

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА СИНХРОТРОНА С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

© 2025 г. Д. М. Попов^{а, б, *}, В. А. Востриков^{а, б, **}, М. Ф. Блинов^а

^аИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера, СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^бНовосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: d.m.popov@inp.nsk.su

**e-mail: v.a.vostrikov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 23.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

В ИЯФ СО РАН разрабатывается тяжелоионный комплекс для технологических целей. Ключевым элементом комплекса является бустерный синхротрон с электронным охлаждением. В работе представлены результаты исследований динамики движения пучка с учетом поперечной связи бетатронных колебаний и нелинейностей ведущего магнитного поля. Поперечная связь, вызванная соленидом секции охлаждения, была скомпенсирована с помощью пары симметрично расположенных, относительно центра соленида, триплетов скью-квадрупольных линз с антисимметричным запитыванием. Произведен расчет вертикальной дисперсии, возбуждаемой магнитным полем тороидов установки электронного охлаждения, и проведена оптимизация оптики ускорителя для ее подавления. Методом сканирования по бетатронным частотам, вблизи рабочей точки, при условии сохранения компенсации поперечной связи и хроматизма, исследовалась динамическая апертура синхротрона. Таким образом были выявлены опасные нелинейные резонансы, возбуждаемые секступольными линзами, приводящие к значительному ограничению динамической апертуры. Разработана схема разбиения секступольных линз на 6 семейств, позволяющая значительно уменьшить влияние наиболее опасных резонансов. Также, по результатам расчетов, определена большая область в пространстве частот, в которой сохраняется достаточно широкая динамическая апертура, для частиц с заданным энергетическим разбросом. Расположение рабочей точки ускорителя в этой области позволит уменьшить влияние эффектов пространственного заряда на динамическую апертуру. Кроме того, для выбранной рабочей точки было исследовано влияние расчетных нелинейностей основных магнитных элементов на динамику частиц в ускорителе.

Ключевые слова: синхротрон, электронное охлаждение, динамическая апертура

DOI: 10.56304/S2079562924050403

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, метод электронного охлаждения широко применяется в ионных ускорительных комплексах низкой и средней энергии, использующихся для научных, медицинских и других целей, например, [1–5]. В ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера разрабатывается ионный ускорительный комплекс для технологических целей. Комплекс состоит из двух линейных ускорителей, бустерного синхротрона с электронным охлаждением и основного синхротрона. Комплекс спроектирован для генерации интенсивных пучков ионов в широком спектре от протонов до ионов висмута.

Оптика бустерного синхротрона представляет собой зеркально-симметричную структуру, состоящую из двух ахроматических арок и двух больших бездисперсионных промежутков. Для подавления

дисперсии в свободных промежутках используется схема с пропущенной ячейкой. В одном из промежутков размещается установка электронного охлаждения и пара квадрупольных триплетов, создающих равные и достаточно большие бета-функции на участке охлаждения. Это позволяет уменьшить угловой разброс ионного пучка на участке взаимодействия с электронным пучком, что приводит к увеличению эффективности охлаждения. Другой свободный промежуток предназначен для установки элементов впуска-выпуска и ВЧ резонатора. Эскиз бустерного синхротрона изображен на рис. 1. Основные параметры бустерного синхротрона приведены в табл. 1. На рис. 2 приведены оптические функции бустерного синхротрона.

Инжекция в бустерный синхротрон – однооборотная, с впуском по вертикали снизу и горизонтальным смещением наружу. Для возможности

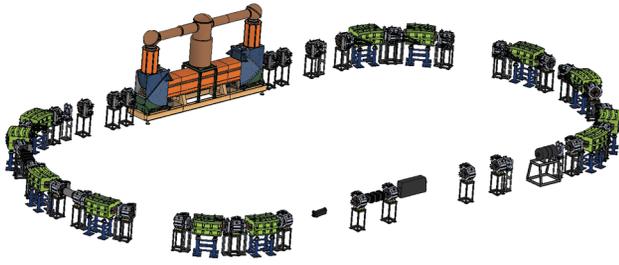


Рис. 1. Эскизная модель бустерного синхротрона.

накопления интенсивных ионных пучков используется система удар-предудар. При этом новая впускаемая порция пучка инжектируется в фазовое пространство, освободившееся при охлаждении предыдущих порций. В синхротроне реализовано два режима выпуска: медленный выпуск на резонансе $\nu_x = n/3$ с амплитудной раскачкой и однооборотный выпуск на максимальной энергии.

Основными факторами, влияющими на поперечную динамику пучка в бустерном синхротроне, являются: линейная связь поперечных бетатронных колебаний, вызванная соленоидом секции охлаждения, хроматические секстипольные линзы, нелинейности основных магнитных элементов, вихревые токи в стенках вакуумной камеры при ускорении, эффекты пространственного заряда пучка.

Продольное магнитное поле соленоида секции охлаждения возбуждает связь поперечных бетатронных колебаний. Появление связи приводит к снижению динамической устойчивости пучка, рассогласованию оптики, сдвигам частот и возбуждению вертикальной дисперсии, в связи с чем возникает необходимость компенсации связи.

Секстипольные магниты, расположенные в арках, предназначенные для управления линейным хроматизмом синхротрона, могут возбуждать нелинейные резонансы, что приводит к ограничениям динамической апертуры. Нелинейные краевые поля основных магнитных элементов также могут приводить к возбуждению нелинейных резонансов, и как следствие, к дополнительным ограничениям динамической апертуры.

В процессе ускорения, в стенках вакуумной камеры дипольных магнитов индуцируются вихревые токи. Магнитное поле вихревых токов содержит дипольную и секстипольную гармоники, величины которых пропорциональны скорости изменения ведущего магнитного поля. Таким образом, влияние вихревых токов на динамику пучка наиболее существенно при низкой энергии.

Одной из важных задач является исследование влияния эффектов пространственного заряда на динамику движения пучка. Данная задача является наиболее сложной, и ее рассмотрение предпо-

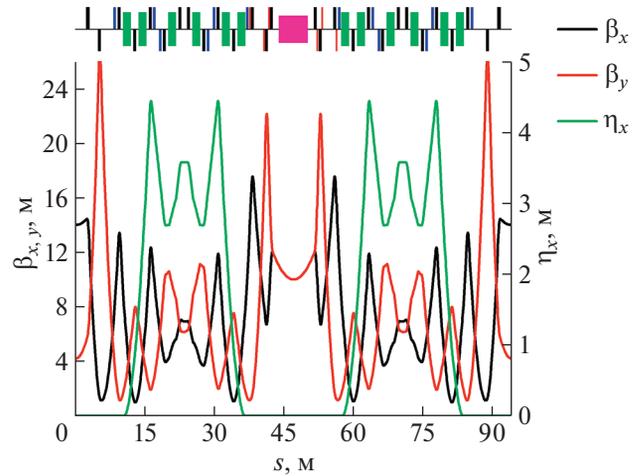


Рис. 2. Оптика бустерного синхротрона.

лагается в дальнейшем, с учетом полученных результатов.

КОМПЕНСАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ СВЯЗИ

Метод электронного охлаждения заключается в том, что сведенные вместе ионный и электронный пучки, движущиеся с одинаковой средней скоро-

Таблица 1. Основные параметры бустерного синхротрона

Параметр	Значение	
Тип ускоряемых частиц	p	$^{209}\text{Bi}^{41+}$
Энергия инжекции, МэВ/нуклон	7.5	4
Энергия при выпуске, МэВ/нуклон	7.5–700	4–36
Частота обращения, МГц	0.4–2.612	0.261–0.861
Магнитное поле, Тл	0.142–1.6	
Максимальная частота повторения, Гц	1	
Периметр кольца, м	94.1	
Макс. β_x/β_y , м	15/25.6	
Макс. η_x , м	4.25	
Бетатронные частоты, ν_x/ν_y	3.328/3.18	
Коэффициент уплотнения орбит α	0.1153	
Критическая энергия	2.94	
Натуральный хроматизм, x/y	–3.08/3.25	
Акцептанс, x/y	25/8.5 π см · мрад	
Энергетический разброс $\delta = \Delta p/p$, %	0.5	
Размеры по орбите, м	34.7 × 19.75	

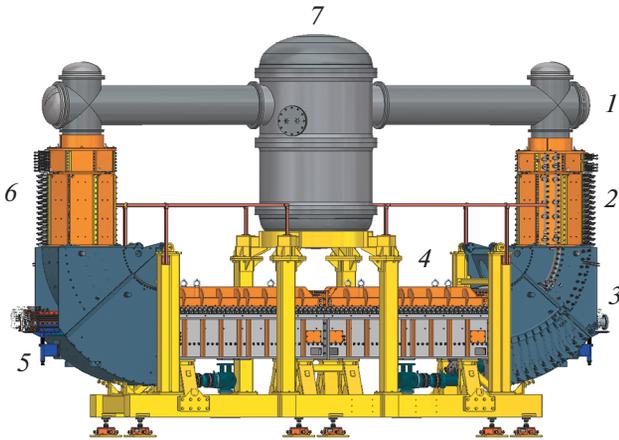


Рис. 3. Трехмерная модель установки электронного охлаждения. 1 – Электронная пушка, 2 – секция ускорения, 3 – тороид, 4 – соленоид, 5 – корректор, 6 – система рекуперации, 7 – высоковольтный источник.

стью, начинают эффективно взаимодействовать посредством электромагнитных сил [6]. При этом происходит выравнивание их температур, то есть охлаждение более “горячего” ионного пучка за счет кулоновских столкновений с газом “холодных” электронов. Охлаждение происходит в достаточно сильном продольном однородном магнитном поле соленоида, что позволяет значительно увеличить силу трения. Процесс охлаждения продолжается до тех пор, пока температура протонов в системе центра масс не станет равной эффективной температуре “замагниченных” электронов.

В бустерном синхротроне электронное охлаждение применяется для достижения малых поперечных эмиттансов, энергетического разброса, и для накопления интенсивных ионных пучков. На рис. 3 представлена трехмерная модель установки электронного охлаждения. Основные параметры установки представлены в табл. 2. Установка включает в себя электронную пушку, коллектор, ускоряющую и замедляющую секции, соленоид секции охлаждения и тороиды. На оси ионного пучка, помимо поля соленоида секции охлаждения, присутствует поле тороидальных секций. Тороиды используются для совмещения и разведения электронного и ионного пучков. Для интегральной компенсации вертикального магнитного поля, на краях установки расположены горизонтальные дипольные корректоры. Общее расчетное магнитное поле на оси ионного пучка приведено на рис. 4.

Магнитное поле в секции охлаждения должно обладать высокой однородностью (10^{-4} – 10^{-5}) для обеспечения эффективного охлаждения. Сохранять требуемое качество поля при быстрой перестройке, в цикле ускорения, технически не представляется возможным. Поэтому в цикле ускорения

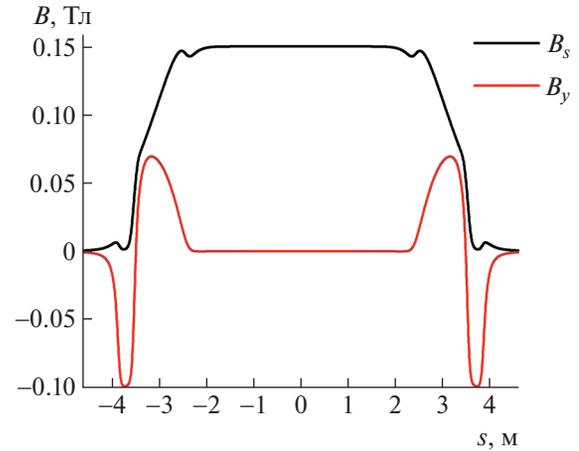


Рис. 4. Распределение магнитного поля в установке электронного охлаждения.

магнитное поле соленоида остается на постоянном уровне. Для легких ионов магнитное поле составляет $B = 5 \cdot 10^{-2}$ Тл, для тяжелых – $B = 0.15$ Тл. Продольное магнитное поле установки электронного охлаждения возбуждает связь поперечных колебаний, при этом коэффициент связи меняется в цикле ускорения. Максимальная величина коэффициента связи достигается для протонов на энергии инжекции. Кроме того, продольное поле соленоида приносит достаточно сильную дополнительную фокусировку, что приводит к сдвигам частот и рассогласованию оптики. Оптимальным решением является локализация связи в бездисперсионном промежутке, для исключения возбуждения вертикальной дисперсии и сохранения оптики в арках.

Задача о компенсации связи, создаваемой соленоидом, была подробно рассмотрена в статьях [7, 8]. При этом, в большинстве рассматриваемых случаев, связь поперечных колебаний предполагается малой. Характер линейной поперечной связи в соленоиде определяет ларморовский угол поворота ионов. В рассматриваемом соленоиде для протонов на энергии инжекции ларморовский угол максимален и равен $\varphi_L = \frac{\int Bdl}{2HR} = 24^\circ$, другими словами, связь нельзя считать малой. Для компенсации

Таблица 2. Основные параметры установки электронного охлаждения

Энергия электронного пучка, кэВ	До 350
Полная длина, м	8
Длина охлаждения, м	4.8
Эффективная длина соленоида, м	6.51
Магнитное поле, Тл	0.05–0.15
Апертура вакуумной камеры, мм	∅150

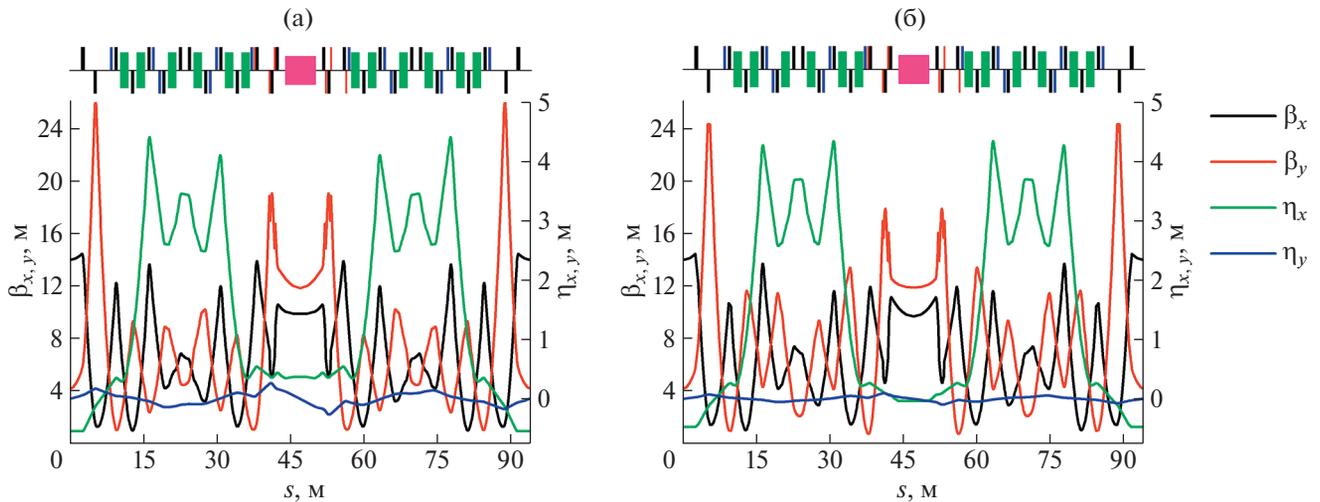


Рис. 5. Оптические функции бустерного синхротрона (а) только с компенсацией связи, (б) с компенсацией связи и подавлением вертикальной дисперсии.

связи рассматривалась возможность использования нескольких схем: с применением антисоленоидов, схема с магическими скью-квадруполями и схема с двумя триплетами скью-квадруполей.

В первую очередь была рассмотрена схема компенсации с применением двух антисоленоидов, в силу ее простоты и широкого распространения [4]. Для оптимальной компенсации антисоленоиды должны размещаться в непосредственной близости к соленоиду. При этом полный интеграл продольного магнитного поля должен быть равен нулю. Однако, такое размещение антисоленоидов в бустере потребует дополнительного разнесения квадрупольных линз в промежутке охлаждения, что приводит к значительному увеличению вертикальной бета-функции и соответственно, к уменьшению вертикального акцептанса. Таким образом, схема с антисоленоидами является не эффективной, более того, антисоленоиды довольно громоздкие и имеют значительное энергопотребление.

Схема Штеффена [8], часто именуемая как схема с “магическими” скью-квадруполями, была предложена и реализована в 1982 г. в DESY. Такая схема использует пару скью-квадрупольных линз и широко применяется, преимущественно в коллайдерах для компенсации поля соленоида детектора, например [9]. Для этой схемы существенна малость ларморовского угла поворота в соленоиде. В противном случае, связь скомпенсировать можно, однако, нельзя добиться согласования оптики промежутка с арками. Более того, скью-квадрупольные линзы должны располагаться в так называемых “магических” местах, которые изменяют свое местоположение в зависимости от энергии. Таким образом, в данном случае, схема Штеффена также является не эффективной.

Недостатки схемы с “магическими” скью-квадруполями можно устранить добавлением двух пар скью-квадрупольных линз. Такая схема, вследствие симметрии промежутка с электронным охлаждением, предполагает размещение двух триплетов скью-квадрупольных линз, симметрично относительно центра соленоида, с антисимметричным запитыванием. Такая схема позволяет локализовать связь в промежутке с установкой электронного охлаждения и оставить оптику бустерного синхротрона невозмущенной. Согласно проведенным расчетам, была спроектирована скью-квадрупольная линза с максимальным градиентом $G = 2.2$ Тл/м и эффективной магнитной длиной $L = 0.153$ м. Также, были определены законы изменения тока питания скью-квадрупольных линз и квадрупольных линз промежутка охлаждения в цикле ускорения.

Наличие вертикального магнитного поля триплетов, даже в случае компенсации связи, локализованной в промежутке охлаждения, приводит к возбуждению горизонтальной и вертикальной дисперсии. Оптические функции для протонов на энергии инжекции представлены на рис. 5а. Подстройкой оптики всего кольца, возбуждаемую дисперсию в секции электронного охлаждения можно уменьшить примерно в пять раз, при условии сохранения локализации связи, как показано на рис. 5б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ АПЕРТУРЫ

Область устойчивого движения циркулирующих частиц с учетом возмущений — динамическая апертура, является важной характеристикой ускорителя. В общем случае, силы этих возмуще-

ний зависят от амплитуд бетатронных и синхротронных колебаний. В представленной работе рассматривается только поперечная динамическая апертура, без учета синхротронного движения. При проведении расчетов использовались следующие параметры пучка: энергетический разброс при инжекции $\delta = \pm 5 \cdot 10^{-3}$, при адиабатическом захвате $\delta = \pm 14 \cdot 10^{-3}$, при максимальной энергии $\delta = \pm 1.24 \cdot 10^{-3}$. Расчетная динамическая апертура сравнивалась с эллиптической геометрической апертурой 150×65 мм.

Первоначально, для управления хроматизмом кольца предполагалось использовать два семейства секступольных магнитов, расположенных симметрично в арках в местах с максимальной дисперсией и максимальным расщеплением бета-функций. Кроме того, в промежутке впуска-выпуска, симметрично относительно центра промежутка, расположены два резонансных секступольных магнита, которые предполагалось использовать только для реализации медленного выпуска на одномерном резонансе третьего порядка. Все линзы имеют одинаковую конструкцию, общее количество магнитов 10 шт.

В рабочей точке для медленного выпуска $v_x = 3.283$, $v_y = 3.18$ была построена динамическая апертура для частиц с различными энергиями (см. рис. 6). При этом два семейства секступолей компенсируют естественный хроматизм, резонансные секступоли выключены, и связь локализована в промежутке охлаждения. Видно, что в такой конфигурации динамическая апертура меньше геометрической. Кроме того, видно, что частицы с отрицательным отклонением по энергии живут хуже. Полученный результат был в общем ожидаем, так как очевидно, что для инжекции и ускорения, нужна другая рабочая точка, расположенная недалеко от точки выпуска, для простоты перестройки оптики перед выпуском.

Для того, чтобы выбрать новую рабочую точку ускорителя, было проведено сканирование горизонтального и вертикального действия (рис. 7), ограничивающего область устойчивых колебаний в пространстве бетатронных частот, вблизи рабочей точки для выпуска. При этом, в процессе сканирования, для каждой рабочей точки была перестроена оптика, с условием сохранения основных свойств, таких как: ахроматичность арок, одинаковость и значение бета-функций на участке охлаждения, величина и угол наклона горизонтальной бета-функции на участке инжекции, ограничение максимальных значений бета-функций, т.е. сохранение акцептанса. После этого для каждой точки была произведена компенсация связи и хроматизма. Однако, сканирование показало наличие большого числа резонансов, приводящих к потерям частиц. Отдельные области устойчивости колебаний являются недостаточно широкими,

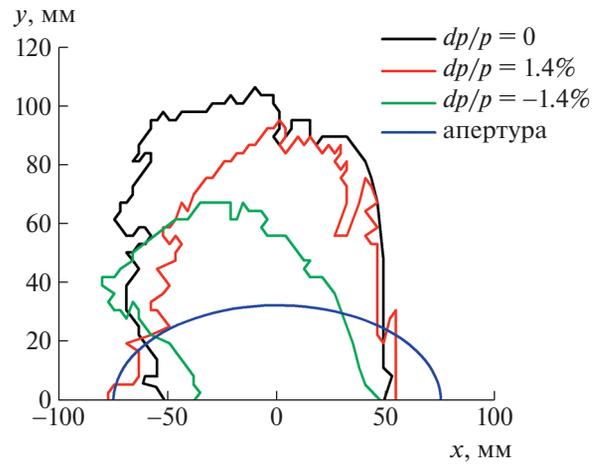


Рис. 6. Динамическая апертура с двумя секступольными семействами.

что необходимо, принимая во внимание большой разброс бетатронных частот в пучке в связи с эффектами пространственного заряда. Такие результаты обусловлены тем, что хроматические секступоли, расположенные не оптимально, возбуждают ряд опасных резонансов низкого порядка, классификация которых приведена в табл. 3.

Моделирование динамической апертуры выполнялось с помощью программного комплекса MAD-X [10] с использованием алгоритма симплектического трекинга РТС (Polymorphic tracking code).

ПОДАВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ РЕЗОНАНСОВ

Для обеспечения достаточно большой области устойчивого движения было предложено разработать схему подавления наиболее опасных резонансов, возбуждаемых хроматическими секступолями. Такое решение обусловлено также тем, что другое размещение хроматических секступолей в арках невозможно. Подавление опасных резонансов осуществлялось по следующей схеме: хроматические секступоли в арках были разделены на четыре семейства, дополнительные семейства были организованы из резонансных секступолей и секступолей, установленных на краях промежутка электронного охлаждения. Таким образом, схема включает шесть секступольных семейств, каждое из которых содержит по две секступольных линзы для сохранения симметрии

Таблица 3. Опасные резонансы

Порядок теории возмущений	Резонансы		
	1	$3v_x$	$2v_y + v_x$
2	$2v_x + 2v_y$	$4v_x$	$4v_y$

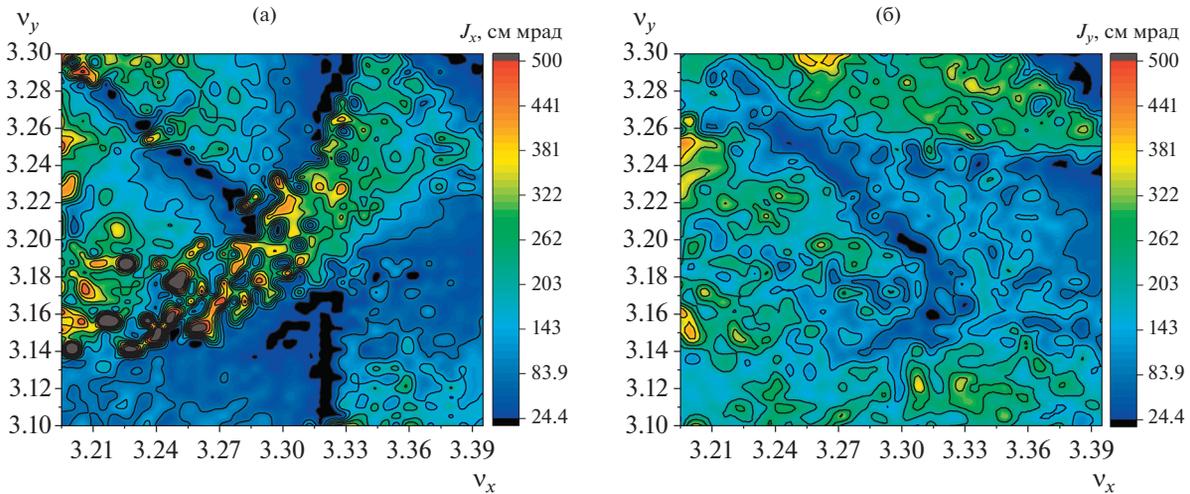


Рис. 7. Зависимость горизонтальной (а) и вертикальной (б) сепаратрисы устойчивого движения в зависимости от рабочей точки для двух секступольных семейств.

кольца. В предложенной схеме пришлось отказаться от разделения секступолей по функциям, т.е. хроматические секступоли не только компенсируют хроматизм, но и используются для подавления резонансов.

Подавление резонансов необходимо производить в широкой области частот из-за наличия довольно большого пространственного заряда. Таким образом, было принято решение равномерно уменьшать амплитуды опасных резонансов.

Гамильтониан, в приближении изолированного резонанса $n_x v_x + n_y v_y = n$, в пределе малой отстройки $\epsilon = n_x v_x + n_y v_y - l$, в переменных действие – фаза, с временной переменной θ (азимутальный угол), согласно [11], выглядит следующим образом:

$$H(J_x, J_y, \psi_x, \psi_y, \theta) = J_x v_x + J_y v_y + \frac{1}{2} \sum_N \sum_{i_1+i_2+i_3+i_4=N} h_{i_1 i_2 i_3 i_4} J_x^{(i_1+i_2)/2} J_y^{(i_3+i_4)/2} e^{i w(\psi_x, \psi_y, \theta)}, \quad (1)$$

где $w = (i_1 - i_2)\psi_x + (i_3 - i_4)\psi_y - l\theta$, причем $|w| \ll 1$.

Для проведения оценки отбросим члены, которые не зависят от угловой переменной, другими словами, дающие лишь сдвиг частоты. Лока-

лизация поперечной связи в промежутке, где нет секступольных линз, и отсутствие косых секступолей позволяют значительно упростить задачу. Таким образом, для опасных резонансов первого и второго порядка теории возмущений, гамильтониан может быть переписан следующим образом:

$$H(J_x, J_y, \psi_x, \psi_y, \theta) = J_x v_x + J_y v_y + |h_{i_1 i_2 i_3 i_4}| J_x^{(i_1+i_2)/2} J_y^{(i_3+i_4)/2} \cos(w(\psi_x, \psi_y, \theta)). \quad (2)$$

Пользуясь интегралом движения $J_x n_y + J_y n_x = \text{const}$, можно перейти к одномерному гамильтониану в переменных J_x, w :

$$H(J_x, w) = J_x \epsilon + (i_1 - i_2) \left(\frac{i_3 - i_4}{i_1 - i_2} \right)^{(i_3+i_4)/2} |h_{i_1 i_2 i_3 i_4}| J_x^{\frac{N}{2}} \cos(w), \quad (3)$$

причем $N = 3$ для первого порядка теории возмущений, $N = 4$ – для второго.

Уравнение (1) использовалось для определения области устойчивости колебаний для одномерных резонансов, а уравнение (3) использовалось для резонансов связи. В предположении, что область устойчивости рабочей точки должна быть не менее $J_x = J_y = 30 \text{ см} \cdot \text{мрад}$, были получены ограничения на гармоники опасных резонансов, представленные в табл. 4. Компенсация резонансов проводилась путем минимизации методом градиентного спуска одновременно всех гармоник опасных резонансов с весами, равными соответствующим ограничениям, сохраняя при этом полностью скомпенсированный хроматизм кольца.

Проведением процедуры компенсации резонансов в каждой рабочей точке, были построены сепаратрисы по вертикальному и горизонтальному действию в пространстве бетатронных частот

Таблица 4. Ограничения на гармоники опасных резонансов

Резонанс	Гармоника	Ограничение
$3v_x$	$ h_{3000} $	$1.5 \text{ м}^{-1/2}$
$2v_y + v_x$	$ h_{1020} $	$8 \text{ м}^{-1/2}$
$2v_x + 2v_y$	$ h_{2020} $	0.8 м^{-1}
$4v_x$	$ h_{4000} $	75 м^{-1}
$4v_y$	$ h_{0004} $	83 м^{-1}

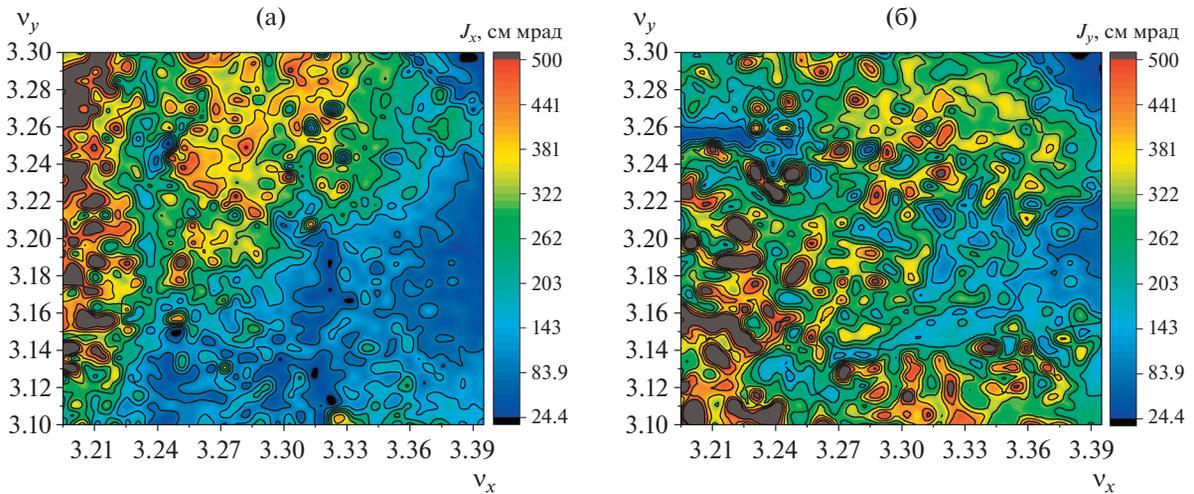


Рис. 8. Зависимость горизонтальной (а) и вертикальной (б) сепаратрисы устойчивого движения в зависимости от рабочей точки для шести секступольных семейств.

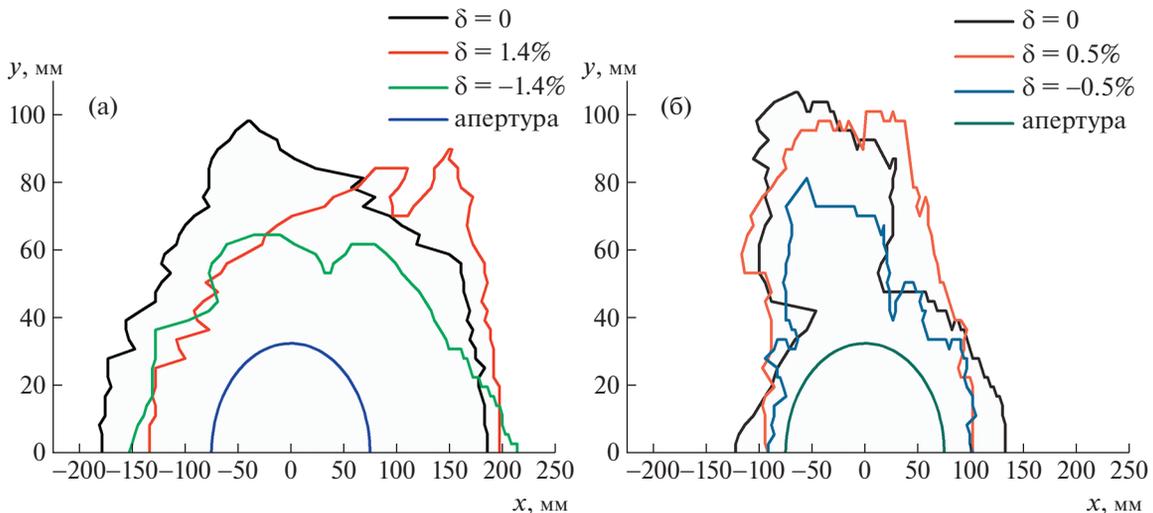


Рис. 9. Динамическая апертура с шестью секступольными семействами (а) без нелинейностей основных магнитов (б) с расчетными нелинейностями основных магнитов.

(рис. 8). При этом, сканирование по частотам проводилось в такой же выше описанной последовательности. Видно, что предложенная схема компенсации резонансов позволяет значительно увеличить область динамической устойчивости пучка.

Динамическая апертура, построенная для схемы с шестью секступольными семействами в точке $v_x = 3.255$, $v_y = 3.2$, выбранной по результатам расчетов для инжекции и ускорения, представлена на рис. 9а. Рассчитанная динамическая апертура стала заметно больше геометрической, что подтверждает работоспособность метода.

Для выбранной рабочей точки в модель были добавлены расчетные нелинейности основных магнитов и нелинейные поля от вихревых токов, индуцированных в стенках камеры дипольных магнитов при ускорении. Результирующая динамическая апертура представлена на рис. 9б, а сепаратрисы по вертикальному и горизонтальному действию представлены на рис. 10. Видно, что дополнительные расчетные возмущения значительно влияют на динамику частиц с равновесной энергией. Возбуждается резонанс $v_x = n/3$ и становится значительным влияние интерференции $v_x = n/3$ и $2v_y - v_x = n$. В то же время, при учете

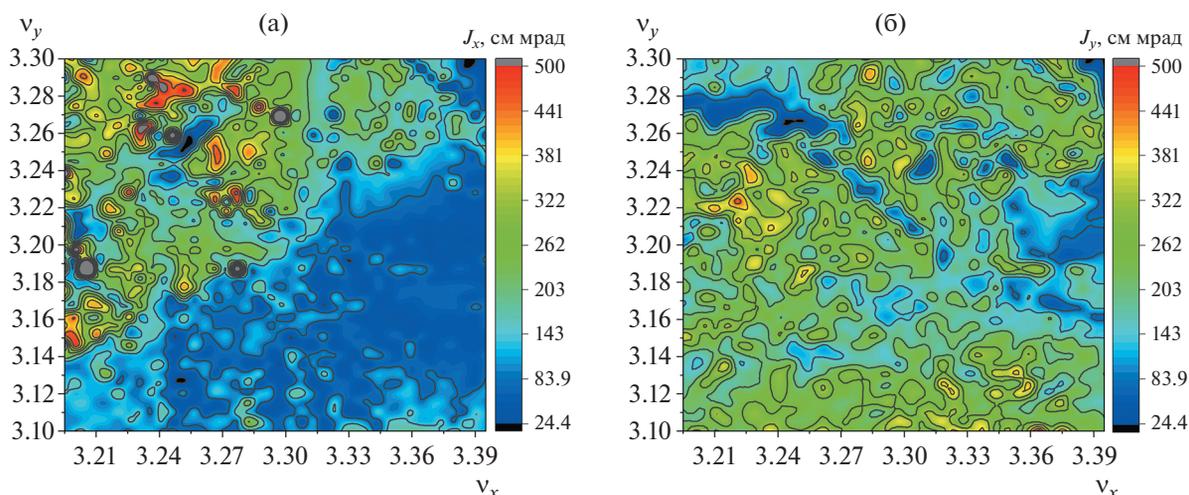


Рис. 10. Зависимость горизонтальной (а) и вертикальной (б) сепаратрисы устойчивого движения в зависимости от рабочей точки для шести секступольных семейств с нелинейностями основных магнитов и вихревыми токами в стенках вакуумной камеры, рассчитанными на энергии инжекции.

возмущений значительно уменьшается энергетический акцептанс (см. рис. 9б). Тем не менее, приведенные расчеты показывают достаточную эффективность работы предложенной схемы подавления резонансов, и рассчитанная динамическая апертура больше геометрической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе рассмотрены аспекты, влияющие на поперечную динамику движения ионного пучка в синхротроне с электронным охлаждением, без учета эффектов пространственного заряда. Для локальной компенсации линейной связи, возбуждаемой магнитным полем установки электронного охлаждения выбрана оптимальная схема, содержащая пару триплетов скью-квадрупольных линз. Была рассчитана вертикальная дисперсия, создаваемая магнитным полем тороидов, и оптимизирована оптика для ее минимизации.

В результате исследования динамической апертуры синхротрона было выяснено, что схема с двумя секступольными семействами не обеспечивает необходимую динамическую апертуру. Был проведен анализ динамической апертуры методом сканирования и выявлены опасные резонансы, ограничивающие динамическую апертуру.

Для счетного числа резонансов низкого порядка предложена схема с их одновременным равномерным подавлением, с использованием 6 семейств секступольных линз. Резонансы подавлялись равномерно для того, чтобы максимально расширить динамическую апертуру в окрестности рабочей точки. По результатам расчетов была определена рабочая точка для инжекции и ускорения,

позволяющая легко перестроиться для медленного выпуска. Было показано, что нелинейности основных магнитов и поля вихревых токов в стенках камеры диполя являются значительным фактором, влияющим на энергетический акцептанс. Тем не менее, указанные возмущения не привели к сжатию динамической апертуры меньше геометрической. Таким образом, предложенная схема подавления резонансов показала достаточную эффективность.

В дальнейшем необходимо повторить расчеты динамической апертуры с учетом измеренных нелинейностей основных магнитов. Кроме того, отдельной сложной задачей является расчет влияния эффектов пространственного заряда на динамику ионного пучка низкой энергии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Steck M., Groening L., Blasche K., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2000. V. 441. P. 175.
2. Bisoffi G., et al. // Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf.: Accelerator Science and Technology. 1989. V. 1. P. 49.
3. Bryzgunov M.I., Bubley A.V., Denisov A.P., et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. P. 758–761.
4. Tranquille G., Chanel M., Carly Ch., et al. // Proc. Conf. RuPAC-2006 – 20th Russian Conf. Charged Particle Accelerators. 2006. P. 25–27.

5. Yang X.D., Zhao H.W., Xia J.W., et al. // AIP Conf. Proc. 2001. V. 600. P. 186.
6. Parkhomchuk V.V., Skrinsky A.N. // Rep. Prog. Phys. 1991. V. 54 (7). P. 919–947.
7. Peggs S. // Part. Accel. 1982. V. 12. P. 219.
8. Steffen K. DESY-HERA-82-11. 1982.
9. Nikitin S.A., Protopopov I.Ya. BUDKER-INP-1999-44. 1999.
10. Sk P., Schmidt F., de Maria R. // Proc. Conf. ICAP06. 2006.
11. Guignard G. CERN-78-11. 1978.

Dynamic Aperture of Synchrotron with Electron Cooling

D. M. Popov^{1, 2, *}, V. A. Vostrikov^{1, 2, **}, and M. F. Blinov¹

¹*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: d.m.popov@inp.nsk.su*

***e-mail: v.a.vostrikov@inp.nsk.su*

Abstract—The heavy ion facility for technological applications is developed at the Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. The booster synchrotron with electron cooling is one of the main parts of the facility. This work presents the beam dynamics simulation with betatron coupling and nonlinearities of the guided magnetic field. The transverse betatron coupling excited by electron cooling solenoid was compensated by the pair of skew quadrupole triplets with antisymmetric supply and located symmetrically relative to the solenoid center. The calculation of the vertical dispersion excited by the magnetic field of toroidal sections of the electron cooler was performed. The accelerator lattice was optimized for minimization of vertical dispersion. Another important factor of the beam dynamics is the tune dependence versus momentum deviation called chromaticity. To correct chromaticity, sextupole magnets are applied. On the other hand, sextupoles excite nonlinear resonances that can lead to significant limitation of the dynamic aperture. The dynamic aperture of the synchrotron was simulated by scanning of horizontal and vertical tunes in conditions of chromaticity and betatron coupling suppression. This method makes it possible to identify dangerous resonances. According to the calculations presented, a scheme with application of six sextupole families are developed. This scheme makes it possible to significantly reduce the influence of most dangerous resonances. The wide area of tunes with a fairly large dynamic aperture for particles with required momentum spread was found in simulations. Selection of the operating point in this particular area makes it possible to reduce the space charge effect on the dynamic aperture. At the chosen operating point, the influence of eddy currents and magnetic fields nonlinearities on the dynamic aperture was investigated.

Keywords: synchrotron, electron cooling, dynamic aperture