

НАКОПЛЕНИЕ, ГРУППИРОВКА И ПАРАЗИТНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

*О. Бровка^а, А. Елисеев^а, О. Козлов^а, И. Мешков^а,
Н. Митянина^б, В. Петров^б, А. Сидорин^а, А. Смирнов^а,
Е. Сыресин^{а,1}, А. Трибендис^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

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

В работе обсуждается накопление ионов в коллайдере NICA с помощью ВЧ-барьеров. После накопления система ВЧ2 группирует пучок на 22-й гармонике. При адиабатическом увеличении ВЧ2-напряжения и охлаждении сгустка его продольный размер уменьшается до уровня, когда он помещается в сепаратрису 66-й гармонике. В это время осуществляется перезахват сгустка в сепаратрису 66-й гармонике ВЧ3-системы. При дальнейшем адиабатическом увеличении ВЧ3-напряжения и охлаждении формируются ионные сгустки с требуемыми для эксперимента параметрами. При накоплении и группировке ионных сгустков происходят их паразитные столкновения в области встречи.

The ion storage in collider NICA with RF buckets is discussed. After ion storage with RF buckets, the RF2 system provides the beam bunching on 22nd harmonic. At adiabatic increase of RF2 voltage and cooling, the bunch length is reduced to size where it is placed inside separatrix of RF3 system. The bunch rebunching in 66th harmonic separatrix is realized at this time. At further increase of RF3 voltage and cooling, the bunch length is reduced to a value of 0.6 m required for collision experiments. The parasitic collisions take place in collider interaction region at ion storage and bunching.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

ВЧ-система коллайдера [1, 2] должна обеспечивать накопление требуемого количества ионов с энергией 1–4,5 ГэВ/нуклон, формирование 22 ионных сгустков, а также параметры сгустка для достижения требуемой светимости $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Формирование пучка в коллайдере осуществляется с помощью трех различных ВЧ-систем. Ионы, последовательно инжектируемые из нуклотрона, накапливаются в коллайдере с помощью барьерной ВЧ-системы (ВЧ1). После накопления достаточного количества частиц барьерная ВЧ-система выключается и закорачивается. После роспуска накопленного сгустка по периметру коллайдера включается гармоническая система ВЧ2, работающая на 22-й

¹E-mail: esyresin@jinr.ru

гармонике частоты обращения. Амплитуда ВЧ2-напряжения адиабатически возрастает по мере уменьшения длины сгустка. В процессе группировки пучка за счет охлаждения ионов снижается его продольный эмиттанс. В ходе охлаждения ВЧ2-напряжением обеспечивается такой импульсный разброс ионов, когда не развивается продольная неустойчивость пучка. Амплитуда ВЧ2 растет до того момента, когда сгусток входит в сепаратрису 66-й гармоники ВЧ3-системы. В этот момент происходит перезахват сгустка из ВЧ2- в ВЧ3-систему. При дальнейшем адиабатическом увеличении ВЧ3-напряжения и охлаждении формируются ионные сгустки с параметрами, требуемыми для эксперимента.

НАКОПЛЕНИЕ ИОНОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЧ-БАРЬЕРАМИ

Из нуклотрона каждые 4 с инжектируются сгустки с интенсивностью 10^9 ионов попеременно в каждое кольцо коллайдера со среднеквадратичным импульсным разбросом $dp/p = (0,95-2,8) \cdot 10^{-4}$ при энергии 1 ГэВ/нуклон и $dp/p = (0,85-2,1) \cdot 10^{-4}$ при энергии 4,5 ГэВ/нуклон. Среднеквадратичная длина сгустка равна $\sigma_s = 5,9-17,5$ м при энергии 1 ГэВ/нуклон и $\sigma_s = 2,5-6,2$ м при энергии 4,5 ГэВ/нуклон.

Во время накопления ВЧ1-станция генерирует за период обращения четыре импульса напряжения. Амплитуда импульса ВЧ-напряжения равна 5 кВ. Длительность импульсов регулируется в пределах 20–80 нс, фронт/спад составляют не более 10 нс. Максимальная фазовая протяженность импульсов равна $\pi/12$. Фронты импульса не влияют на динамику частиц при накоплении ионов, если их длительность меньше чем $1/5$ от длительности импульса. Максимальная фазовая протяженность сгустка накопленных частиц составляет $\psi = 0,86\pi$. Первый и второй импульсы ВЧ-напряжения предназначены для удержания накопленных частиц. В промежуток между третьим и четвертым импульсами ВЧ-напряжения производится инжекция частиц. Расстояние между третьим и четвертым импульсами определяется длительностью плато импульса кикера и составляет 200 нс (59 м или $0,23\pi$). Для ионных сгустков со среднеквадратичной длиной $\sigma_s = 6-10$ м эффективность захвата ВЧ-барьерами близка к 100%. Максимальная среднеквадратичная длина сгустка из нуклотрона составляет $\sigma_s = 17,5$ м при энергии ионов 1 ГэВ/нуклон. В этом случае плато импульса кикера обеспечивает захват ВЧ-барьерами сгустка длиной $\pm 1,7\sigma_s$ и соответствует их эффективности захвата около 80%. Расстояния между вторым и третьим, четвертым и первым импульсами ВЧ-барьеров определяются фронтами кикера. Передний фронт кикера равен 100 нс (29,5 м или $0,115\pi$). Задний фронт кикера составляет 410 нс (121 м или $0,47\pi$). Для инжекции новой порции ионов с ВЧ-барьерами требуется фазовая протяженность $1,14\pi$.

Продольный профиль инжектируемого сгустка измеряется по сигналу с пикап-станции. Сигнал с пикап-электрода передается в систему управления ВЧ1. С помощью пикап-электрода осуществляются нахождение центра масс инжектированного сгустка, установка барьеров для инжекции на расстоянии $\pm(2-3)\sigma_s$, определение нулевой фазы (центра) накопленного сгустка.

Для накопления требуемой интенсивности ионного сгустка необходимо время 100–250 с при энергии ионов 1–2,5 ГэВ/нуклон. Без охлаждения эффективность накопления при энергии 1,5 ГэВ/нуклон составляет 68%, при энергии 4,5 ГэВ/нуклон она равна 74% [2]. При охлаждении эффективность накопления возрастает до 90% [2]. Равновесный среднеквадратичный разброс по импульсу $dp/p = 2 \cdot 10^{-4}$ определяется

охлаждением и внутривпучковым рассеянием. Для накопления сгустка ионов со стохастическим охлаждением требуется время 500–800 с при энергии 3–4,5 ГэВ/нуклон [2].

В ходе накопления ВЧ-барьеры должны обеспечить синхронизированное положение центров накопленных сгустков в каждом из колец в середине одной из арок коллайдера в некоторый момент времени. В этот момент накопленные сгустки должны размещаться между дипольными вертикальными магнитами разведения пучков двух точек встречи. Свободная от накопленных сгустков половина колец коллайдера отводится под ВЧ-барьеры для инжектированных сгустков. В этом случае удается избежать паразитных столкновений между накопленными сгустками двух колец. Однако вновь инжектируемый сгусток одного кольца будет сталкиваться с накопленным сгустком другого кольца в общем прямолинейном промежутке.

Таблица 1. Параметры ионных пучков в коллайдере при накоплении и группировке

Параметр	Значение		
	1	3	4,5
Энергия ионов, ГэВ/нуклон			
Количество ионов	$4,4 \cdot 10^9$	$5,3 \cdot 10^{10}$	$5,1 \cdot 10^{10}$
Среднеквадратичный $(dp/p)_\sigma$ в режиме соударений	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Пороговый среднеквадратичный $dp/p_{\sigma-th}$ для сгустка в режиме соударений	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Пороговый среднеквадратичный $dp/p_{\sigma-th}$ для распущенного накопленного сгустка	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Сепаратриса ВЧ-барьера по $(dp/p)_h$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Эмиттанс в режиме столкновений, эВ · с	28	120	235
Пороговый эмиттанс накопленного сгустка, эВ · с	31	173	300
Эмиттанс накопленного сгустка, эВ · с	59	202	470

Высота сепаратрисы ВЧ-барьеров обеспечивает удержание частиц накопленного сгустка с $(dp/p)_h = 0,7 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-3}$ (табл.1). Продольный эмиттанс накопленного сгустка определяется среднеквадратичным разбросом по импульсам $(\Delta p/p)_\sigma = (dp/p)_h/3$ и его фазовой протяженностью. При накоплении сгустка возможно развитие микроволновой продольной неустойчивости, пороговый ток которой пропорционален $I \propto (\Delta p/p)^2$ (критерий Кайла–Шнелля). При накоплении ионов ВЧ-барьерами совместно с охлаждением разброс по импульсам накопленного сгустка не должен быть меньше чем $(dp/p)_{\sigma-th}(2\pi/\psi)$, чтобы избежать развития продольной неустойчивости. В процессе группировки пучка охлаждение должно обеспечить снижение продольного эмиттанса от начального его значения до уровня, требуемого для режима столкновений. Напряжение ВЧ2- и ВЧ3-станций должно обеспечить продольный разброс по импульсам в сгустке больше порогового значения, соответствующего критерию Кайла–Шнелля для пикового тока.

ПАЗИТНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ИОНОВ

В процессе накопления и группировки ионов в двух накопительных кольцах будут происходить их паразитные столкновения в общем прямолинейном промежутке еще до того момента, как будут сформированы сгустки, с параметрами, требуемыми для эксперимента.

Параметры ионных пучков в коллайдере ограничены некогерентным сдвигом бетатронной частоты $\Delta Q_{\text{tot}} = \Delta Q_{\text{sp}} + 2\xi$, где ξ — параметр эффектов встречи, ΔQ_{sp} — ласлетовский сдвиг бетатронной частоты, равный

$$\Delta Q_{\text{sp}} = - \left(\frac{Z^2 r_p}{A} \right) \left(\frac{N_b}{4\pi\beta^2\gamma^3\varepsilon} \right) \left(\frac{C_{\text{ring}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \right),$$

где Z , A и r_p — зарядовое число, атомный номер иона и классический радиус протона; ε — эмиттанс пучка; C_{ring} — периметр коллайдера; σ_s — длина сгустка. Параметр эффектов встречи для круглых пучков равен

$$\xi = \left(\frac{Z^2 r_p}{A} \right) \left(\frac{N_b}{4\pi\beta^2\gamma\varepsilon} \right) \left(\frac{1 + \beta^2}{2} \right).$$

Параметры ΔQ_{sp} , ξ и τ_{int} (время взаимодействия для сталкивающихся сгустков) приведены в табл. 2 для энергии ионов 1/4,5 ГэВ/нуклон. Эти параметры приведены для четырех режимов: столкновений сгустков на эксперимент (эксперимент), паразитных столкновений сгустков, накопленных в двух кольцах, друг с другом (накопленные сгустки), паразитных столкновений накопленного сгустка одного кольца с инжектированным сгустком другого кольца (накопленный и инжектированный сгустки) и паразитных столкновений сгустков при их группировке (сгустки при группировке).

Таблица 2. Параметры сталкивающихся сгустков в коллайдере

Параметр	Эксперимент	Накопленные сгустки	Накопленный и инжектированный сгустки	Сгустки при группировке
ΔQ_{sp}	0,035/0,014	0,013/0,005	0,013/0,005	0,006/0,002
ξ	0,004/0,0014	0,004/0,0014	0,02/0,0015	0,004/0,0014
τ_{int} , с	15	0–100/800	8/64	0,1/7

При длительности эксперимента 1 ч суммарное время столкновений сгустков друг с другом в областях встречи составит около 15 с. Суммарное время паразитных столкновений накопленных сгустков друг с другом зависит от их взаимного расположения в накопительных кольцах. Положение центров накопленных сгустков в каждом из колец должно быть синхронизировано относительно друг друга. Удастся избежать паразитных столкновений накопленных сгустков, когда в некоторый момент времени их центры синхронно находится в середине одной из арок коллайдера. Наоборот, если в какой-то момент времени центр накопленного сгустка одного кольца будет находиться в середине правой арки коллайдера, а центр второго — в середине левой арки, столкновения будут непрерывны в двух точках встречи в течение времени накопления ионов 100–800 с.

При паразитных столкновениях накопленного и инжектируемого сгустков параметр эффектов встречи составляет около $\xi = 0,02$ при энергии ионов 1 ГэВ/нуклон, количестве ионов в инжектируемом сгустке 10^9 и его эмиттансе $1,2\pi$ мм · мрад. Заметное возрастание параметра эффектов встречи ξ при энергии 1 ГэВ/нуклон обусловлено большим количеством ионов во вновь инжектированном сгустке по сравнению со сгустками, сформированными непосредственно для экспериментов при этой энергии. Если паразитные столкновения с высоким значением параметра эффектов встречи $\xi = 0,02$ будут приводить к потерям накопленных частиц, целесообразно снизить количество ионов

во вновь инжектированном сгустке за счет увеличения времени накопления и, соответственно, роста времени паразитных столкновений. Для сгустков со среднеквадратичной длиной $\sigma_s = 12\text{--}15$ м параметр эффектов встречи ξ снижается примерно в 2 раза за счет того, что в области столкновений с накопленным сгустком находится около 50 % частиц инжектируемого сгустка. При типичном времени накопления 100 с суммарное время столкновения накопленного и вновь инжектированного сгустков составит около 8 с, если ВЧ-барьеры, обеспечивающие захват инжектированного сгустка, перемещаются к накопленному сгустку в течение времени 8 с, соответствующего периоду инъекции в каждое кольцо коллайдера. Если ВЧ-барьеры осуществляют перемещение вновь инжектированного сгустка к накопленному сгустку в течение 1 с, суммарное время столкновений может быть сокращено почти на порядок.

В ходе группировки 22 сгустков происходят их паразитные столкновения, когда у них еще относительно большие продольные размеры. В начальный момент группировки среднеквадратичная длина сгустка составляет около $\sigma_s = 3,8$ м, и ласлетовский сдвиг бетатронной частоты примерно в 6 раз ниже, чем для столкновений сгустков в ходе экспериментов. По мере уменьшения длины сгустка ласлетовский сдвиг бетатронной частоты подрастает и достигает уровня ΔQ_{sp} , соответствующего уровню режима на эксперимент. Время группировки и формирования сгустков со среднеквадратичной длиной $\sigma_s = 0,6$ м определяется временем охлаждения, которое составляет 10–700 с для ионов с энергией 1–4,5 ГэВ/нуклон. Суммарное время столкновений сгустков за время группировки оценивается в интервале 0,1–7 с для ионов с энергией 1–4,5 ГэВ/нуклон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eliseev A. V., Kozlov O. S., Meshkov I. N. et al.* Storage, Acceleration and Short Bunched Beam Formation of $^{197}\text{Au}^{79+}$ Ions in NICA Collider // Proc. of Russ. Accel. Conf. (RuPAC-2012), Saint Petersburg, Russia, 2012. P. 30–32.
2. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Под ред. И. Н. Мешкова и Г. В. Трубникова. Дубна, 2015. Т. 3. С. 88–105.