

Научно-исследовательское учреждение  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Г. Е. Деревянкин, Г. С. Крайнов, А. М. Крючков,  
Г. И. Сильвестров, С. Ю. Таскаев, М. А. Тиунов

ИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТ 2,5 МэВ 10 мА  
УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА

ИЯФ 2002-24

Новосибирск  
2002

## **Ионно-оптический тракт 2,5 МэВ 10 мА ускорителя-тандема**

*Г. Е. Деревянкин, Г. С. Крайнов, А. М. Крючков,  
Г. И. Сильвестров, С. Ю. Таскаев, М. А. Тиунов*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,  
Новосибирск, Россия

*В работе методом численного моделирования исследуется ионно-оптический тракт электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на энергию протонов до 2,5 МэВ и током до 40 мА. Рассматриваются разные способы транспортировки интенсивного пучка отрицательных ионов с начальной энергией 25 кэВ от источника до ускорителя и возможные схемы согласованного ввода такого пучка в ускоритель, позволяющие с минимальными потерями ускорять и проводить пучок сквозь перезарядную трубку. На основе проведенных исследований предлагаются две конструкции ионно-оптического тракта ускорителя-тандема с энергией протонов 2,5 МэВ и током 10 мА.*

## **The ion-optical channel of 2.5 MeV 10 mA tandem accelerator**

*G. Derevyankin, G. Kraynov, A. Kryuchkov, G. Silvestrov,  
S. Taskaev, M. Tiunov*

Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

*The ion-optical channel of vacuum insulation tandem accelerator for 2.5 MeV proton energy and up to 40 mA current is studied by numerical simulation technique. Different ways of transporting high current negative ion beam with the initial energy of 25 keV from the source to the accelerator are considered. Possible schemes of coordinated injection of this beam to accelerator are also considered, which allow to accelerate it with minimum losses and transport it through the charge-exchange tube. Basing in the carried out research two constructions of ion-optical channel of 2.5 MeV 10 mA tandem accelerator are proposed.*

---

В рамках реализации проекта источника нейтронов для нейтронозахватной терапии рака [1, 2] в ИЯФ разрабатывается электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией на энергию протонов до 2,5 МэВ и постоянным током до 40 мА. Схема ускорителя показана на Рис. 1.

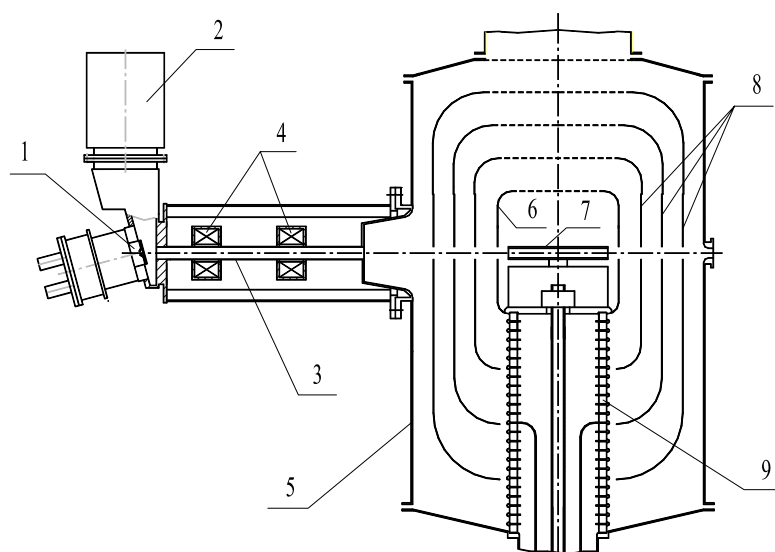


Рис.1. Схема 2,5 МэВ ускорителя-тандема: 1 – источник отрицательных ионов, 2 – вакуумный насос, 3 – трубка дрейфа, 4 – магнитные линзы, 5 – вакуумный бак, 6 – высоковольтный электрод, 7 – перезарядная трубка, 8 – промежуточные электроды, 9 – высоковольтный изолятор.

Одним из элементов ускорителя является ионно-оптический тракт, который должен обеспечить следующие возможности:

1. Транспортировку пучка отрицательных ионов водорода от источника до ускорителя.
2. Ускорение отрицательных ионов водорода в первом ускоряющем зазоре до энергии 1,25 МэВ при минимальном оседании пучка на промежуточные электроды.
3. Максимальное прохождение пучка ионов сквозь перезарядную трубку.
4. Ускорение получившегося в результате перезарядки пучка протонов во втором ускоряющем зазоре до энергии 2,5 МэВ при минимальном оседании пучка на промежуточные электроды.

В данной работе методом численного моделирования рассматриваются разные способы транспортировки пучка отрицательных ионов водорода с энергией 25 кэВ и током до 40 мА от источника до ускорителя. Проводится анализ возможных схем согласованного ввода такого пучка в ускоритель, позволяющих с минимальными потерями ускорять и проводить пучок сквозь перезарядную трубку. На основе проведенных исследований предлагаются две конструкции ионно-оптического тракта ускорителя-тандема для проведения пучка с током 10 мА. Приводятся результаты расчета прохождения пучка от источника до выхода из ускорителя в этих конструкциях.

## **I. Параметры пучка на выходе из ионного источника**

При проектировании ионно-оптического тракта рассматривали два варианта транспортировки пучка с током отрицательных ионов водорода 10 мА и 40 мА.

В качестве стартовых параметров 10 мА ионного пучка принимались полученные экспериментально параметры 5 мА непрерывного пучка отрицательных ионов водорода [3]. В 5 мА пучке распределение плотности тока на выходе из ионно-оптической системы источника однородное, а диаметр пучка равен 3 мм. Измеренный регулярный угол разлета пучка на выходе из источника равен 50 мрад. При энергии ионов 20 кэВ измеренная поперечная температура ионов на выходе из источника равна 0,7 эВ.

В дальнейшем предполагается увеличить диаметр выпускного отверстия источника до 5 мм, повысить ток пучка до 10 мА и поднять энергию ионов до 25 кэВ. Поэтому при расчете задачи транспортировки и ускорения 10 мА пучка ионов выбирали следующие стартовые параметры: начальная энергия ионов 25 кэВ, начальный диаметр пучка 5 мм, начальный угол разлета пучка 50 мрад и поперечная температура ионов 1 эВ.

Для формирования 40 мА непрерывного пучка отрицательных ионов водорода разрабатывается новый источник [4]. Параметры пучка на выходе из этого источника пока не определены, поэтому при расчете задачи проведения 40 мА пучка его стартовые параметры получали простым пересчетом параметров 10 мА пучка: вдвое увеличивали начальные диаметр и угол разлета пучка. Поперечная температура ионного пучка полагалась по-прежнему равной 1 эВ.

## II. Требования к пучку в перезарядной мишени и на выходе из ускорителя

Проведение непрерывного пучка ионов с энергией 1,25 МэВ и током до 40 мА через перезарядную трубку с внутренним диаметром не более 12 мм и длиной 500 мм [5] является наиболее трудной задачей при проектировании ионно-оптического тракта ускорителя-тандема. К пучку предъявляются довольно жесткие требования, чтобы избежать оседания пучка на перезарядную трубку.

Во-первых, на всей длине трубки диаметр пучка с учетом его теплового ореола должен быть меньше внутреннего диаметра трубки. Это означает, что регулярный угол наклона траекторий пучка в трубке не может превышать следующей величины:

$$\alpha_{\max} \approx \frac{D}{L}, \quad (1)$$

где  $D$  и  $L$  – диаметр и длина перезарядной трубки. Эта оценка соответствует случаю, когда пучок на входе в трубку имеет радиус, равный радиусу трубки, и сфокусирован в точку в середине трубки. Для такой трубки получим  $\alpha_{\max} = 24$  мрад. Если же хочется, чтобы пучок занимал только половину апертуры трубки, этот угол должен быть в два раза меньше.

Во-вторых, может быть оценен максимальный аксептанс перезарядной трубки для случая, когда пучок сфокусирован на выходе из трубки, по следующей формуле:

$$A_{\max} \approx \frac{D^2}{4L}. \quad (2)$$

Отсюда может быть оценена максимально допустимая поперечная температура пучка ионов. Для пучка с диаметром, равным диаметру перезарядной трубки, это соответствует поперечной температуре ионов  $T_{\perp\max} \approx W_i (2 A_{\max}/D)^2$ , где  $W_i = 1,25$  МэВ – энергия ионов в перезарядной трубке. Для такой трубки получаем  $T_{\perp\max} = 180$  эВ.

Оценка по формуле (2) дает сильно завышенную величину, поскольку дополнительные требования накладываются на пучок на выходе из ускорителя-тандема. После ускорения непрерывный пучок протонов с энергией 2,5 МэВ и током до 40 мА предполагается провести в канале общей длиной около 3 метров до нейтронообразующей мишени диаметром  $3 \div 5$  см. Для проведения пучка от ускорителя до мишени с помощью минимального числа промежуточных фокусирующих элементов необходимо, чтобы на выходе из ускорителя пучок имел минимальные диаметр и угловой разлет. Это означает, что пучок должен быть сфокусирован не на выходе из перезарядной трубки, а на выходе из ускорителя. Расстояние от входа в перезарядную трубку до выхода из ускорителя примерно в два раза превышает длину трубки (см. Рис. 1), то есть аксептанс этого участка ионно-оптического тракта в два раза меньше оценки, получаемой по формуле (2). В пересчете на максимально допустимую поперечную температуру ионов для пучка с диаметром, равным диаметру перезарядной трубки, получаем величину 45 эВ.

### **III. Используемые приближения и программы для расчета ионно-оптического тракта ускорителя**

На этапе выбора способа транспортировки ионного пучка от источника до ускорителя расчет динамики пучка проводили программой ExtraSAM [6], позволяющей учитывать как поперечное, так и продольное поле объемного заряда ионного пучка. Для описания пространственных распределений объемного заряда, потенциала и электрического поля вводили набор прямоугольных сеток, покрывающих только предполагаемую область движения пучка. Полный учет поля объемного заряда был необходим при расчете динамики пучка в аксиальных электростатических линзах с глубоким торможением ионов.

Реальный размер и регулярный разлет пучка ионов на выходе из ионного источника задавали размером и формой эффективного эмиттера. Распределение плотности тока по эмиттеру в программе ExtraSAM может быть задано постоянным или по Гауссу. Программа позволяет учесть также тепловой разброс поперечных скоростей ионов (радиальный и азимутальный) на выходе из ионного источника. Величина разброса задается в виде поперечной температуры ионов на эмиттере. Кроме этого, необходимо задать число радиальных и азимутальных слоев, описывающих распределение тепловых поперечных скоростей ионов по Максвеллу. При этом из каждой точки эмиттера стартует сразу несколько частиц с разной поперечной скоростью. Это позволяет моделировать реальный тепловой эмиттанс ионного пучка.

Как только для транспортировки пучка были выбраны магнитные линзы, сразу отпала необходимость учитывать влияние продольного электрического поля объемного заряда в силу его малости по сравнению с поперечным полем. Поэтому дальнейшие расчеты проводили программой BEAM [7], описывающей только поперечные поля объемного заряда пучка с помощью одномерной PIC модели. Внешние поля ускорителя и магнитных линз рассчитывали в программе BEAM в парааксиальном приближении пятого порядка. При этом осевые распределения полей и всех их производных вплоть до пятого порядка рассчитывали с высокой точностью с помощью программы SAM [8]. Использование программы BEAM позволило существенно сократить время расчета по сравнению с программой ExtraSAM.

В программе BEAM можно задать начальный радиус и угол разлета пучка ионов в любом начальном сечении. Распределение же плотности тока в этом сечении может быть задано либо постоянным, либо произвольным по точкам. Возможно также задать начальный тепловой разброс поперечных скоростей ионов в виде поперечной температуры ионов в этом сечении. При этом распределение по Максвеллу тепловых поперечных скоростей ионов моделируется с помощью датчика случайных чисел. Каждой частице PIC модели приписывается своя поперечная тепловая скорость, случайная по величине и направлению. Большое количество частиц позволяет хорошо описывать реальный тепловой эмиттанс ионного пучка.

Как в программе ExtraSAM, так и в BEAM есть возможность задавать несколько зон компенсации объемного заряда ионного пучка. Каждая зона описывается начальной и конечной осевыми координатами и коэффициентом компенсации. При моделировании транспортировки пучка отрицательных ионов водорода с помощью электростатических тормозящих линз вводили одну зону с полной компенсацией объемного заряда пучка: от источника до ближайшей линзы (до точки подъема тормозящего потенциала выше температуры пучка). При использовании магнитных линз таких зон вводили две: первая от источника до входа в ускоритель (до точки подъема ускоряющего потенциала выше температуры пучка) и вторая внутри перезарядной трубки.

#### **IV. Возможные способы транспортировки пучка от источника до ускорителя**

При проектировании ионно-оптического тракта рассматривали следующие два способа транспортировки ионного пучка от источника до ускорителя:

- а) с помощью аксиальных электростатических линз с торможением пучка;
- б) с помощью аксиальных магнитных линз.

Каждый из указанных выше способов имеет свои преимущества и недостатки. Безусловным достоинством электростатических линз перед магнитными является их малое энергопотребление. Однако чтобы обеспечить требуемую фокусировку ионного пучка, приходится проводить его глубокое торможение в линзе с 25 кэВ до 1 ÷ 2 кэВ. При этом пучок с током 10 мА и более под действием сил объемного заряда значительно расширяется и может занимать до 80% апертуры линзы. Это приводит к появлению сильных aberrаций и искажению радиального распределения плотности тока и фазового портрета пучка после прохождения им линзы. В результате такой пучок трудно согласованно ввести в ускоритель и провести сквозь узкую перезарядную трубку, особенно если используется несколько электростатических линз.

Кроме этого, использование электростатических линз приводит к исчезновению уже после первой линзы такого важного свойства непрерывного пучка отрицательных ионов водорода, как компенсация объемного заряда пучка за счет ионизации остаточного газа. В результате необходима дополнительная фокусировка пучка для компенсации сил пространственного заряда пучка. Отметим, что полная компенсация при этом невозможна вследствие неоднородного распределения плотности заряда пучка после прохождения им глубоко тормозящей электростатической линзы. Эти эффекты наиболее сильно проявляются при транспортировке пучка с током более 10 мА.

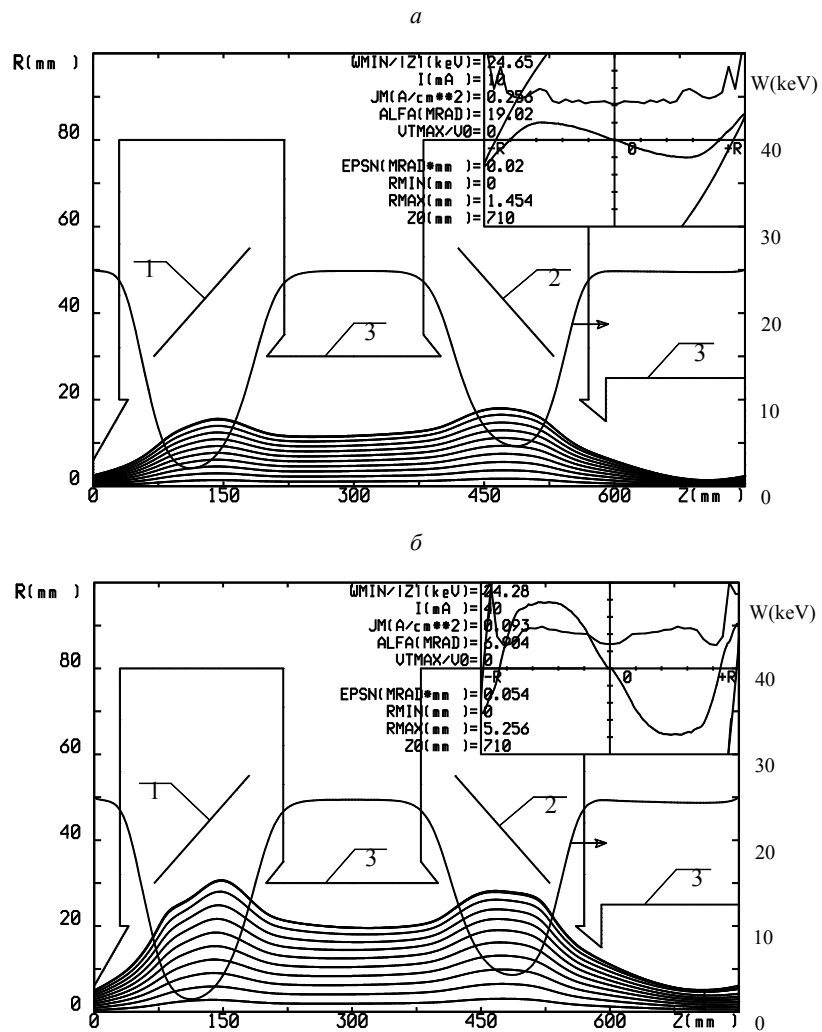


Рис.2. Транспортировка 25 кэВ пучка  $H^+$  с током 10 мА (а) и 40 мА (б) с помощью двух электростатических линз: расчетные характерные траектории частиц и осевое распределение энергии ионов  $W$ . Цифрами обозначены: 1 – первый тормозящий электрод, 2 – второй тормозящий электрод, 3 – контур трубки дрейфа. На вставке в верхнем правом углу приведены радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка в фокусе второй линзы.



На Рис. 2 представлены результаты расчета транспортировки от источника до ускорителя 25 кэВ пучка отрицательных ионов водорода с током 10 мА и 40 мА с помощью двух аксиальных электростатических линз. Тормозящие электроды в этих линзах имеют коническую форму, чтобы минимизировать aberrации. Для обоих значений тока потенциалы равны на первом тормозящем электроде  $-23,5$  кВ и на втором  $-21$  кВ. На каждом из этих рисунков показаны осевое распределение энергии ионов  $W$  с учетом влияния объемного заряда пучка, расчетные траектории ионов пучка в линзах, и на вставке в правом верхнем углу радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка в фокусе второй линзы.

Магнитные линзы позволяют транспортировать полностью скомпенсированный пучок отрицательных ионов водорода с постоянной энергией. В результате максимальный размер пучка и оптические свойства канала слабо зависят от тока пучка. Эта зависимость возникает только из-за изменения размера и угла разлета пучка на выходе из источника, а также изменения оптимального размера и угла влета пучка в ускоритель. Кроме этого, магнитные линзы имеют такое важное преимущество перед электростатическими линзами, как возможность подбирать их оптимальное положение без изменения конструкции канала.

На Рис. 3 представлены результаты расчета транспортировки от источника до ускорителя пучка отрицательных ионов водорода с энергией 25 кэВ и с током 10 мА и 40 мА с помощью двух аксиальных магнитостатических линз. В этих расчетах пучки полагались полностью скомпенсированными от ионного источника и до выхода из второй линзы, после которой предполагается влет в электрическое поле ускорителя. Линзы представляют собой две катушки со средним диаметром много больше максимального диаметра пучка, чтобы минимизировать aberrации в линзах. На Рис. 3 показаны геометрия и положение катушек, расчетное осевое распределение магнитного поля  $B$ , траектории ионов пучка в линзах, а также радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка в фокусе второй линзы (левый верхний угол). Полный ток в обеих катушках полагался одинаковым и равным 40 кА для обоих пучков.

Вследствие таких достоинств, как возможность транспортировать скомпенсированные пучки ионов высокой интенсивности и подбирать оптимальное положение фокусирующих элементов без изменения конструкции канала, в дальнейшем для проведения пучка от источника до ускорителя предполагается использовать магнитные линзы.

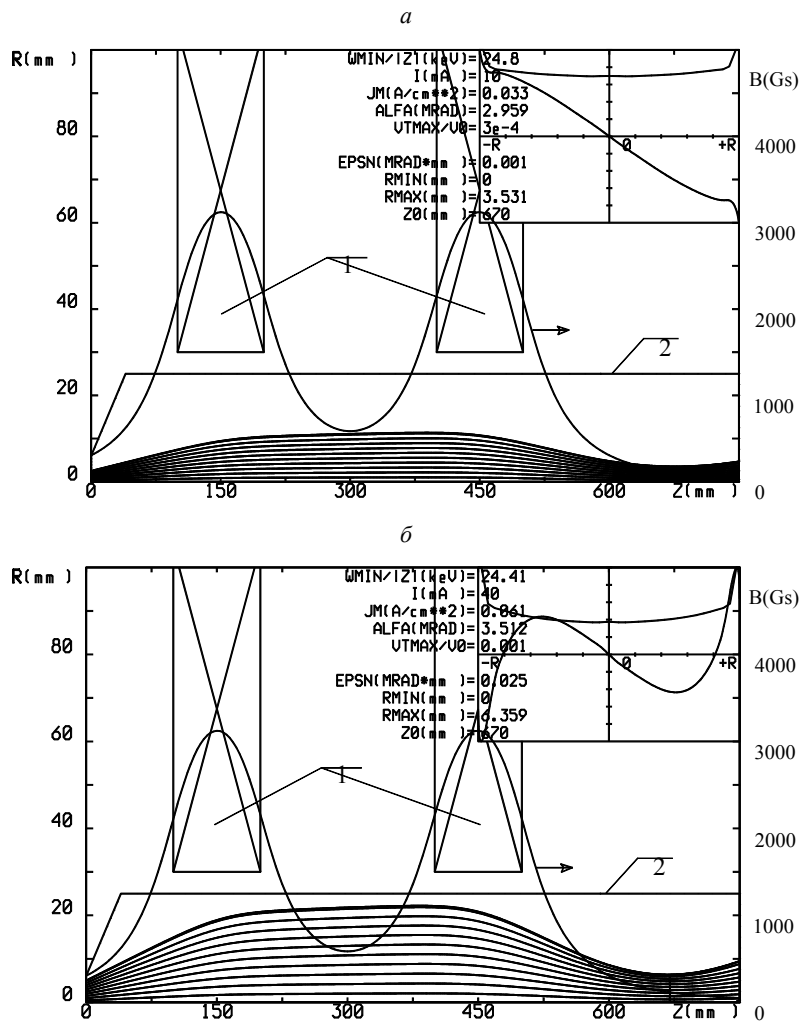


Рис.3. Транспортировка 25 кэВ пучка H<sup>+</sup> с током 10 мА (а) и 40 мА (б) с помощью двух магнитных линз: расчетные характерные траектории частиц и осевое распределение магнитного поля В. Цифрами обозначены: 1 – катушки с током, 2 – контур трубки дрейфа. На вставке в верхнем правом углу приведены радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка в фокусе второй линзы.

## V. Схемы согласованного ввода пучка в ускоритель

При энергии протонов 2,5 МэВ электрическое поле в ускорителе-тандеме в каждом из двух основных ускоряющих зазоров размером по 40 см достигает величины 32 кВ/см. Для такого поля оценка фокусного расстояния электростатической фокусирующей линзы, образующейся на входе в ускоритель, для ионов водорода с начальной энергией 25 кэВ дает величину порядка 3,5 см, что много меньше первого основного ускоряющего зазора ускорителя. Поэтому для обеспечения прохождения пучка через ускоритель необходимо уменьшить фокусирующее действие входной электростатической линзы и сформировать на выходе из первого основного ускоряющего зазора параллельный пучок диаметром меньше диаметра перезарядной трубки. Нами рассмотрено две схемы такого согласованного ввода пучка в ускоритель с использованием магнитных линз: «жесткая» и «мягкая» фокусировка пучка электрическим полем ускорителя.

В схеме с «жесткой» фокусировкой компенсация фокусирующего действия входной электростатической линзы достигается за счет впуска в ускоритель сильно расходящегося ионного пучка малого радиуса. Такой пучок можно получить только путем его перефокусировки с помощью магнитной линзы непосредственно перед входом в ускоритель.

На Рис. 4,а показаны геометрия ионно-оптического тракта ускорителя-тандема и осевые распределения полей при использовании схемы «жесткой» фокусировки пучка (эффект перезарядки при расчетах не учитывали, поэтому полагали, что поле в обоих основных ускоряющих зазорах имеет одинаковый знак). Число промежуточных зазоров в этих расчетах было равно 8. Видно, что в этом случае для того, чтобы ослабить действие первой электростатической линзы, поле в первых двух промежуточных зазорах ускорителя пришлось уменьшить в 1,5 раза путем увеличения зазоров. На Рис. 4,б показаны расчетные огибающие 25 кэВ ионных пучков с токами 1 мА, 10 мА и 40 мА при использовании данной схемы «жесткой» фокусировки. На входе в магнитную линзу распределение плотности тока задавали по Гауссу при одинаковых размерах пучка, а начальный угол разлета пучков полагали равным нулю. При этом для каждого значения тока пучка подбирали такое осевое положение и ток линзы, чтобы обеспечить оптимальное прохождение пучка через перезарядную трубку внутренним диаметром 12 мм и длиной 400 мм.

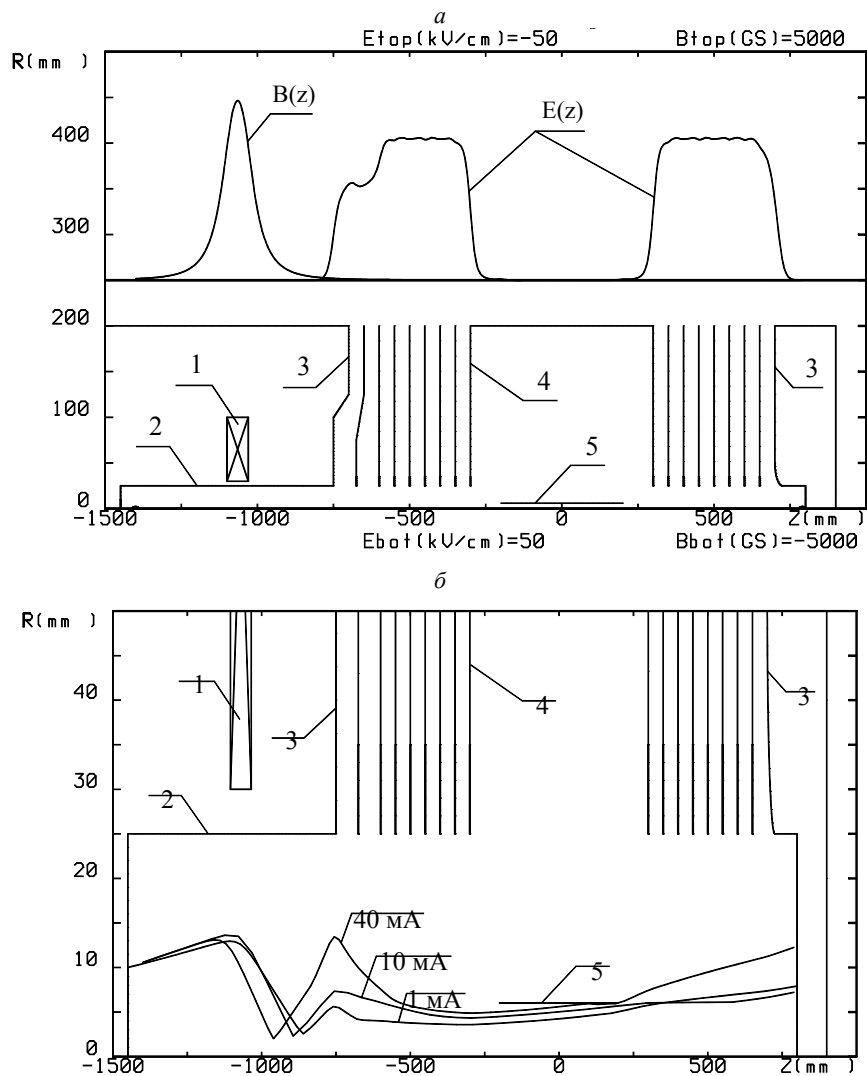


Рис. 4. Согласованный ввод 25 кэВ пучка  $H^-$  в ускоритель-тандем по «жесткой» схеме фокусировки: геометрия ионно-оптического тракта, расчетные осевые распределения полей (а) и огибающие ионных пучков с током 1 мА, 10 мА и 40 мА (б). Цифрами обозначены: 1 – катушка с током, 2 – трубка дрейфа, 3 – вакуумный бак, 4 – высоковольтный электрод, 5 – перезарядная трубка.

Недостатками такой схемы являются заметное увеличение эмиттанса пучка на входе в ускоритель за счет нелинейного действия сил объемного заряда и большая чувствительность его коэффициента прохождения и выходных параметров как к углу разлета, так и к осевой координате точки перефокусировки пучка на входе в ускоритель. В то же время достоинством такой схемы является слабая зависимость радиуса пучка в перезарядной трубке и его коэффициента прохождения сквозь трубку от тока пучка. Это позволяет без проблем проводить через ускоритель пучки разной интенсивности.

В схеме с «мягкой» фокусировкой действие первой линзы сильно ослабляется за счет плавного нарастания электрического поля на входе в ускоритель. При этом угол наклона огибающей пучка на входе в ускоритель близок к нулю, а радиус пучка подбирается таким, чтобы фокусирующее действие слабой электростатической входной линзы почти компенсировалось расталкивающим действием поперечных сил объемного заряда пучка (равновесный радиус пучка). Недостатком такой схемы является сильная зависимость равновесного входного радиуса пучка, а следовательно и радиуса пучка в перезарядной трубке от тока пучка. В то же время достоинствами этой схемы по сравнению с «жесткой» фокусировкой являются существенно меньшее увеличение эмиттанса пучка на входе в ускоритель за счет ослабления действия сил объемного заряда и меньшая чувствительность коэффициента прохождения сквозь трубку и выходных параметров пучка от угла сходимости пучка на входе в ускоритель. Это позволяет использовать для согласованного ввода пучка более слабую линзу, а также проводить через ускоритель и получать на выходе более качественный пучок заданной интенсивности.

Для интенсивного пучка с начальной энергией  $W_0$  и однородным радиальным распределением плотности тока можно найти аналитические распределения потенциала и поля, которые обеспечивают его ускорение при постоянном радиусе. Для потенциала оно записывается в виде

$$U(\xi) = \left[ \left( \sqrt{\xi^2 + 1} + \xi \right)^{2/3} + \left( \sqrt{\xi^2 + 1} - \xi \right)^{2/3} - 1 \right]^2, \quad (3)$$

где  $U(\xi) = 1 + V(\xi)/V_0$  – безразмерный потенциал,  $V(\xi)$  – реальный потенциал, а  $V_0 = W_0/e$  – начальный потенциал ионного пучка;  $\xi = \frac{Z}{2d_0}$  – безразмерная продольная

координата, причем параметры  $d_0$  и  $V_0$  связаны с плотностью ионного пучка  $j_0$  следующим соотношением:

$$j_0 = \frac{1}{9\pi} \cdot \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \frac{V_0^{3/2}}{d_0^2}, \quad (4)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса ионов. На Рис. 5 представлены кривые осевого распределения потенциала и поля для 10 мА пучка отрицательных ионов водорода с начальной энергией 25 кэВ и равновесным диаметром 10 мм, рассчитанные с помощью формул (3) и (4).

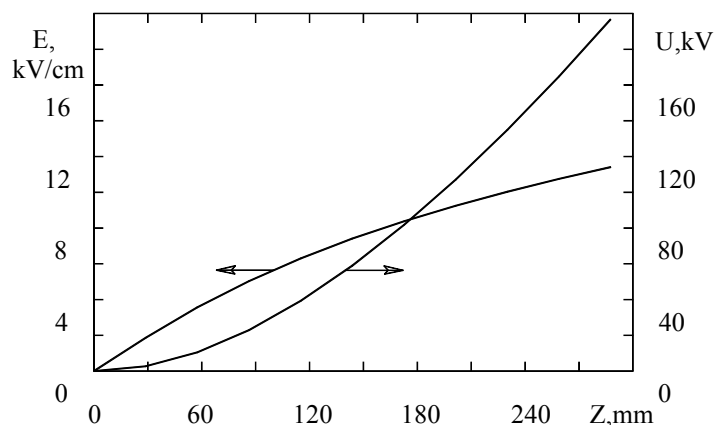


Рис. 5. Аналитическое распределение потенциала  $U$  и поля  $E$ , которое обеспечивает ускорение пучка отрицательных ионов водорода с начальной энергией 25 кэВ и током 10 мА при постоянном диаметре 10 мм.

Первоначально рассматривали возможность реализации требуемого распределения потенциала путем локального увеличения первого промежуточного зазора ускорителя вблизи оси ионного пучка и введения в эту область двух дополнительных электродов (Рис. 6,а) с потенциалами, вычисляемыми по формуле (3). Получающиеся в результате распределения электрического и магнитного полей на оси ионно-оптического тракта также показаны на Рис. 6,а. Число промежуточных зазоров в этом случае и везде в дальнейшем выбирали равным шести. На Рис. 6,б показаны полученные для данной геометрии расчетные огибающие 25 кэВ ионных пучков с током 1 мА, 10 мА и 40 мА, охватывающие 95 % тока. На входе в магнитную линзу распределение плотности тока задавали по Гауссу, а начальный угол разлета пучков полагали равным нулю. Начальный размер и ток каждого пучка в линзе подбирали такими, чтобы обеспечить максимальное прохождение пучка через перезарядную трубку внутренним диаметром 12 мм и длиной 400 мм при минимальном угле наклона огибающей пучка.

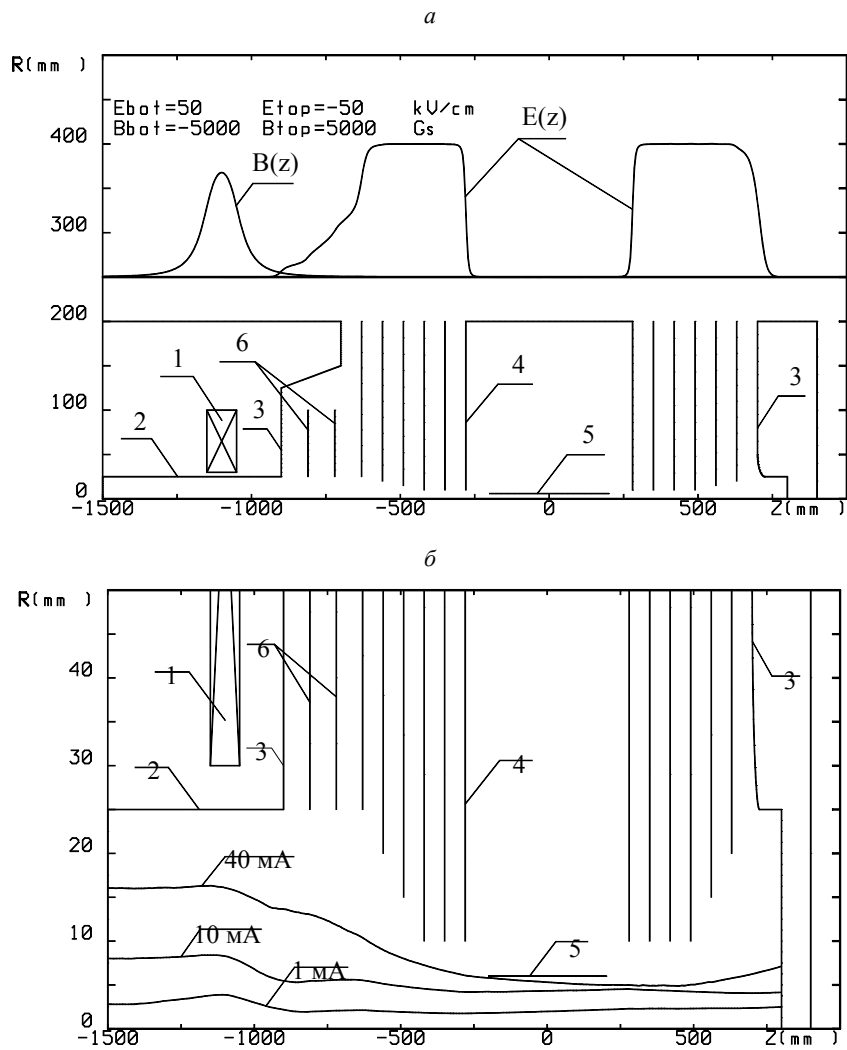


Рис. 6. Согласованный ввод 25 кэВ пучка  $H^-$  в ускоритель-тандем с использованием схемы «мягкой» фокусировки: геометрия ионно-оптического тракта, осевое распределение полей (а) и расчетные огибающие ионных пучков с током 1 мА, 10 мА и 40 мА, охватывающие 95 % тока (б). Цифрами обозначены: 1 – катушка с током, 2 – трубка дрейфа, 3 – вакуумный бак, 4 – высоковольтный электрод, 5 – перезарядная трубка, 6 – дополнительные электроды.

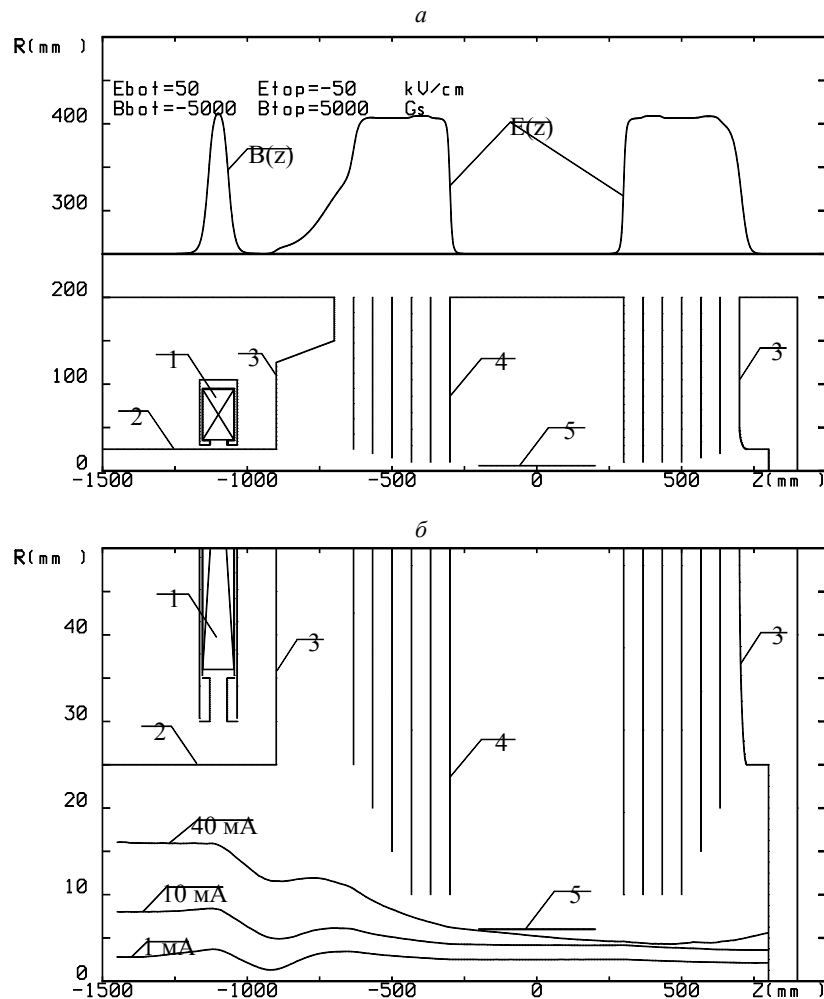


Рис. 7. Согласованный ввод 25 кэВ пучка  $H^-$  в ускоритель-тандем с использованием упрощенной схемы «мягкой» фокусировки: геометрия ионно-оптического тракта, расчетное осевое распределение полей (а) и огибающие ионных пучков с током 1 мА, 10 мА и 40 мА, охватывающие 95 % тока (б). Цифрами обозначены: 1 – магнитная линза, 2 – трубка дрейфа, 3 – вакуумный бак, 4 – высоковольтный электрод, 5 – перезарядная трубка.



В дальнейшем было обнаружено, что близкое к требуемому осевое распределение электрического поля может быть получено без введения дополнительных электродов. Достаточно просто локально увеличить первый из промежуточных ускоряющих зазоров вблизи точки ввода пучка в ускоритель (Рис. 7,а). Получающиеся в результате кривые распределения электрического и магнитного полей на оси ионно-оптического тракта также показаны на Рис. 7,а. Исходный размер первого промежуточного зазора здесь увеличен с 67 мм до 267 мм, максимальный диаметр конической области, в которой изменен зазор, равен 300 мм, а минимальный – 250 мм. Магнитная линза здесь выполнена в виде катушки в магнитном экране.

На Рис. 7,б показаны расчетные огибающие 1 мА, 10 мА и 40 мА ионных пучков, охватывающие 95 % тока, в данной геометрии. Начальные условия здесь задавали такие же, как и в предыдущих расчетах, а ток в линзе снова подбирали таким, чтобы обеспечить максимальное прохождение пучков через перезарядную трубку при минимальном угле наклона их огибающих. Сравнение Рис. 6 и 7 показывает, что схему «мягкой» фокусировки пучка можно реализовать без введения дополнительных электродов.

В целом можно видеть, что описанные выше схемы ввода пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем с «жесткой» и «мягкой» фокусировкой пучка дополняют друг друга, незначительно отличаясь в геометрии ионно-оптического тракта. Поэтому при разработке окончательной геометрии ионно-оптического тракта было решено обеспечить возможность проверить экспериментально как «жесткую», так и «мягкую» фокусировку пучка, а окончательный выбор схемы ввода пучка сделать после сравнения результатов этих экспериментов.

## **VI. Окончательная геометрия и параметры ионно-оптического тракта**

На первом этапе разработки окончательной геометрии ионно-оптического тракта 2,5 МэВ ускорителя-тандема была найдена оптимальная геометрия магнитного экрана и рассчитаны параметры двух магнитных линз, которые предполагается использовать для транспортировки и согласованного ввода 10 мА ионного пучка в ускоритель. Линзы проектировали на базе уже имеющихся модулей обмотки разборного соленоида с внешним водяным охлаждением.

Чертеж одного такого модуля приведен на Рис. 8,а. Он включает теплоотводящий алюминиевый диск, на который приклеены 39 витков токовой шинки сечением  $2,8 \times 4 \text{ мм}^2$ . Диаметр внутреннего отверстия на диске равен 64 мм, наружный диаметр диска равен 200 мм, период модульной структуры равен 10,25 мм. Обмотка каждой линзы собирается из 10 таких модулей. На Рис. 8,б показан чертеж всей линзы в сборе, включая обмотку, магнитный экран, каркас и систему охлаждения. Максимальный полный ток в обмотке линзы равен 29,25 кА-витков и достигается при токе в шине 75 А и полном напряжении на обмотке линзы 25 В.

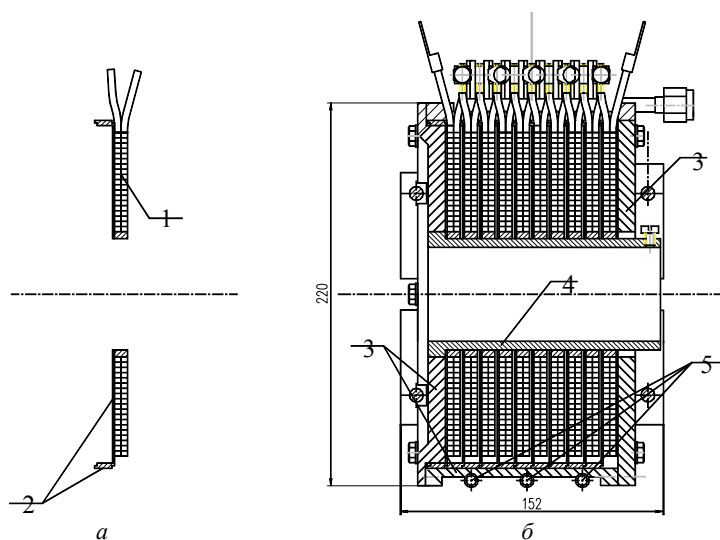


Рис. 8. Чертеж магнитной линзы: базовый модуль обмотки (а) и магнитная линза в сборе (б). Цифрами обозначены: 1 – шинка с током, 2 – алюминиевый диск, 3 – магнитный экран, 4 – каркас линзы (нержавеющая сталь), 5 – трубки системы охлаждения.

В ходе расчетов была найдена оптимальная геометрия магнитного экрана, обеспечивающая минимум aberrаций, вносимых линзой, и отсутствие эффектов насыщения. Внутренний диаметр трубки дрейфа ионно-оптического тракта, на которой крепится линза, равен 50 мм. На Рис. 9 показаны контур трубки дрейфа, расчетная геометрия магнитной линзы и осевое распределение магнитного поля при максимальном полном токе в обмотке линзы. Максимальное значение магнитного поля при этом равно 3350 Гс, эффективная длина линзы равна 83 мм.

На следующем этапе разработки ионно-оптического тракта подбирали оптимальное расстояние от источника ионов до центра бака ускорителя-тандема, положение и ток в обеих линзах, а также геометрию входной части ускорителя для схем с «мягкой» и «жесткой» фокусировкой пучка. При этом принимали, что источник отрицательных ионов водорода формирует пучок с током 10 мА, начальной энергией 25 кэВ, поперечной энергией 1 эВ, начальным диаметром 5 мм и начальным углом разлета 50 мрад. Расстояние от источника до центра первой магнитной линзы ограничено конструктивно и не может быть меньше 200 мм. Внутренний диаметр трубы системы транспортировки ионного пучка, на котором крепятся магнитные линзы, равен 50 мм. Внутренний диаметр перезарядной трубки равен 12 мм, длина трубки 500 мм. Критериями оптимальности являлись минимальный радиус пучка в перезарядной трубке, а также минимальный угол разлета и эмиттанс пучка на выходе

из ускорителя при минимальной мощности, потребляемой обмотками обеих магнитных линз.

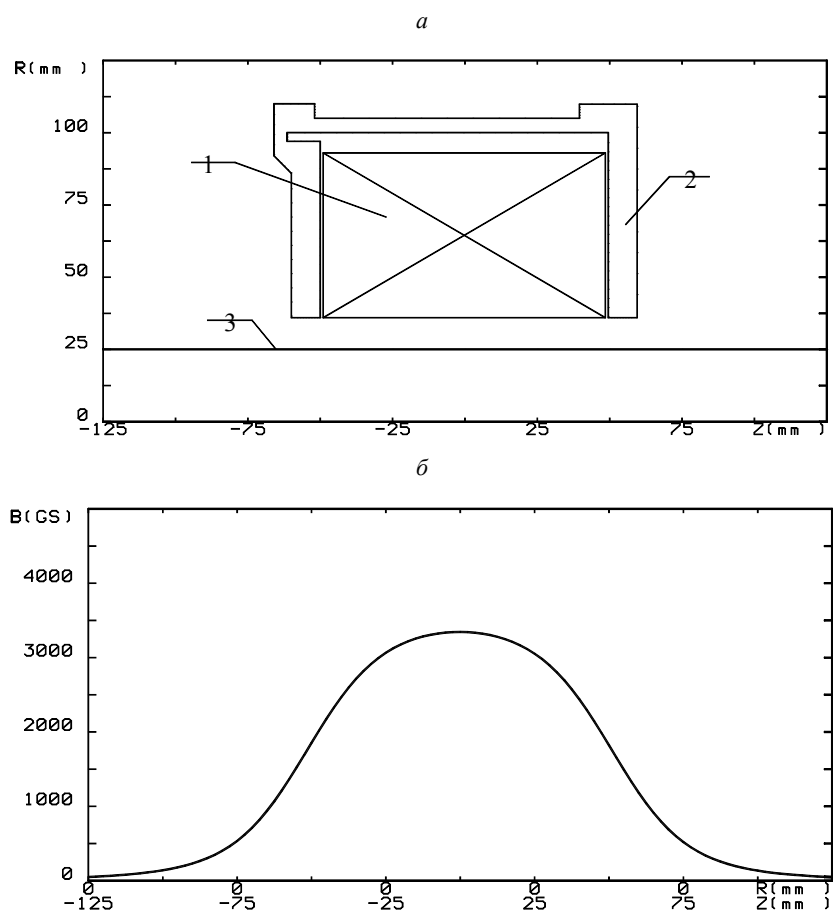


Рис. 9. Расчетная геометрия магнитной линзы (а) и осевое распределение магнитного поля  $B$  при максимальном токе в обмотке линзы 29,25 кА-витков (б). Цифрами обозначены: 1 – катушка с током, 2 – магнитный экран, 3 – контур трубки дрейфа.

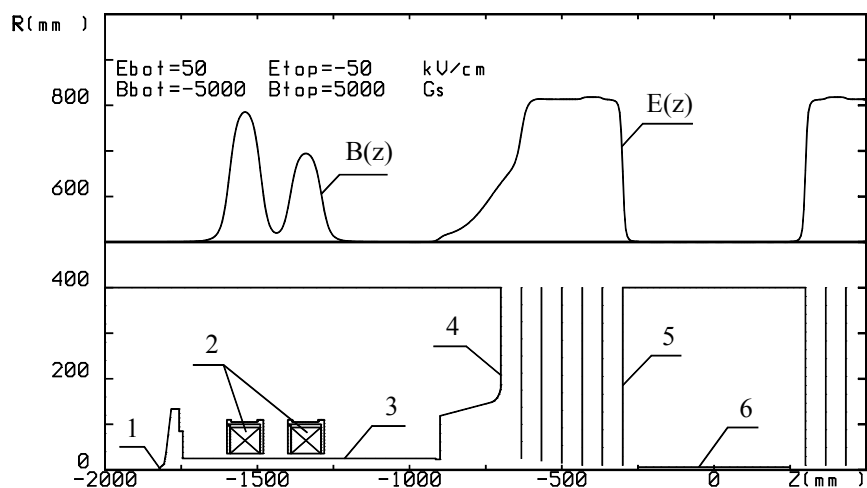


Рис. 10. Геометрия ионно-оптического тракта ускорителя-тандема и расчетное осевое распределение полей для схемы «мягкой» фокусировки пучка  $H^+$  с током 10 мА и начальной энергией 25 кэВ. Цифрами обозначены: 1 – ионный источник, 2 – магнитные линзы, 3 – трубка дрейфа, 4 – вакуумный бак, 5 – высоковольтный электрод, 6 – перезарядная трубка.

Принятая в расчетах геометрия ионно-оптического тракта ускорителя-тандема для схемы ввода пучка с помощью «мягкой» фокусировки показана на Рис. 10. Максимальный диаметр конического раструба на входе пучка в ускоритель равен 300 мм, длина раструба 200 мм. Там же показано расположение источника ионов и магнитных линз, а также расчетное распределение вдоль оси ионно-оптического тракта магнитного поля  $B$  фокусирующих линз и электрического поля  $E$  ускорителя. При этом полный ток в первой от источника магнитной линзе равен 25 кА, а во второй – 17 кА.

Результаты расчетов данной геометрии представлены на Рис. 11. На Рис. 11,*а* показаны контуры электродов, перезарядной трубки и магнитных линз, а также огибающие 25 % и 95 % тока пучка. На Рис. 11,*б* показаны радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет ионного пучка на выходе из ускорителя. Здесь же приведены расчетные значения радиуса, максимального угла разлета и нормализованного г.м.с. эмиттанса пучка на выходе из ускорителя.

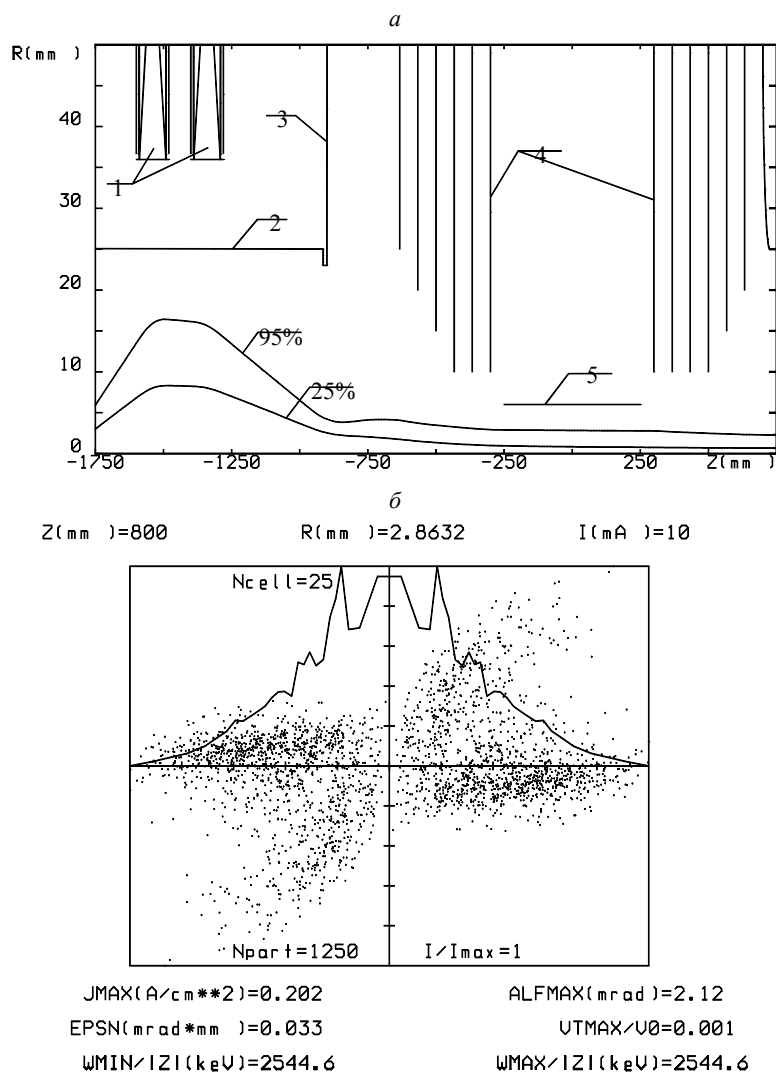


Рис. 11. Результаты расчета ионно-оптического тракта ускорителя-тандема для схемы «мягкой» фокусировки пучка  $H^-$  с током 10 мА и начальной энергией 25 кэВ: *a* – огибающие 25 % и 95 % тока пучка; *b* – радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на выходе из ускорителя. Цифрами обозначены: 1 – магнитные линзы, 2 – трубка дрейфа, 3 – вакуумный бак, 4 – высоковольтный электрод, 5 – перезарядная трубка.

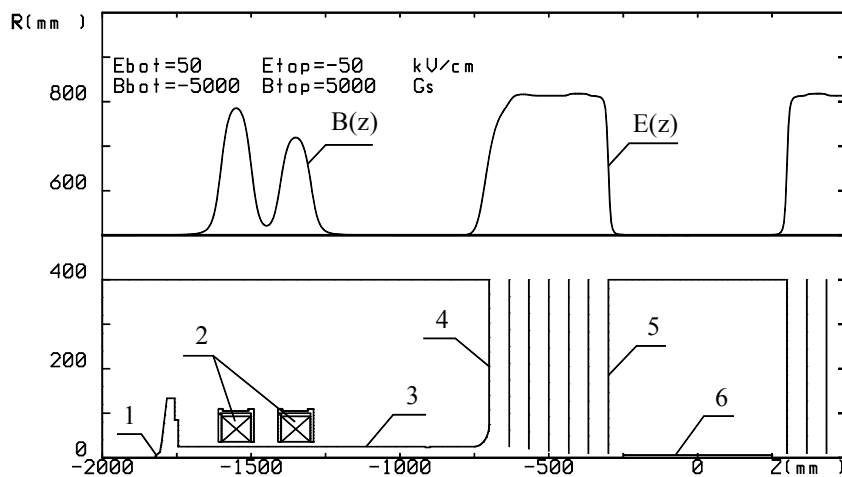


Рис. 12. Геометрия ионно-оптического тракта ускорителя-тандема и расчетное осевое распределение полей для схемы «жесткой» фокусировки пучка  $H^-$  с током 10 мА и начальной энергией 25 кэВ. Цифрами обозначены: 1 – ионный источник, 2 – магнитные линзы, 3 – трубка дрейфа, 4 – вакуумный бак, 5 – высоковольтный электрод, 6 – перезарядная трубка.

Геометрия ионно-оптического канала ускорителя-тандема для ввода "жестко" сфокусированного пучка показана на Рис. 12. При этом положение источника ионов и двух магнитных линз совпадает со случаем «мягкой» фокусировки. Отметим также, что первый промежуточный зазор ускорителя не меняли, а просто трубу канала транспортировки с внутренним диаметром 50 мм гладко состыковывали с баком ускорителя с помощью тороидальной поверхности с радиусом кривизны 50 мм. На Рис. 12 также показано расчетное распределение вдоль оси ионно-оптического тракта магнитного поля фокусирующих линз и электрического поля ускорителя. Полный ток в первой от источника магнитной линзе равен 25 кА, а во второй – 19,2 кА.

Результаты расчетов этой геометрии представлены на Рис. 13. На Рис. 13,а показаны контуры электродов, перезарядной трубки и магнитных линз, а также огибающие 25 % и 95 % тока пучка. На Рис. 13,б показаны радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет ионного пучка на выходе из ускорителя. Здесь же приведены расчетные значения радиуса, максимального угла разлета и нормализованного г.м.с. эмиттанса пучка на выходе из ускорителя.

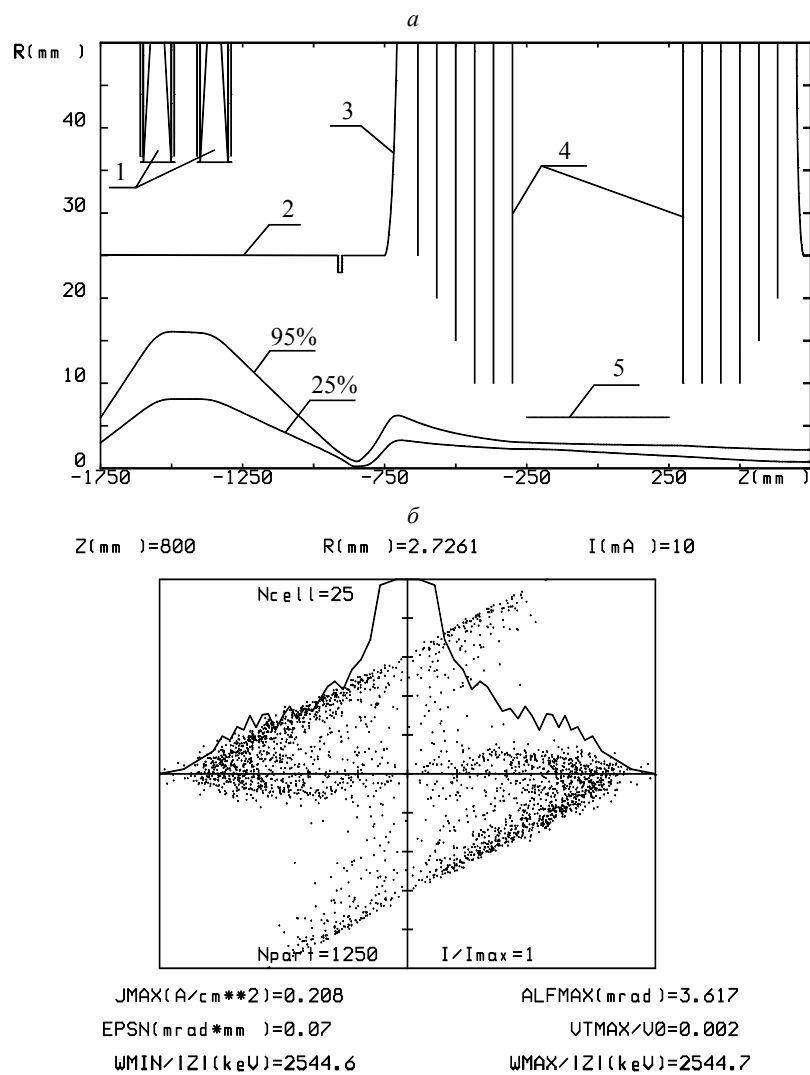


Рис. 13. Результаты расчета ионно-оптического тракта ускорителя-тандема для схемы «жесткой» фокусировки пучка H с током 10 мА и начальной энергией 25 кэВ: *a* – огибающие 25 % и 95 % тока пучка; *b* – радиальное распределение плотности тока и фазовый портрет пучка на выходе из ускорителя. Цифрами обозначены: 1 – магнитные линзы, 2 – контур трубки дрейфа, 3 – вакуумный бак, 4 – высоковольтный электрод, 5 – перезарядная трубка.

Сравнение Рис. 11,а и 13,а показывает, что диаметры пучка в перезарядной трубке и на выходе ускорителя имеют почти одинаковые значения для разных схем фокусировки. В то же время, как показывает сравнение Рис. 11,б и 13,б, схема с «жесткой» фокусировкой приводит к заметному увеличению нормализованного г.т.с. эмиттанса пучка на выходе из ускорителя (примерно в 2,5 раза по сравнению с начальным тепловым г.т.с. эмиттансом пучка, равным 0,028 п.мм мрад). Более детальный анализ динамики пучка показывает, что основное увеличение эмиттанса происходит на входе пучка в ускоритель за счет нелинейности сил объемного заряда, сильно влияющих на динамику пучка вследствие его малого входного радиуса. Причем знак сильных нелинейных эффектов, вызванных действием сил объемного заряда, совпадает со знаком слабых нелинейных эффектов, возникающих в магнитных линзах.

Схема же с «мягкой» фокусировкой позволяет провести и ускорить пучок ионов без сколько-нибудь заметного увеличения его эмиттанса, при этом взаимно компенсируются слабые нелинейные эффекты, возникающие в магнитных линзах и вызванные действием сил объемного заряда.

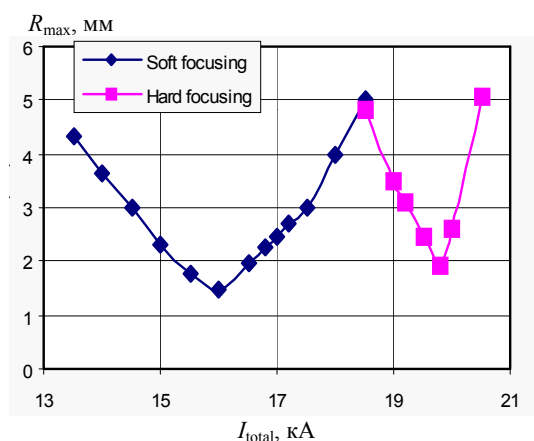


Рис. 14. Расчетная зависимость максимального радиуса огибающей 95% тока пучка  $H^+$  в перезарядной трубке от полного тока во второй магнитной линзе для схем «мягкой» и «жесткой» фокусировки пучка

На Рис. 14 для рассчитанных выше схем с «мягкой» и «жесткой» фокусировкой пучка приведены кривые зависимости от полного тока во второй магнитной линзе максимального радиуса огибающей 95% тока пучка ионов в перезарядной трубке. Отметим, что при минимальном радиусе в перезарядной трубке пучок имеет неоптимальный радиус и угол разлета на выходе из ускорителя. Тем не менее, видно, что «мягкая» фокусировка позволяет получить пучок меньшего радиуса при меньшем токе в линзе. Кроме того, эта схема позволяет проводить пучок через перезарядную трубку в гораздо более широком диапазоне значений полного тока во второй линзе, чем «жесткая» фокусировка. Это облегчает настройку ионно-оптического тракта и снижает требования к стабилизации тока в линзе.



### **Заключение**

В данной работе методом численного моделирования рассмотрен ионно-оптический тракт электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на энергию протонов до 2,5 МэВ и током до 40 мА.

Подробно рассмотрены два способа транспортировки стационарного интенсивного пучка отрицательных ионов водорода от источника до ускорителя: с помощью аксиально-симметричных электростатических и магнитных линз. Для реализации, несмотря на значительное энергопотребление, рекомендовано использование магнитных линз, позволяющих транспортировать полностью скомпенсированный пучок отрицательных ионов водорода и имеющих возможность подбора положения без изменения конструкции канала.

Рассмотрены две схемы согласованного ввода 25 кэВ пучка отрицательных ионов водорода в ускоритель-тандем: «жесткая» и «мягкая» фокусировка пучка электрическим полем ускорителя. Поскольку каждая из схем имеет свои достоинства и недостатки, а отличия в геометриях ионно-оптического тракта для обеих схем незначительны, рекомендовано решение, обеспечивающее возможность экспериментально проверить как «жесткую», так и «мягкую» фокусировку пучка.

В итоге разработаны две конструкции ионно-оптического тракта ускорителя-тандема для пучка  $H^-$  с током 10 мА и начальной энергией 25 кэВ с «мягкой» и «жесткой» фокусировкой пучка.

Авторы выражают благодарность Ю. И. Бельченко, Г. И. Димову и В. В. Широкову за предоставленную информацию и полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант МНТЦ № 1484).

### Литература

- [1] B. Bayanov, V. Belov, E. Bender, M. Bokhovko, G. Dimov, V. Kononov, O. Kononov, N. Kuksanov, V. Palchikov, V. Pivovarov, R. Salimov, G. Silvestrov, A. Skrinsky, and S. Taskaev. Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **413/2-3** (1998) 397-426.
- [2] Y. Belchenko, G. Derevyankin, G. Dimov, A. Dranichnikov, G. Kraynov, A. Krivenko, N. Kuksanov, V. Palchikov, M. Petrichenkov, V. Prudnikov, R. Salimov, V. Savkin, V. Shirokov, G. Silvestrov, I. Sorokin, S. Taskaev and M. Tiunov. Status of high-current electrostatic accelerator-tandem for the neutron therapy facility. APAC'01 Second Asian Particle Accelerator Conference. September 17-21, 2001, Beijing, China, p. 849-851.
- [3] Y. Belchenko and E. Grigoryev. Surface-plasma negative ion source for the medicine accelerator. Rev. Sci. Instr. **73** (2002) 939.
- [4] G. Dimov. Tandem surface-plasma source: A new concept for a dc negative ion source. Rev. Sci. Instr. **73** (2002) 970-972.
- [5] Г. Е. Деревянкин, Г. И. Димов, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г. С. Крайнов, А. С. Кривенко, В. Е. Пальчиков, М. В. Петриченков, Е. И. Похлебенин, Р. А. Салимов, Г. И. Сильвестров, С. Ю. Таскаев, В. В. Широков. Перезарядная мишень 40 мА 2 МэВ ускорителя-гандема. Препринт ИЯФ 2001-23, Новосибирск, 2001.
- [6] M. Tiunov, G. Kuznetsov and M. Batazova. Simulation of high current electron and ion beam dynamics for EBIS. AIP Conference Proceedings 572 Electron Beam Ion Sources and Traps and their Applications, Upton, New York (2000) 155-164.
- [7] M. Tiunov. BEAM – 2D-code package for simulation of high perveance beam dynamics in long systems. Proceedings of the International Symposium Space Charge Effects in Formation of Intense Low Energy Beams, Dubna, JINR (1999) 202-208.
- [8] B. Fomel, M. Tiunov, V. Yakovlev. SAM – an interactive code for evaluation of electron guns. Preprint BudkerINP 96-11, 1996.