

БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

А. В. Бутенко, В. И. Волков, А. В. Елисеев, Г. Г. Ходжибагиян, В. Н. Карпинский, А. Д. Коваленко, О. С. Козлов, И. Н. Мешков, В. А. Михайлов, В. А. Мончинский, Р. В. Пивин, А. О. Сидорин, А. В. Смирнов, Г. В. Трубников, ОИЯИ.

Аннотация

NICA - новый ускорительный комплекс, создаваемый в ОИЯИ, основной задачей которого является обеспечение экспериментов на встречных пучках ионов вплоть до урана с энергиями до 3.5×3.5 ГэВ/н. В комплекс НИКА входят: источник ионов электронно-струнного типа, линейный ускоритель на 6 МэВ/н, Бустер, Нуклотрон и коллайдер со средней светимостью $10E+27 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. Основными задачами Бустера являются: накопление ионов $^{197}\text{Au}^{32+}$ до $4 \cdot 10E+9$; ускорение до энергии 600 МэВ/н, которой достаточно для полной обдирки ядер; снижение требований к вакуумным условиям в Нуклотроне; формирование необходимого эмиттанса пучка с помощью системы электронного охлаждения. Особенности Бустера NICA, требования к главным системам синхротрона и их параметры представлены в этой статье.

Annotation

NICA is the new complex being constructed on the JINR aimed to provide collider experiments with ions up to uranium at energy of 3.5×3.5 GeV/u. The NICA layout includes Electron String Ion Source, 6 MeV/u linac, booster, upgraded Nuclotron and collider with average luminosity of $10E+27 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The main goal of the Booster are following: accumulation of $4 \cdot 10E+9$ $^{197}\text{Au}^{32+}$ ions; acceleration of the ions up to energy of 600 MeV/u that is sufficient for stripping of the ions up to the bare nucleus state; simplification of the requirements to the vacuum conditions in the Nuclotron; forming of the required beam emittance at the energy of 100 MeV/u with electron cooling system. The features of this booster, the requirement to the main synchrotron systems and their parameters are presented in this paper.

Введение

Бустер – сверхпроводящий тяжелоионный синхротрон с периметром орбиты 211,2 м, максимальной магнитной жесткостью 25 Тл·м и темпом роста поля 1 Тл/с, что соответствует оптимальному режиму работы всех элементов инжекционной цепочки комплекса NICA. При ускорении ионов золота $^{197}\text{Au}^{32+}$ максимальная энергия составит 600 МэВ/н. Бустер предназначен для накопления, охлаждения и ускорения пучков тяжелых ионов с последующим их однооборотным выводом, обдиркой и переводом в Нуклотрон. Также он может использоваться как самостоятельный синхротрон для ускорения и охлаждения пучков ионов от дейтерия до урана при проведении медико-биологических и прикладных исследований с использованием системы медленного вывода.

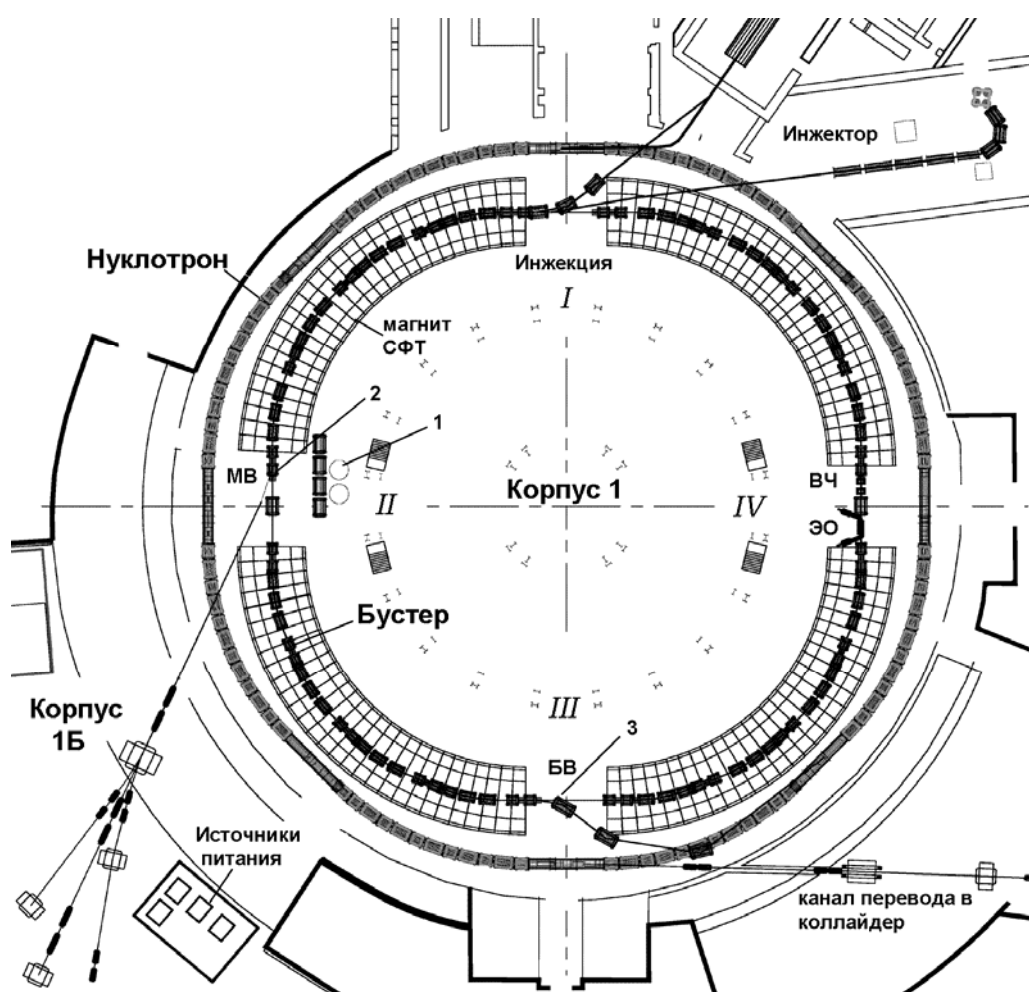


Рис. 1. Расположение основных систем Бустера в существующих зданиях: 1 – спутниковый рефрижератор и измерительный полупериод; 2 – электростатический септум и септум-магнит системы медленного вывода пучка в корпус 1Б; 3 – системы быстрого вывода и канал перевода в Нуклотрон; ВЧ – ускоряющая станция; ЭО – секция электронного охлаждения; I, II, III, VI – прямолинейные секции Бустера.

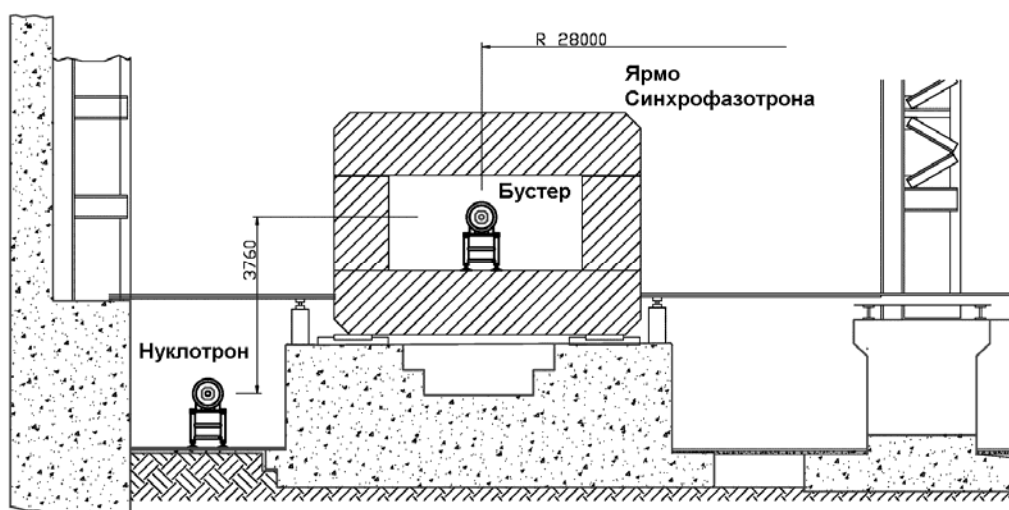


Рис. 2. Расположение элементов магнитных систем Бустера и Нуклотрона.

1. Оптическая структура.

Оптическая структура Бустера разработана на основании следующих требований:

- достижение максимально возможной энергии ускоренных ионов при заданных размерах кольцевого тоннеля внутри железного ярма Синхрофазотрона;
- получение интенсивности до $4 \cdot 10^9$ ускоренных ионов Au^{32+} за цикл ускорения;
- обеспечение высокой эффективности вывода пучка в широком диапазоне энергий;
- выбор минимально возможных размеров апертур сверхпроводящих элементов кольца и их поперечных сечений в целях снижения энергопотребления;
- использование в качестве инжектора вновь создаваемого линейного ускорителя тяжелых ионов.

Структура Бустера имеет FODO периодичность и состоит из 4-х суперпериодов, в каждый из которых входят 5 регулярных периодов и один период, не содержащий дипольных магнитов. Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую квадрупольные линзы, два дипольных магнита и четыре малых свободных промежутка. Соответственно, каждый суперпериод включает в себя десять дипольных магнитов, шесть фокусирующих и шесть дефокусирующих линз (Рис. 3).

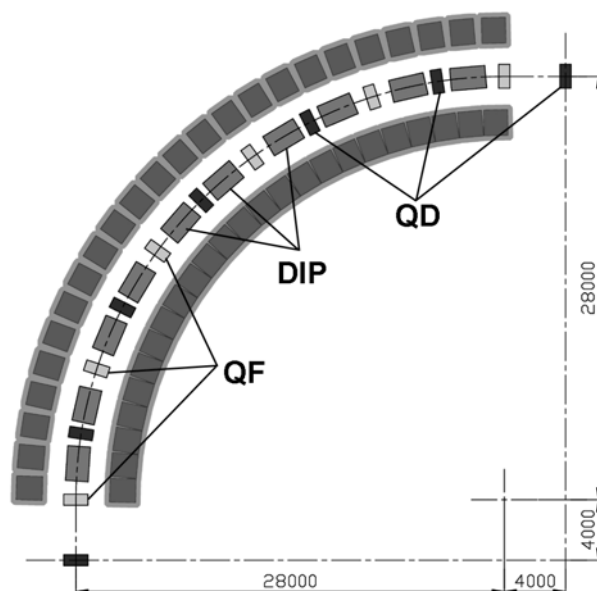


Рис. 3. Один квадрант магнитной системы Бустера, размещенной внутри ярма синхрофазотрона: DIP – дипольные магниты, QF QD – квадрупольные линзы

Для уменьшения динамического изменения давления в пучковой камере и поглощения перезаряженных ионов предусматривается установка 11 специальных ловушек – коллиматоров в каждом из 4-х суперпериодов оптической структуры [2].

Таблица 2.1. Основные параметры Бустера

1. Общие данные	
Энергия инъекции, МэВ/н	6,2
Максимальная энергия ионов Au ³²⁺ , МэВ/нуклон	600
Магнитная жесткость, Тл·м при инъекции / максимальная	2,2 / 25,0
Периметр, м	211,2
Кулоновский предел по интенсивности, част/цикл	5,10 ⁹ A/q ²
Критическая энергия, ГэВ/н	3,8
2. Структура и магнитные элементы	
Количество суперпериодов / периодов типа ФОДО	4 / 24
дипольных магнитов	40
квадрупольных линз	48
Магнитное поле в дипольных магнитах, Тл	1,8
Градиент в линзах, Тл/м	19,7 / -20,3
3. Динамические характеристики структуры и пучка	
Частоты бетатронных колебаний	5,75
Хроматичность $\Delta Q_x / (\Delta p/p) / \Delta Q_z / (\Delta p/p)$	-6,8 / -6,5
Коэффициент уплотнения орбит, α	0,04
Эмиттанс пучка, π ·мм·мрад	при инъекции $\epsilon_{x,z}$ в конце ускорения ϵ_x / ϵ_z
	10 1,7 / 2,0

2. Конструкция структурных магнитов и линз

Элементы магнитной системы Бустера NICA планируется построить по аналогии с магнитами действующего быстроциклирующего сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон [1]. Она отличается высокой эффективностью и надежностью при относительной простоте и низких затратах.

Дипольный магнит – секторный, типа "оконная рама". Однослойная изогнутая обмотка магнита изготовлена из трубчатого сверхпроводящего кабеля. Ядро из листов электротехнической стали толщиной 1 мм, скрепленных между собой сварной обвязкой из уголков и пластин, охлаждается потоком гелия после обмотки. Система подвески магнита в криостате также аналогична подвеске магнита Нуклотрона на восьми стержнях (Рис. 4).

Таблица 2. Основные характеристики дипольного магнита Бустера NICA

Эффективная длина магнита, L, м	2,2
Длина железного ярма, м	2,14
Неоднородность магнитного поля, $\Delta B/B$ при $x_{\perp} = \pm 60$ мм	$\pm 6 \times 10^{-4}$
Апертура по вакуумной камере, мм	128 x 64
Угол поворота, градусы	9
Радиус кривизны средней траектории, м	14,09
Масса магнита, кг	850
Ток при максимальном магнитном поле, кА	12,1

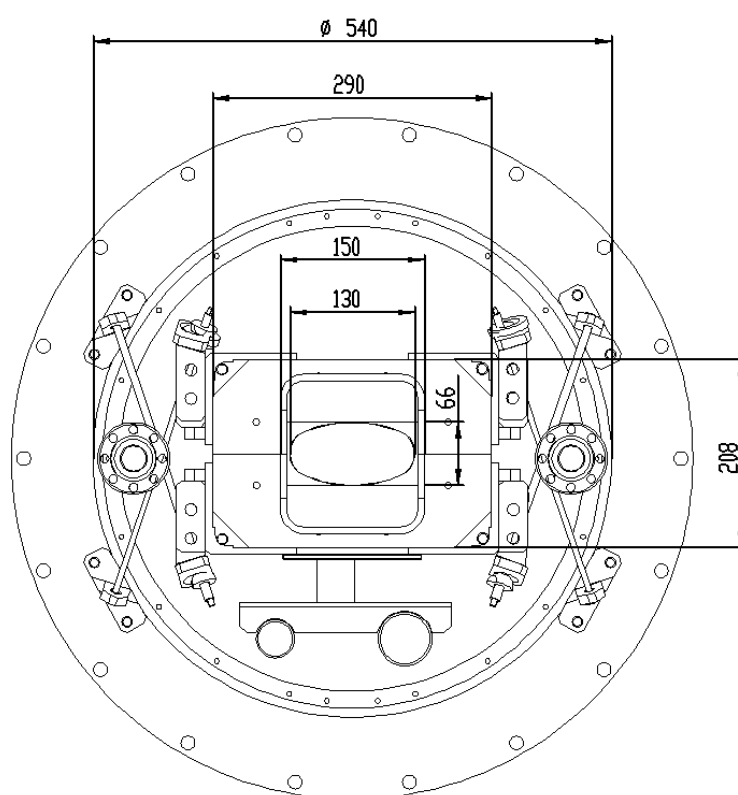


Рис. 4. Дипольный магнит Бустера NICA в криостате.

Квадрупольный магнит (линза) регулярной структуры Бустера также аналогичен по своей конструкции квадрупольному магниту Нуклотрона.

3. Система коррекции погрешностей магнитного поля

Система коррекции магнитного поля Бустера предназначена для: коррекции равновесной орбиты, хроматичности, сдвигов и разбросов бетатронных частот, бетатронных резонансов 2–3 порядков.

Коррекция, или изменение частот бетатронных колебаний, осуществляется с помощью источников питания структурных квадрупольных линз.

Для размещения корректирующих элементов и диагностического оборудования в Бустере отведено 48 малых свободных промежутков вблизи линз. Всего в кольце установлено 44 корректора длиной 0,3 м, каждый из которых содержит три типа токовых обмоток: две дипольные, для коррекции замкнутой орбиты, и одна мультипольная. Требуемые величины полей и градиентов реализуются с помощью неявнополюсных сверхпроводящих мультипольных корректоров с тонкослойным сверхпроводящими обмотками и косвенным охлаждением. В каждой структурной квадрупольной линзе расположены электростатические пикап-электроды (48 станций).

4. Системы инжекции и вывода пучка.

Система инжекции пучка ионов в Бустер обеспечивает три режима работы.

1. Однократная однооборотная инжекция длительностью 7 мкс. Этот режим является основным при инжекции ионов $^{197}\text{Au}^{32+}$ с интенсивностью ожидаемой от источника “Крион-N”.
2. Три последовательных импульса однооборотной инжекции по 7 мкс с периодом следования 100 мс и накоплением пучка в поперечном фазовом пространстве. Этот режим разработан в качестве резервного, для обеспечения технического запаса по интенсивности пучка при работе с источником электронно-струнного типа.
3. Режим многооборотной инжекции длительностью 140 мкс с накоплением пучка в фазовой плоскости горизонтальных колебаний, предназначенный для работы с источниками ионов другого типа.

Инжекционная схема включает в себя три импульсных отклоняющих устройства создающих локальное смещение равновесной орбиты на время инжекции, и один септумный магнит (Рис. 5).

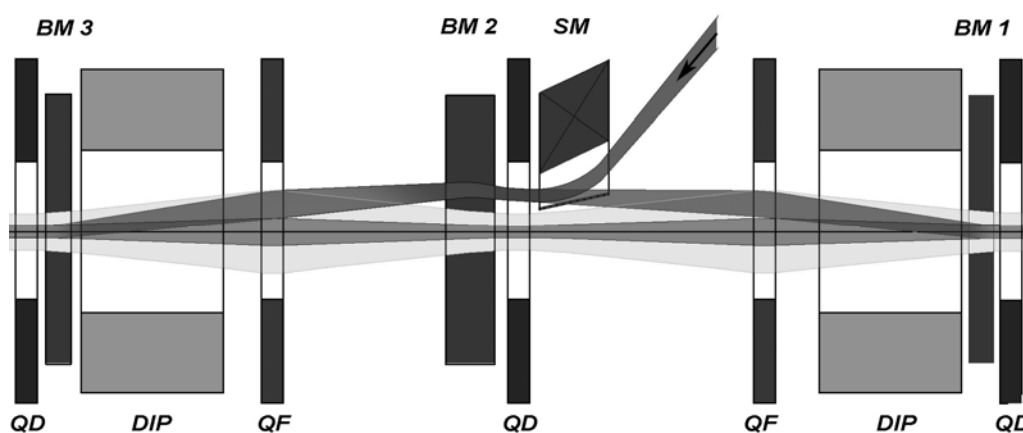


Рис. 5. Схема инжекции пучка: QD, QF – квадрупольные линзы, DIP – дипольные магниты, BM 1÷3 – импульсные отклоняющие устройства, SM – инжекционный септумный магнит.

В качестве импульсных устройств используются инфлекторные пластины, разработанные на основе доработанного прототипа – инфлекторных пластин системы инжекции Нуклотрона.

Система медленного вывода включает в себя электростатический септум и септум-магнит, расположенные во второй прямолинейной секции Бустера. Их конструкция аналогична конструкции соответствующих устройств Нуклотрона. Медленный вывод осуществляется за счет смещения рабочей точки Бустера в область нелинейного резонанса $3Q_x = 17$, возбуждаемого 17-ой гармоникой секступольной нелинейности.

Быстрый вывод предназначен для перевода пучка в Нуклотрон. Для вывода пучка используется импульсный ударный магнит (кикер) и септумный магнит, расположенные в третьей прямолинейной секции Бустера. Схема быстрого вывода (Рис. 6.) разработана для пучка с эмиттансом до $7.5 \pi \cdot \text{мм мрад}$ и разбросом по импульсу до $\pm 10^{-4}$.

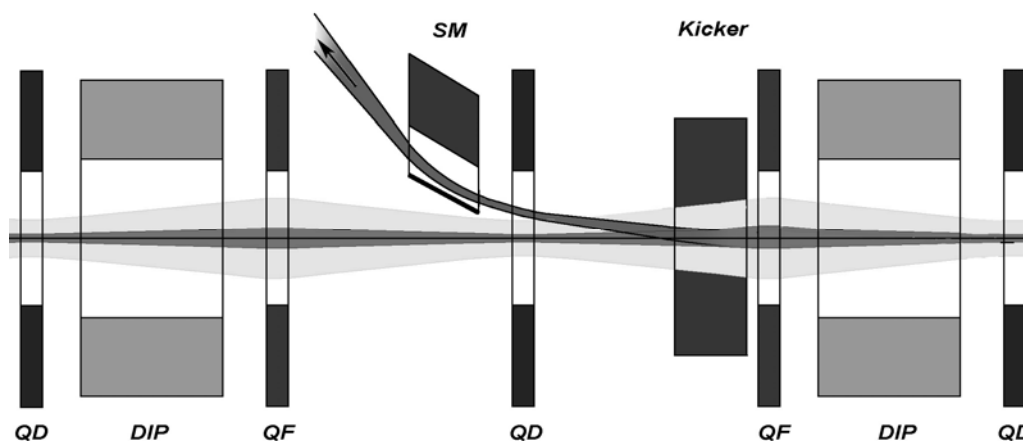


Рис. 6. Схема быстрого (однооборотного) вывода пучка из Бустера: DIP – дипольные магниты, QD и QF – фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы, Kicker – импульсный ударный магнит, SM – септумный магнит.

5. Вакуумная система.

При общей длине Бустера $\sim 211,2$ м, его "холодная" часть составляет 180 м, а "теплые" прямолинейные промежутки 36 м. Поверхность "холодной" части пучковой вакуумной камеры имеет температуру $T \leq 10$ К, "теплой" – $T \sim 300$ К. Парциальный состав остаточных газов [3] с большой достоверностью будет состоять из:

- "теплая" часть – $\text{H}_2 \sim 90\%$ и $\sim 10\%$ – CO , CH_4 , CO_2 ,
- "холодная" часть – водород и гелий.

При выполнении современных требований подготовки поверхностей стенок пучковой камеры, изготовленной из соответствующей нержавеющей стали для получения давления $P \sim 10^{-11}$ Торр потребуется установка трех насосов с производительностью 1250 л/с на

каждый «теплый» прямолинейный участок. Кроме того, эти участки должны иметь систему термообезгаживания на месте при температуре $\sim 300^\circ \text{C}$.

В криогенной части пучковой камеры величина газоотделения холодных поверхностей на порядки меньше чем у «теплых», а скорость откачки, за исключением водорода и гелия, на порядки выше. Установив для откачки гелия и водорода дополнительные криосорбционные насосы, содержащие активированный уголь, можно с уверенностью рассчитывать на давление $P \leq 10^{-12}$ Торр. Средняя величина статического давления по кольцу в этом случае будет равна $P \sim 3 \cdot 10^{-12}$ Торр.

Вакуумная система изолирующего объема криогенной части ускорителя не требует сверхвысокого вакуума, вполне достаточно давление порядка $1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Для предварительной откачки этого объема до давления $P \sim 1 \cdot 10^{-4}$ Торр необходимы турбомолекулярные насосы с безмасляными форвакуумными насосами. Наличие большой криогенной поверхности обеспечит получение требуемого высокого вакуума в изолирующем объеме.

6. Система электронного охлаждения

Система электронного охлаждения Бустера предназначена для формирования фазового объема пучка тяжелых ионов, необходимого для его дальнейшего эффективного перевода в Нуклотрон и кольца коллайдера. Чтобы избежать ограничений, связанных с действием сил пространственного заряда, охлаждение производится на промежуточной энергии ионов равной 100 МэВ/н. в течение одной секунды.

Параметры системы электронного охлаждения Бустера (Табл. 3) достаточно типичны для устройств этого класса [4]. Ее основной конструктивной особенностью является использование сверхпроводящих соленоидов в тороидальных и прямолинейной секциях. Такая конструкция выбрана для того, чтобы исключить переходы между «теплыми» и «холодными» участками вакуумной камеры в прямолинейной секции Бустера, при этом длина секции охлаждения получается максимальной.

Таблица 3. Основные параметры системы электронного охлаждения.

Максимальная энергия электронов, кэВ	60.0
Ток пучка, А	0 ÷ 1.0
Эффективная длина секции охлаждения, м	2.5
Магнитное поле в секции охлаждения, кГс	1 ÷ 2
Относительная погрешность магнитного поля	$< 1 \cdot 10^{-4}$
Радиус электронного пучка, см	2.5
Температура электронов поперечная/продольная, мэВ	200/0.5

Литература.

1. Khodzhbagiyani H.G. and Smirnov A.A., The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron, *Proc. of the 12th Int. Cryogen. Eng. Conf.*, 1988, pp. 841–844.
2. P. Spiller, K. Blasche, B. Franczak, J. Stadlmann, and C. Omet, Optimization of the SIS100 Lattice and a Dedicated Collimation System for Ionisation Losses, GSI Darmstadt, D-64291.
3. A. Smolyakov, W. Fischer, C. Omet, P. Spiller, Comparison of the present and planned operation of the SIS18 and the AGS Booster with intermediate charge state heavy ions, GSI-Acc-Report-2005-11-001, P.Spiller et al., *NIM A* 544 (2005), pp. 117–124.
4. I.Meshkov, A.Sidorin, Electron cooling, *NIM A* 532 (2004), pp. 19-25.