Научная статья

УДК 539.1.076
DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-20-27

Последовательное моделирование динамики ионов Н-минус от источника до выхода из RFQ с поворотом пучка*

Юрий Александрович Буданов[1], Владимир Алексеевич Калинин[2]
Борис Александрович Фролов[3]

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
Протвино, Россия

[1]budanov@ihep.ru
[2] vakalinin@ihep.ru
[3] bfrolov.ihep@list.ru

Аннотация

Проведено сквозное моделирование динамики пучка в системе вытягивания, транспортировки пучка и первой секции ускорителя (RFQ). Предложенная методика моделирования динамики ионов от источника до выхода из RFQ позволила оперативно и эффективно менять параметры системы согласования в зависимости от конечных результатов прохождения пучка в RFQ. Разработана и оптимизирована система согласования пучка отрицательных ионов водорода, которая позволяет осуществить поворот пучка для блокировки распространения цезия в канал ускорителя и осуществить согласование пучка с RFQ. В результате оптимизации канала согласования удается получить рост эмиттанса в RFQ не более 25 % для 90 % доли пучка, при этом захват частиц пучка в режим ускорения составляет 98 % инжектируемого пучка. Увеличенные дрейфы в системе согласования оставляют достаточно пространства для размещения диагностической аппаратуры, вакуумной системы и системы корректировки пучка. Установлена зависимость динамики пучка в RFQ от распределения заряда по сечению пучка на выходе канала согласования.

Ключевые слова

моделирование динамики ионов, согласование, эмиттанс, ускоритель

Для цитирования

Буданов Ю. А., Калинин В. А., Фролов Б. А. Последовательное моделирование динамики ионов Н-минус от источника до выхода из RFQ с поворотом пучка // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 20–27. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-20-27

* Статья написана по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Буданов Ю. А., Калинин В. А., Фролов Б. А., 2023

Sequential Computer Simulation of H-minus Ion Dynamics from Source to RFQ Exit with Beam Rotation

Yury A. Budanov[1], Vladimir A. Kalinin[2]
Boris A. Frolov[3]

NRC «Kurchatov Institute» – IHEP
Protvino, Russian Federation

[1]budanov@ihep.ru
[2]vakalinin@ihep.ru
[3]bfrolov.ihep@list.ru

Abstract

An end-to-end simulation of the beam dynamics in the system of extraction, beam transportation and the first section of the accelerator (RFQ) is carried out. The proposed method of modeling the dynamics of ions from the source to the exit from the RFQ made it possible to quickly and efficiently change the parameters of the matching system depending on the final results of the beam passing into the RFQ. A system for matching a beam of negative hydrogen ions has been developed and optimized, which makes it possible to rotate the beam to block the propagation of cesium into the accelerator channel and to match the beam with RFQ. As a result of optimization of the matching channel, it is possible to obtain an emittance increase in RFQ of no more than 25 % for 90 % of the beam fraction, while the capture of beam particles in the acceleration mode is 98 % of the injected beam. The increased drifts in the matching system leave enough space for the placement of diagnostic equipment, a vacuum system and a beam correction system. The dependence of the beam dynamics in the RFQ on the charge distribution over the beam cross section at the output of the matching channel is established.

Keywords

ion dynamics simulation, matching, emittance, accelerator

For citation

Budanov Y. A., Kalinin V. A., Frolov B. A. Sequential Computer Simulation of H-minus Ion Dynamics from Source to RFQ Exit with Beam Rotation. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 20–27 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-20-27

Введение

Разработка системы согласования пучка отрицательных ионов водорода с ускорителем ионов является важной частью работ по разработке всего инжекционного комплекса. Одним из основных критериев отбора оптимальных вариантов согласующей системы является анализ результатов компьютерного моделирования динамики пучка ионов в системе: источник – согласующий канал – начальная часть ускорителя. Таким образом, в предлагаемом варианте разработка системы согласования должна идти одновременно с моделированием динамики.

На начальном этапе моделирование проводилось в системе без поворота пучка (поворот необходим для предотвращения возможного попадания цезия из источника в канал ускорителя). Такое приближение позволяет оценить возможности применения поворота пучка и изменения других параметров системы согласования, неизбежно приводящих к увеличению эмиттанса пучка.

1. Моделирование системы без поворота пучка

В качестве источника ионов Н-минус был выбран поверхностно-плазменный источник с газоразрядной камерой пеннинговского типа. 3D-моделирование и оптимизация ионно-оптической системы (ИОС) источника проводились ранее с помощью пакета программ IBSimu для тока вытягиваемых ионов Н-минус 50 mA [1]. На рис. 1 представлен фазовый портрет пучка ионов Н- с энергией 100 кэВ на выходе ионного источника. При расчете канала согласования

конечной целью было достижение требуемых Твисс-параметров (α = 2,3, β = 0,14 mm/mrad) и минимизация роста эмиттанса на входе в RFQ (первая секция ускоряющего канала).

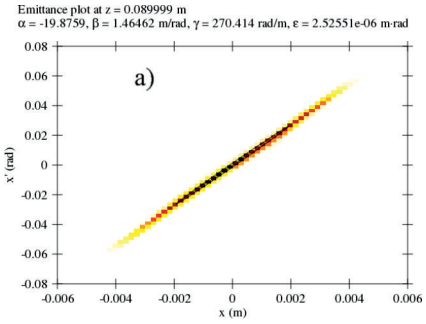

Рис. 1. Расчетный фазовый портрет пучка на выходе ионного источника
Fig. 1. Computed phase portrait at the ion source exit

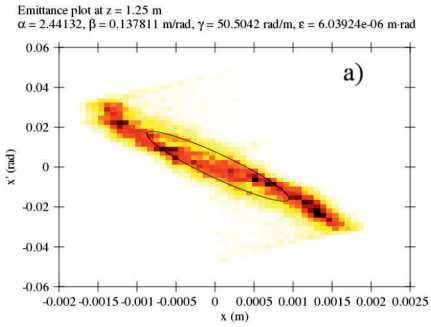

Рис. 2. Расчетный фазовый портрет пучка на выходе канала согласования
Fig. 2. Computed phase portrait at the matching channel exit

Согласующий канал состоит из двух соленоидов. На рис. 2 приведен пучок ионов H-минус на выходе канала согласования. Длина каждого соленоида с железным экраном 0,255 m, радиус апертуры 0,06 m, расстояние между ними 0,47 m выбрано для размещения вакуумного оборудования и диагностического устройства. Общая длина канала согласования 1,25 m. В результате оптимизации для получения на выходе LEBT пучка с требуемыми Твисс-параметрами величина магнитного поля первого соленоида составила 0,524 T, второго – 0,496 T. Пучок в согласующем канале показан на рис. 3.

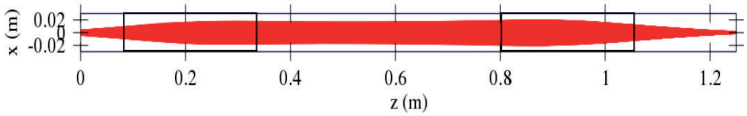

Рис. 3. Пучок в канале согласования
Fig. 3. The beam in the matching channel

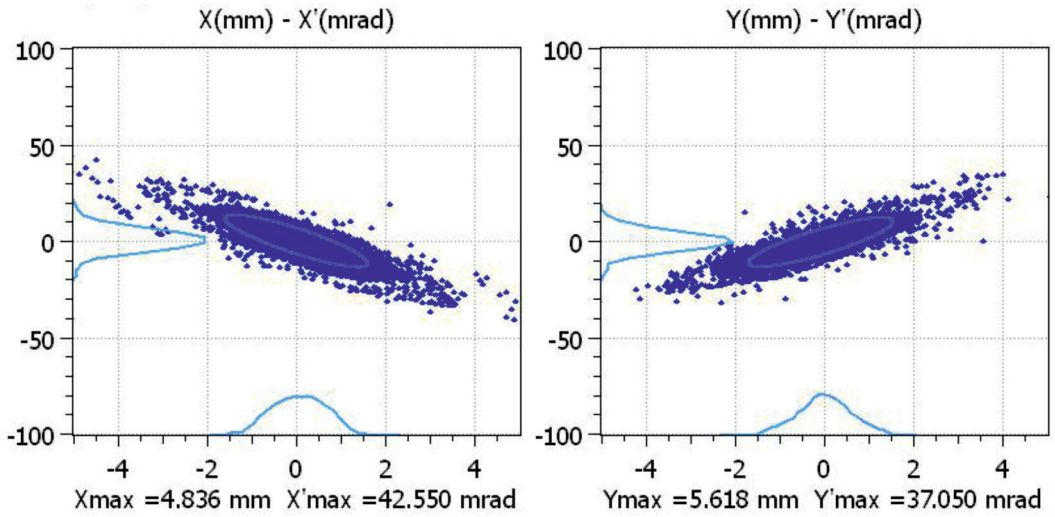

Рис. 4. Фазовый портрет пучка на выходе RFQ
Fig. 4. Phase portrait of the beam at the RFQ exit

При дальнейшем моделировании этот пучок является входным для RFQ [2]. Формат пучка преобразуется разработанной программой к формату данных пучка для моделирования динамики в RFQ. На рис. 4 представлен фазовый портрет пучка отрицательных ионов водорода на выходе RFQ. Захват пучка в режим ускорения при токе I = 50 mA составляет k = 0,98. В табл. 1 представлены параметры пучка при ускорении в RFQ.

Таблица 1

Изменение параметров эмиттанса пучка при ускорении в RFQ

Table 1

Beam emittance parameters in RFQ

Параметры эмиттанса на входе в RFQ (I = 50 mA)	**Параметры эмиттанса на выходе из RFQ (I = 50 mA)**
X-X′	X-X′
Emit [rms] = 0,0882 Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [rms] = 0,1451 Pi.mm.mrad [Norm.]
Emit [90,00 %] = 0,297 Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [90,00 %] = 0,667 Pi.mm.mrad [Norm.]
Beta = 0,1407 mm/Pi.mrad	Beta = 0,2363 mm/Pi.mrad
Alpha = 2,4873	Alpha = 1,7300
Y-Y′	Y-Y′
Emit [rms] = 0,0927 Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [rms] = 0,1429 Pi.mm.mrad [Norm.]
Emit [90,00%] = 0,3192Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [90,00%] = 0,6747 Pi.mm.mrad [Norm.]
Beta = 0,1421 mm/Pi.mrad	Beta = 0,2401 mm/Pi.mrad
Alpha = 2,4191	Alpha = –1,5989
Beta = 0,014529854 Gamma = 1,00010557	Beta = 0,061264560 Gamma = 1,001881973

Нормализованный эмиттанс 90 % пучка на выходе RFQ не превосходит 0,67 $\pi \cdot$ мм $\cdot$ мрад, что на порядок меньше аксептанса RFQ. Таким образом, представляется возможным исследовать варианты системы согласования с поворотом пучка и с увеличением дрейфов в системе для размещения диагностического оборудования и системы корректоров положения пучка.

2. Моделирование системы с поворотом пучка

На следующем этапе работ в расчеты был включен поворот пучка, для этого случая схема системы согласования изображена на рис. 5. На схеме канала согласования IS – ионный источник, S1 и S2 – соленоиды, M – поворотный магнит, D1–D4 – дрейфы, RFQ – начальная часть ускорителя. Компьютерное моделирование данной системы проводилось с использованием пакета программ PathManager для согласующего канала.

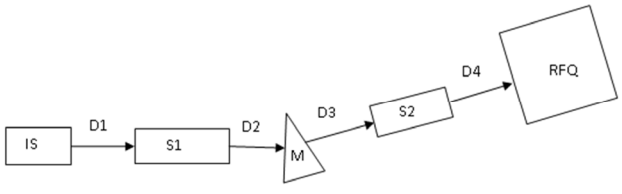

Рис. 5. Схема канала согласования
Fig. 5. The scheme of matching channel

Критерием выбора оптимальных параметров согласующего канала было получение на входе в RFQ заданной конфигурации пучка (определяемой параметрами Твисса) и минимизация

роста эмиттанса в канале согласования. При таком подходе наиболее приемлемые результаты были получены при угле поворота пучка на 10 градусов и длине дрейфа D4 = 0,35 м. В настоящей работе показано, что на захват пучка в режим ускорения и минимальный рост эмиттанса в RFQ существенное влияние оказывает распределение заряда по сечению пучка на выходе согласующего канала. Как показали расчеты, минимальный эмиттанс на выходе RFQ достигается при Твисс-параметрах отличных от требуемых оптимальных на входе (α = 2,3, β = 0,14 m/rad). В результате угол поворота пучка удалось увеличить до 15 градусов, оставляя достаточное пространство между соленоидами (для размещения поворотного магнита и диагностического оборудования) и между последним соленоидом и RFQ (для размещения системы корректоров положения пучка). Следует отметить, что все вычисления проводились с учетом пространственного заряда. Это обстоятельство существенно усложняло задачу согласования, так как на процесс динамики в RFQ оказывали влияние не только параметры Твисса во входном в RFQ пучке, но и сама форма распределения заряда. В табл. 2 отражены три (количество рассмотренных вариантов существенно больше) характерных возможных выбора параметров системы согласования (для магнитных элементов длина в миллиметрах и индукция в Тесла), Твисс-параметры α и β, нормализованные среднеквадратичные эмиттансы на выходе системы согласования (вход в RFQ) и на выходе RFQ.

Таблица 2

Параметры согласующего канала на выходе канала (LEBT) и на выходе RFQ

Table 2

Matching channel parameters at the exit of LEBT and RFQ exit

Параметр	**Вариант 1**	**Вариант 2**	**Вариант 3**
Угол поворота	10°	10°	15°
D1[mm]	70	70	70
S1[mm], B [T]	300, 0,300	300, 0,535	300, 0,530
D2[mm]	100	100	100
M[mm], B [T]	170, 0,05	170, 0,05	170, 0,071
D3[mm]	400	400	400
S2[mm], B[T]	300, 0,41	300, 0,40	300, 0,41
D4[mm]	350	400	400
LEBT (выход)			
Emit[π.mm.mrad]	0,21	0,20	0,22
α β [mm/π.mrad]	2,18 0,175	1,86 0,30	1,04 0,10
Emit[π.mm.mrad]	0,21	0,20	0,22
RFQ (выход)			
Emit[π.mm.mrad]	0,22	0,42	0,22

Для угла поворота 15° rms эмиттанс пучка (табл. 3) на выходе RFQ практически не отличаются от эмиттанса при повороте на угол 10°. Чтобы понять данный результат, следует посмотреть на распределение заряда по сечению пучка, которое получается на входе в RFQ. На рис. 6–8 представлено распределение заряда соответственно для вариантов 1–3 из табл. 2.

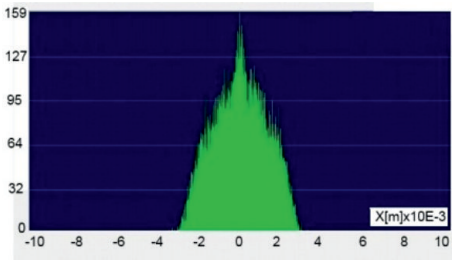

Рис. 6. Распределение заряда пучка в плоскости *x*, вариант 1
Fig. 6. Beam charge distribution in the *x* plane, option 1

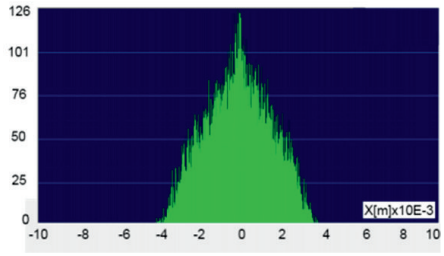

Рис. 7. Распределение заряда пучка в плоскости *x*, вариант 2
Fig. 7. Beam charge distribution in the *x* plane, option 2

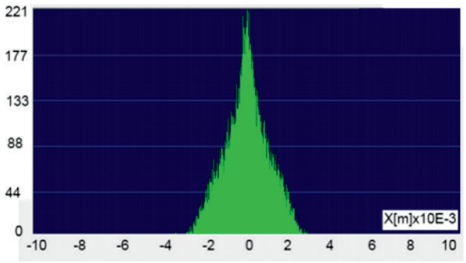

Рис. 8. Распределение заряда пучка в плоскости *x*, вариант 3
Fig. 8. Beam charge distribution in the *x* plane, option 3

Отклонение δ параметров Твисса (α, β) от целевых значений (α_0, β_0)

$$\delta = \left(\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0}\right)^2 + \left(\frac{\beta_0 - \beta}{\beta_0}\right)^2 -$$

наибольшее для варианта 3 среди результатов табл. 2, однако именно при этих значениях элементов транспортного канала наиболее оптимальны результаты по углу отклонения пучка, максимальный дрейф после соленоидов и минимальный рост эмиттанса в RFQ. На рис. 8 распределение заряда существенно отличается от приведенных на рис. 6, 7 увеличенной плотности заряда в центре пучка. Вариант 3 принят как основной для дальнейшей разработки.

Моделирование динамики пучка в RFQ при токе на входе I = 50 mA и повороте в согласующем канале на 15° приводит к результатам, представленным на рис. 9, 10 и в табл. 3.

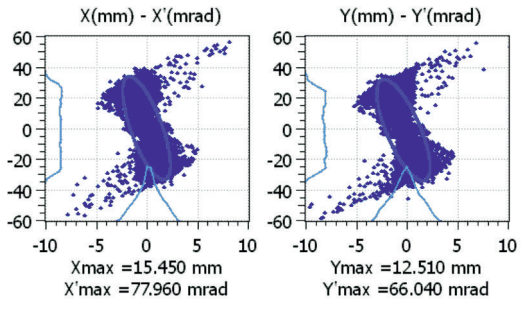

Рис. 9. Фазовый портрет на выходе согласующего канала
Fig. 9. Phase portrait at the matching channel exit

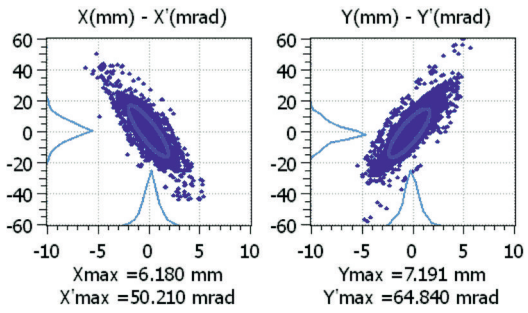

Рис. 10. Фазовый портрет на выходе RFQ
Fig. 10. Phase portrait at the RFQ exit

Таблица 3

Параметры эмиттанса пучка в RFQ при согласовании с отклонением пучка

Table 3

Beam emittance parameters in RFQ when matched with beam deflection

Параметры эмиттанса на входе в RFQ	**Параметры эмиттанса на выходе из RFQ**
X-X′	X-X′
Emit [rms] = 0,2180 Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [rms] = 0,2200 Pi.mm.mrad [Norm.]
Emit [90,00 %] = 0,8000 Pi.mm.mrad [Norm]	Emit [90,00%] = 1,0152 Pi.mm.mrad [Norm]
Beta = 0,1008 mm/Pi.mrad	Beta = 0,2347 mm/Pi.mrad
Alpha = 1,0350	Alpha = 1,7124
Y-Y′	Y-Y′
Emit [rms] = 0,2320 Pi.mm.mrad [Norm.]	Emit [rms] = 0,2469 Pi.mm.mrad [Norm.]
Emit [90,00 %] = 0,8615 Pi.mm.mrad [Norm]	Emit [90,00 %] = 1,0888 Pi.mm.mrad [Norm]
Beta = 0,1165 mm/Pi.mrad	Beta = 0,2311 mm/Pi.mrad
Alpha = 1,0702	Alpha = –1,4974
Beta = 0,014522849 Gamma = 1,00010547	Beta = 0,061308270 Gamma = 1,001884667

Выводы

Таким образом, разработана система согласования пучка отрицательных ионов водорода, которая позволяет осуществить поворот пучка для блокировки распространения цезия в канал ускорителя и при этом осуществить хорошее согласование пучка с первой секцией ускорителя. Подробные результаты согласования представлены в табл. 3 и показывают, в частности, рост эмиттанса в RFQ не более 25 % для 90 % доли пучка, при этом захват частиц пучка в режим ускорения составляет 98 % инжектируемого пучка. Увеличенные дрейфы в системе согласования оставляют достаточно пространства для размещения диагностической аппаратуры и подключения вакуумной и корректирующий пучок систем.

Список литературы

1. **Кленов В. С., Фролов Б. А.** Численное моделирование ионно-оптических систем вытягивания, ускорения и согласования с радиочастотным квадрупольным ускорителем для пучка отрицательных ионов водорода // ЖТФ. 2018. Т. 88, вып. 5. С. 649–654.
2. **Budanov Yu. A. et al.** RFQ Drift-Tube Proton Linacs in IHEP // Proc. 22th Linear Accelerator Conf. (LINAC’04). Lubeck, Germany, Aug. 2004. Paper TUP01. P. 285–287.

References

1. **Klenov V. S., Frolov B. A.** Numerical modeling of ion-optical systems of stretching, acceleration and matching with a radio-frequency quadrupole gas pedal for a beam of negative hydrogen ions. *Technical Physics Journal*, 2018, vol. 88, no. 5, pp. 649–654. (in Russ.)
2. **Budanov Yu. A. et al.** RFQ Drift-Tube Proton Linacs in IHEP. In *Proc. 22th Linear Accelerator Conf. (LINAC’04)*. Lubeck, Germany, Aug. 2004, paper TUP01, pp. 285–287.

Информация об авторах

Юрий Александрович Буданов, доктор физико-математических наук, начальник ускорительного комплекса

Владимир Алексеевич Калинин, заместитель начальника отделения ускорительного комплекса

Борис Александрович Фролов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Information about the Authors

Yury A. Budanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory

VladimirA. Kalinin, Deputy Chief of the Accelerator Complex Department

Boris A. Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

Статья поступила в редакцию 10.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 24.11.2023

The article was submitted 10.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 24.11.2023