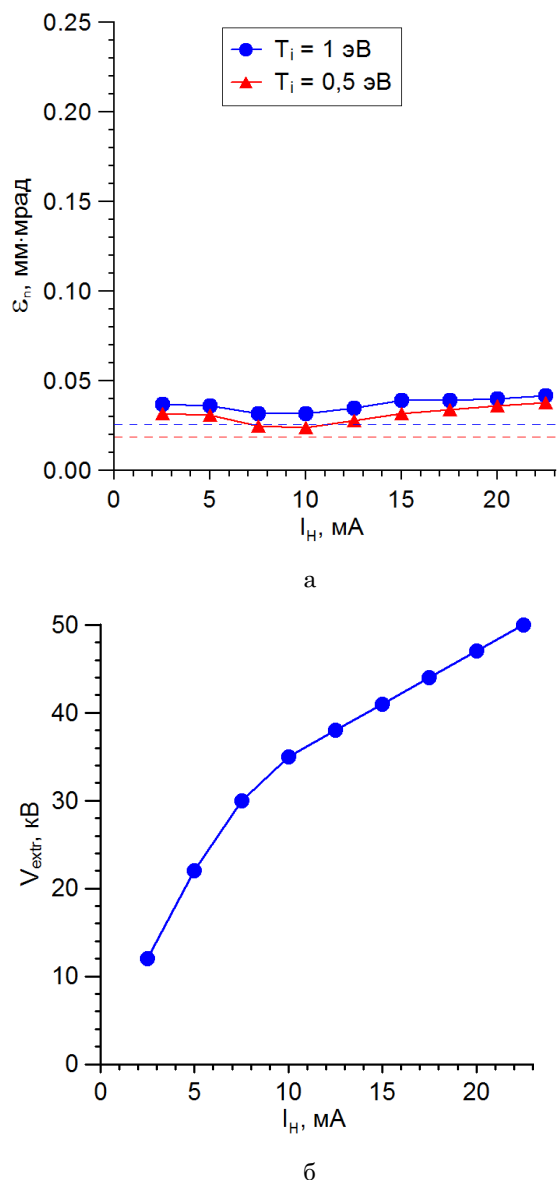


Рис. 11 – Результаты исследований эмиттанса пучка ионов при оптимальном V_{extr} : а – графики зависимостей нормализованного эмиттанса от тока пучка ионов H^+ (пунктиром обозначены минимально возможные значения эмиттансов для соответствующих температур); б – график зависимости величины оптимального V_{extr} от тока пучка ионов

величину эмиттанса в широком диапазоне ионного тока (до 22,5 мА). Характерно, что для более высоких значений ионного тока требуется более высокое напряжение экстракции (рис. 11б). В нашем случае по техническим соображениям это напряжение ограничено величиной 50 кВ. Фокусирующее напряжение при данных измерениях составляло 20 кВ, за исключением случая малых и больших токов ионов, где оно отклонялось от данной величины в пределах 2-3 кВ для минимизации расходимости пучка ионов.

5. ВЫВОДЫ

С помощью компьютерного моделирования с использованием пакета IBSimu проведены исследования формирования и транспортировки частиц в системе экстракции разрабатываемого в ИПФ НАН Украины источника отрицательных ионов водорода. Проведенные исследования распределения мощности, выделяемой электронным пучком в поглотителе электронов, показывают, что максимальные локальные значения плотности мощности не превышают критического уровня для данной конструкции поглотителя. Полученная зависимость нормализованного эмиттанса пучка ионов H^+ на выходе системы экстракции от ионного тока имеет минимум в области 10 мА при напряжении экстракции 35 кВ. Рост эмиттанса в области малых (2,5 мА) и особенно больших (20 мА) токов объясняется кривизной плазменного мениска, что приводит к действию нелинейных сил на пучок ионов. Минимальные значения нормализованного эмиттанса наблюдаются, если форма границы плазмы в апертуре эмиссионного электрода близка к плоской. При этом величина нормализованного эмиттанса в минимуме всего на 25-30% выше соответствующего теоретического минимального предела для данной температуры ионов. Оптимизируя напряжение между эмиссионным и экстрагирующим электродами, можно добиться минимальных значений эмиттанса для данной системы в диапазоне ионных токов от 2,5 до 22,5 мА при отношении электронного тока к ионному, равному 10.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотруднику Института прикладной физики НАН Украины П.А. Литвинову за помощь в разработке конструкции системы экстракции ионов.

Computer Simulation of the Negative Hydrogen Ion Source Extraction System Using IBSimu Package

V.A. Baturin, S.A. Yeryomin

Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska Str., 40000 Sumy, Ukraine

A design is proposed and the results of a numerical simulation of the extraction system for the source of negative hydrogen ions being developed at the IAP NAS of Ukraine are presented. The simulation was carried out with the help of the developed computer program using the possibilities of the freely distributed IBSimu package. The technique of modelling this system is described in detail. An analysis of the power distribution released in the electron beam dump is made. The dependence of the normalized emittance of the H^- ion beam at the exit of the extraction system via ion current is studied. The obtained results are explained in terms of the curvature of the plasma boundary and the method for minimizing the emittance over a wide range of ion current is proposed.

Keywords: Ion source, Negative hydrogen ions, Plasma boundary, Emittance

Комп'ютерне моделювання системи екстракції джерела негативних іонів водню за допомогою пакета IBSimu

В.А. Батурін, С.О. Єрьомін

Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, 40000 Суми, Україна

Запропоновано конструкцію та представлені результати чисельного моделювання системи екстракції для джерела негативних іонів водню, що розробляється в ІПФ НАН України. Моделювання проведено за допомогою розробленої комп'ютерної програми, що використовує можливості вільно розповсюджаного пакета IBSimu. Детально описана методика моделювання даної системи. Проведено аналіз розподілу потужності, що виділяється у поглиначі електронного пучка. Досліджено залежність нормалізованого емітанса пучка іонів H^- на виході системи екстракції від струму іонів. Наведено пояснення отриманих результатів із точки зору кривизни границі плазми та запропоновано спосіб мінімізації емітанса у широкому діапазоні іонного струму.

Ключові слова: Джерело іонів, Негативні іони водню, Плазмова границя, Емітанс.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. <http://www.accelerators-for-society.org>
2. М.Д. Габович, *Физика и техника плазменных источников ионов* (М.: Атомиздат: 1972) (M.D. Gabovich, *Fizika i tekhnika plazmennyykh istochnikov ionov* (M.: Atomizdat: 1972)) [In Russian].
3. J. Peters, *Rev. Sci. Instrum.* **71** No 2, 1069 (2000).
4. R. Hemsworth, H. Decamps, J. Graceffa, B. Schunke, M. Tanaka, M. Dremel, A. Tanga, H.P.L. De Esch, F. Geli, J. Milnes, T. Inoue, D. Marcuzzi, P. Sonato, P. Zaccaria, *Nucl. Fusion* **49** No 4, 045006 (2009).
5. V.A. Baturin, P.A. Litvinov, S.A. Pustovoitov, A.Yu. Karpenko, *Rev. Sci. Instrum.* **81** No 2, 02A710 (2010).
6. T. Kalvas, R.F. Welton, O. Tarvainen, B.X. Han, M.P. Stockli, *Rev. Sci. Instrum.* **83** No 2, 02A705 (2012).
7. https://www.far-tech.com/docs/pbguns_manual.pdf
8. R. Becker, *Rev. Sci. Instrum.* **63** No 4, 2756 (1992).
9. http://www.aetjapan.com/english/software.php?ElectronGuns_IonSources_design=INP
10. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje, H. Clark, *Rev. Sci. Instrum.* **81** No 2, 02B703 (2010).
11. <http://ibsimu.sourceforge.net>
12. T. Kalvas, S.K. Hahto, F. Gicquel, M. King, J.H. Vainionpää, J. Reijonen, K.N. Leung, T.G. Miller, *Rev. Sci. Instrum.* **77** No 3, 03B904 (2006).
13. T. Kalvas, O. Tarvainen, H. Clark, J. Brinkley, J. Ärje, 2nd International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources, Takayama, Japan, *AIP Conf. Proc.* **1390**, 439 (2011).
14. T. Kalvas, Development and use of computational tools for modelling negative hydrogen ion source extraction systems, *Academic Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy* (Jyväskylä: Finland: 2013).
15. А. Бенфорд, Транспортировка пучков заряженных частиц (М.: Атомиздат: 1969) (A. Benford, *Transportirovka puchkov zaryazhennykh chastits* (M.: Atomizdat: 1969)) [In Russian].