

ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ $^{197}\text{Au}^{32+}$ И $^{197}\text{Au}^{79+}$ В ИНЖЕКЦИОННОЙ ЦЕПОЧКЕ КОЛЛАЙДЕРА NICA

А. В. Елисеев, И. Н. Мешков, В. А. Михайлов, А. О. Сидорин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Основной целью разрабатываемого в ОИЯИ проекта NICA является проведение экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов в области энергий 1–4,5 ГэВ/нуклон со светимостью уровня $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В данной статье на примере ионов золота рассматривается режим работы инжекционной цепочки коллайдера, предусматривающий получение на выходе нуклотрона сгустка с параметрами, требуемыми для экспериментов.

General goal of the NICA project being constructed is to provide collisions of heavy ion beams in the energy range from 1 to 4.5 GeV/u at the luminosity level of $1 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. On example of gold ions the formation of the bunch in the collider injection chain at parameters required for the experiments is described in this article.

PACS: 29.20.-c; 29.25.Ni

ВВЕДЕНИЕ

Достижение проектной светимости коллайдера NICA [1] при столкновениях тяжелых ионов планируется за счет накопления в каждом из колец пучка с интенсивностью до $1,7 \cdot 10^{10}$ частиц, сгруппированного в 17 сгустков. Среднеквадратичная длина сгустка должна составлять 0,3 м, среднеквадратичный относительный разброс по импульсу около 0,001, поперечный эмиттанс ограничен снизу эффектами пространственного заряда и его необходимо регулировать в зависимости от энергии пучка (табл. 1). В проекте NICA рассматриваются два альтернативных метода заполнения колец коллайдера ионами. В соответствии с первым из них первоначально в каждом из колец накапливается распущенный пучок требуемой интенсивности, а затем производится его группировка и сжатие сгустков до требуемой длины. При реализации второго метода сгусток с параметрами, требуемыми при столкновениях, подготавливается инжекционной цепочкой и переводится в соответствующую сепаратрису одного из колец коллайдера, работающих со включенной ВЧ-системой. Кольца коллайдера заполняются сгустком за сгустком до требуемого количества сгустков. В этом варианте все сложности по подготовке сгустка с требуемыми параметрами ложатся на инжекционную цепочку, состоящую из вновь создаваемых тяжелоионного линейного ускорителя и бустерного синхротрона (бустера) и модернизированного синхротрона нуклотрон. В данной статье рассмотрена динамика продольного движения ионов в бустере и нуклотроне при реализации второго метода, как наиболее сложного с технической точки зрения.

Таблица 1. Характеристики пучка при инжекции в бустер и перед его переводом в коллайдер (приведены среднеквадратичные параметры сгустков)

Характеристики пучка	При инжекции в бустер	На выходе нуклотрона	
Сорт ионов	$^{197}\text{Au}^{32+}$	$^{197}\text{Au}^{79+}$	
Количество ионов	$2 \cdot 10^9$	$1,0-1,5 \cdot 10^9$	
Кинетическая энергия частиц, ГэВ/нуклон	0,0062	1	4,5
Относительный разброс по импульсу	0,00025	0,001	0,0008
Длина сгустка, м	60	0,3	0,3
Продольный эмиттанс пучка (нормализованный), эВ · с	3,6	1,0	2,4
Поперечный эмиттанс пучка (нормализованный), $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	5,5	7,0	1,2

Параметры и режимы работы ускоряющих ВЧ-систем бустера и нуклотрона оптимизировались путем численного моделирования динамики продольного движения с помощью компьютерной программы ESME [2]. В расчетах предполагалось, что после 1–2 однооборотных инжекций из линейного ускорителя, произведенных при постоянном магнитном поле, в бустере циркулирует распущенный пучок, занимающий весь его периметр — 212,2 м. Дальнейшие преобразования параметров пучка в процессе формирования сгустка можно разбить на следующие основные этапы:

- адиабатический захват на четвертой гармонике частоты обращения, обеспечивающий согласование эмиттанса пучка с продольным аксептансом бустера и минимизацию потерь частиц при переходе от циркуляции к ускорению;
- ускорение до энергии электронного охлаждения, равной 100 МэВ/нуклон;
- охлаждение пучка до необходимых значений продольного и поперечного эмиттансов;
- ускорение на первой гармонике частоты обращения до энергии 600 МэВ/нуклон;
- обдирка ионов и перевод в нуклотрон;
- ускорение до энергии эксперимента от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон;
- компрессия сгустка и его перевод в коллайдер.

Единственная возможность активного формирования фазового объема пучка в инжекционной цепочке заключается в использовании системы электронного охлаждения в бустере. Соответственно, при охлаждении учитывается последующее увеличение эмиттанса из-за ошибок согласования ВЧ-систем при переводе из одного ускорителя в другой, разного рода нестабильностей в процессе ускорения и — неизбежная причина роста фазового объема — взаимодействие пучка с перезарядной мишенью в канале транспортировки между бустером и нуклотроном.

Получению короткого сгустка способствует его адиабатическое сжатие в процессе ускорения, поскольку при сохранении продольного эмиттанса неизменным фазовая протяженность сгустка уменьшается как $|\eta/\gamma|^{1/4}$, где γ — релятивистский фактор, а $\eta = \gamma^{-2} - \gamma_{\text{кр}}^{-2}$ — слип-фактор. В результате при неизменном ВЧ-напряжении при ускорении

в бустере от энергии охлаждения до перевода в нуклотрон сгусток адиабатически сжимается в 1,36 раза; при ускорении в нуклотроне до 1 ГэВ/нуклон — в 1,2 раза и в 3,0 раза при ускорении до 4,5 ГэВ/нуклон.

1. ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В БУСТЕРЕ

Оптимальный режим работы инжекционной цепочки соответствует темпу роста поля в бустере, равному 1 Тл/с. Критическая энергия бустера составляет 3,8 ГэВ/нуклон [3]. Ускорительный цикл формируется согласованным изменением во времени двух характеристик: магнитного поля $B(t)$ — главной переменной и амплитуды ВЧ-напряжения на ускорительных станциях $V(t)$ — зависимой переменной, при этом закон связи между магнитным полем и амплитудой напряжения варьируется в зависимости от поставленной цели. Связь амплитуды ускоряющего напряжения с изменением магнитного поля выражается $V \sin \phi_s = 2\pi R \frac{d(B\rho)}{dt}$, где ϕ_s — синхронная фаза, R — средний радиус орбиты, $B\rho$ — магнитная жесткость. Основной набор энергии в бустере осуществляется при линейном росте магнитного поля. Значение синхронной фазы выбрано равным 30° , что, с одной стороны, обеспечивает зону устойчивого движения частиц протяженностью $\sim 1/2$ периметра ускорителя, а с другой — соответствует технически реализуемой амплитуде напряжения ВЧ-станций, равной 7 кВ. Частота обращения частиц в бустере при изменении энергии с 6,2 до 600 МэВ/нуклон увеличивается в девять раз. Для уменьшения диапазона перестройки генератора был выбран следующий режим работы ВЧ-системы бустера: ускорение до энергии электронного охлаждения происходит на четвертой гармонике частоты обращения частиц, а после охлаждения пучок группируется и ускоряется на первой гармонике. В результате изменение частоты происходит в пределах от 634 до 2400 кГц.

После инжекции в бустер пучок с продольным эмиттансом $3,6 \text{ эВ} \cdot \text{с}$ занимает весь периметр ускорителя. Согласование эмиттанса пучка с аксептансом ускорителя может быть осуществлено ускоряющей ВЧ-системой с использованием методики адиабатического захвата (АЗ) [4]. Процесс захвата происходит при постоянной средней энергии частиц и состоит в медленном (адиабатическом) повышении амплитуды ВЧ-напряжения на «столе» магнитного поля. Начальное напряжение V_1 выбирается таким образом, чтобы соответствующая ему площадь продольного аксептанса A_1 была намного меньше начального эмиттанса пучка. Коэффициент адиабатичности α_c для процесса захвата определяется следующим образом:

$$\frac{dA}{A} = \alpha_c \frac{dt}{T_s}, \quad (1)$$

где T_s — период синхротронных колебаний. Коэффициент α_c при осуществлении захвата можно поддерживать постоянным (изоадиабатический закон увеличения V). Закон изменения ускоряющего напряжения в таком случае принимает вид

$$V(t) = \frac{V_2}{\left[\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} - \frac{\alpha_c}{T_s} t \right]^2}. \quad (2)$$

Для выполнения условия адиабатичности коэффициент α_c должен быть много меньше единицы. Однако чем меньше значение коэффициента, тем дольше длится захват. Основным механизмом потерь ионов в бустере является изменение их зарядового состояния при взаимодействии с остаточным газом. Сечение этого процесса максимально при энергии инжекции, поэтому необходимо обеспечить минимально возможную длительность начального участка ускорения. Поэтому параметры, определяющие режим АЗ, выбирались таким образом, чтобы:

- эффективность захвата была близка к 100 %;
- продолжительность захвата была минимальна;
- увеличение продольного эмиттанса в процессе захвата было минимальным.

В качестве примера на рис. 1 показаны результаты численного моделирования движения частиц при $\alpha_c = 0,21$, начальная амплитуда ВЧ-напряжения составляет 100 В, конечная — 1,5 кВ. При длительности захвата 25 мс его эффективность с точностью расчета составляет 100 %, рост продольного эмиттанса не превышает 5 %.

Для сохранения продольного эмиттанса переход со «стола инжекции» к линейному росту поля должен быть достаточно медленным (адиабатичным). Период синхронных колебаний в конце АЗ равен 2,5 мс, следовательно, длительность перехода не может быть меньше чем ~ 10 мс. Для простоты при моделировании всех переходных режимов (как в бустере, так и в нуклотроне) было выбрано параболическое изменение магнитного поля ($B \sim t^2$). При переходе к растущему полю форма сепаратрисы меняется при смещении равновесной фазы в соответствии с dB/dt . Поддержание в процессе переходного периода площади продольного аксептанса (за счет соответствующего изменения амплитуды ВЧ) постоянной при хорошей адиабатичности процесса позволяет избежать потерь частиц. Моделирование показывает, что линейное изменение амплитуды ВЧ-напряжения с 1,5 до 7 кВ при длительности перехода 40 мс позволяет осуществить переход к ускорению без потерь. В дальнейшем ускорение до энергии электронного охлаждения осуществляется при постоянном темпе роста поля 1 Тл/с и при постоянной амплитуде ВЧ-напряжения, равной 7 кВ. Переход на «стол» поля для электронного охлаждения осуществляется также за 40 мс, после его завершения длина каждого сгустка составляет примерно 4,1 м при относительном разбросе по импульсу $2,4 \cdot 10^{-4}$.

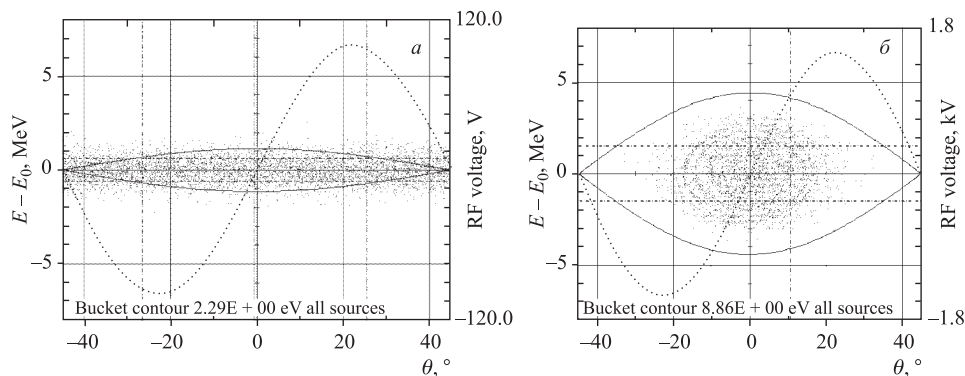


Рис. 1. Распределение частиц в фазовой плоскости продольного движения до и после АЗ

Затем пучок распускается за счет медленного снижения амплитуды ВЧ-напряжения, в течение 1 с осуществляется его электронное охлаждение. По завершении формирования требуемой величины поперечного эмиттанса и уменьшения продольного эмиттанса пучка до $\sim 2,0$ эВ·с производится его группировка на первой гармонике частоты обращения. В дальнейшем за 40 мс осуществляется переход со «стола» электронного охлаждения к линейно растущему магнитному полю с темпом роста $dB/dt = 1$ Тл/с. Аналогичным образом, ускоренный до 600 МэВ/нуклон пучок переводится на плато магнитного поля для его перевода в нуклотрон. На протяжении всего этого периода амплитуда ВЧ-напряжения постоянна и равна 7 кВ.

2. ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В НУКЛОТРОНЕ

Перед инжекцией в нуклотрон пучок проходит через станцию обдирки, расположенную в канале транспортировки из бустера. Эффективность обдирки ионов золота с зарядового состояния 32^+ до 79^+ на максимальной энергии бустера составляет не менее 80%. Взаимодействие ионов с мишенью ведет к увеличению, главным образом, продольного эмиттанса пучка, что связано с флуктуацией ионизационных потерь энергии и неоднородностью толщины мишени. При использовании силиконовой фольги с неоднородностью толщины менее 0,5% рост продольного эмиттанса составит $\sim 0,5$ эВ·с [5]. Наиболее сложные условия по согласованию продольного движения соответствуют переводу сгустка в нуклотрон со «стола» магнитного поля бустера в растущее магнитное поле нуклотрона. Ситуация принципиально не изменится, если синхронизация двух ускорителей по фазе и частоте потребует осуществления перевода пучка со «стола» на «стол». При этом продольное движение частиц в нуклотроне будет происходить в более «комфортных» условиях. Максимальная амплитуда ВЧ-напряжения, достижимая при использовании существующих ВЧ-станций нуклотрона, составляет 10 кВ. Если перевод сгустка осуществляется при амплитуде напряжения 8,5 кВ, то площадь продольного акцептанса ускорителя в момент инжекции превышает эмиттанс пучка в 4,5 раза, поэтому фазовые траектории, начиная с момента инжекции, находятся в центре сепаратрисы, а само продольное движение близко к линейному. В дальнейшем, для сохранения постоянной площади сепаратрисы амплитуда напряжения варьируется в интервале 7–10 кВ (табл. 2). После достижения максимальной энергии, равной 4,5 ГэВ/нуклон, и выхода на «стол»

Таблица 2. Параметры ВЧ-системы при ускорении пучка в нуклотроне

Интервал энергий, МэВ/нуклон	600–4500
Частота ВЧ, МГц	0,94–1,17
Номер гармоники	1
Продольный эмиттанс сгустка, эВ·с	< 3
Амплитуда ВЧ при захвате, кВ	8,5
Амплитуда ВЧ при росте поля, кВ	7–10
Темп роста магнитного поля, Тл/с	1
Время ускорения, с	1,6

поля длина сгустка составляет 3,4 м, относительный разброс по импульсу — $7 \cdot 10^{-5}$ при амплитуде напряжения, равной 200 В.

3. КОМПРЕССИЯ СГУСТКА

На «столе» перевода пучка из нуклотрона в коллайдер предполагается осуществить компрессию сгустка либо методом скачка амплитуды напряжения, либо методом скачка фазы. При компрессии сгустка методом скачка фазы можно обойтись существующими ВЧ-станциями нуклотрона. Однако из-за существенно нелинейного движения при этом происходит рост продольного эмиттansa примерно в 1,5 раза, что может быть недопустимо. Для компрессии сгустка скачком амплитуды напряжения предполагается разработать дополнительную «ударную» ВЧ-станцию с максимальной амплитудой до 100 кВ. Станция должна включаться на несколько миллисекунд.

Процесс компрессии заключается в медленном адиабатическом понижении напряжения на штатной ВЧ-станции нуклотрона до 200 В (которое осуществляется при выходе на «стол» поля) с последующим включением дополнительной ВЧ-станции. При работе на первой кратности частоты обращения сгусток будет находиться в центре сепаратрисы, а движение в фазовом пространстве при компрессии будет близко к линейному. В этом случае коэффициент сжатия сгустка $r = \sigma_1/\sigma_2 = \sqrt{V_2/V_1}$ зависит только от соотношения начального V_1 и конечного V_2 напряжений. На рис. 2 приведены результаты моделирования процесса сжатия сгустка при скачке напряжения до 70 кВ, при этом с точностью до точности расчета продольный эмиттанс сгустка сохраняется постоянным.

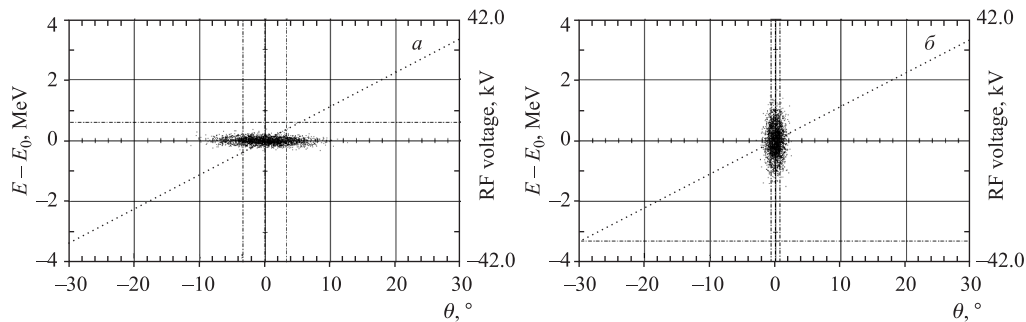


Рис. 2. Сгусток ионов Au^{79+} на фазовой плоскости до и после процедуры компрессии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании численного моделирования продольной динамики частиц в бустере и нуклотроне выбраны основные параметры ВЧ-систем, позволяющие получить на выходе нуклотрона сгусток ионов, подготовленный для столкновений в коллайдере NICA. Проектирование ускоряющей ВЧ-системы бустера проводится совместно с ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН. Для компрессии сгустка методом скачка напряжения потребуются разработка проекта и изготовление дополнительной «ударной» ВЧ-станции нуклотрона.

Экспериментальные исследования процесса адиабатического захвата планируется осуществить в ближайших сеансах нуклотрона, соответствующая аппаратура изготовлена и опробована [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sissakian A. N. for NICA Collab.* Nuclotron-Based Ion Collider Facility // Intern. Conf. LP'07, Daegu, Korea, Aug. 2007.
2. <http://www-ap.fnal.gov/ESME/>
3. *Агапов Н. Н. и др.* Бустерный синхротрон ускорительного комплекса NICA // Наст. вып. С. 723.
4. *Волков В. И. и др.* Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). Сообщ. ОИЯИ Р9-2003-154, Дубна, 2003.
5. *Montag C., Ahrens L., Thieberger P.* Tomographic Measurement of Longitudinal Emittance Growth Due to Stripping Foils // Proc. of 2005 Particle Accelerator Conf., Knoxville, Tennessee, 2005.
6. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.