

Алексахин Ю. Ч.

СЗ45а

5931/87



Б1-9-87-573

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-87-573

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1987

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Отдел новых методов ускорения

Ю.И.Алексахин

Б1-9-84-573

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ЭЛЕКТРОННО-КОЛЬЦЕВОЙ ТЕХНИКИ

Копия поступила
в издательский отдел
.. 21 --- 07 1987

г. Дубна, 1987 год.

ВВЕДЕНИЕ

Под электронно-кольцевой техникой ниже подразумеваются устройства, в процессе функционирования которых электронные кольца перемещаются, как единое целое.

В первой части работы обсуждены возможные приложения таких устройств, а именно:

- 1) коллективное ускорение ионов до низких энергий (≤ 20 МэВ/нуклон при интенсивности: уран $\approx 10^{14}$ ядер/сек, дейтерий $\approx 10^{17}$ сек⁻¹;
- 2) коллективное ускорение ионов до средних энергий (100÷200 МэВ/нукл при интенсивности $\sim 10^{13}$ ядер/сек по урану;
- 3) получение голых ядер тяжёлых элементов;
- 4) эксперименты по электрон-нейтронному взаимодействию;
- 5) использование данных устройств как электронных ускорителей вместо ЛИУ и традиционных бетатронов, в частности, для:
 - а) генерации коротковолнового электромагнитного излучения (синхротронного, дифракционного, ондуляторного, тормозного)
 - б) генерации нейтронов;
- 6) атомная спектроскопия, исследование ион-ионных взаимодействий;
- 7) отработка на электронных моделях методов формирования мощных ионных колец для управляемого термоядерного синтеза.

Во второй части работы рассмотрена схема формирования электронных колец с параметрами, требуемыми для реализации указанных возможностей: число электронов $N_e \sim 10^{14}$, энергия 15 ÷ 100 МэВ, радиус в конечном состоянии 5 ÷ 10 см. Рассмотренная схема объединяет концепции пространственного бетатрона и статического компрессора электронных колец. Предложена программа поэтапного развития электронно-кольцевой техники.

В третьей части работы рассмотрены основные, по мнению автора, факторы, ограничивающие возможности адгезатора КУТИ-20, и предложены меры по ослаблению этих ограничений.

I. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-КОЛЬЦЕВЫХ УСТРОЙСТВ.

Конкретные значения параметров колец, фигурирующие в рассматриваемых ниже примерах, выбирались исходя из требований фокусировки и устойчивости колец /1/ (в первую очередь - относительно электрон-ионной дипольной неустойчивости - "змеяка"), а не из достигнутых к настоящему моменту практических результатов.

Условия устойчивости могут быть записаны в виде

$$\frac{r_0}{\mu a^2} N_e \cdot 10^{-13} \cdot Z \lesssim 1 \quad (I.I)$$

где r_0 - большой радиус кольца, a - радиус сечения, μ - релятивистский фактор электронов.

Условие устойчивости относительно эффекта отрицательной массы (самобанчировки) имеет вид (I.I) с Z равным максимальному значению отношения модуля так называемого продольного импеданса связи, взятого в единицах 120π Ом, к номеру азимутальной гармоники. В случае дипольных электрон-ионных колебаний Z является функцией фактора зарядовой нейтрализации, параметра загрузки (отношения полных масс ионов и электронов кольца) и показателя спада магнитного поля /1/.

Из соотношения (I.I) следуют законы подобия, используемые в дальнейшем.

I.I. Ускорение ионов до низких энергий.

Область применения ионов с энергиями $\sim 1 \div 20$ МэВ/нуклон чрезвычайно широка и общеизвестна /2,3/ (имплантация, поверхностная обработка материалов, фильтры и т.д.). Наиболее интересные проблемы - синтез сверхтяжелых элементов и электроядерный брифинг с использованием пучка дейтронов.

Во всех случаях требуется возможно большая интенсивность пучков и максимальный к.п.д. ускорителя (за исключением разве что установки для экспериментов по синтезу новых элементов). Ускорение в электронных кольцах предоставляет для этого уникальную возможность средняя интенсивность даже при весьма скромных параметрах колец, заложенных в проект КУТИ-20 /3/, оказывается выше, чем в циклотронах и линейных ускорителях, а главное - имеется специфический для колец способ ускорения в спадающем статическом магнитном поле, позволяющий достичь высокого к.п.д.

Еще на один - два порядка интенсивность ионного пучка может быть увеличена при многократном использовании электронных колец по схеме, предложенной в /4/ (см. рис. I).

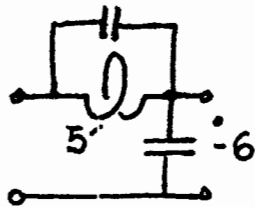
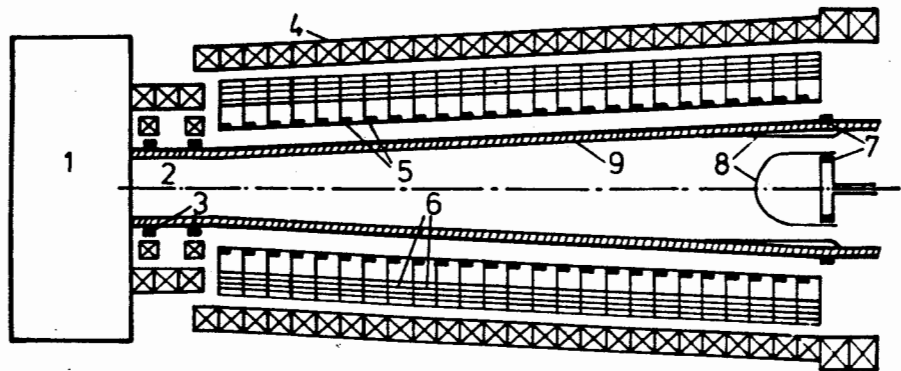


Рис. I. Схема челночного ускорителя: 1 - генератор электронных колец, 2 - "зал ожидания", в котором происходит накопление и обдирка ионов, 3 - стартовые витки, 4 - соленоид, 5 - витки и 6 - ёмкости искусственной замедляющей линии, возвращающей кольцо в исходное состояние после разделения электронов и ионов в поле отражающих витков 7, 8 - дополнительные экраны "белые колесо", 9 - вакуумная трубка с анизотропно - проводящим покрытием.

Отметим здесь существенные моменты, на которых в этой работе не было заострено внимание.

1) После сброса ионов кольцо возвращается в исходное состояние под действием токового импульса в искусственной линии задержки, в полной аналогии с работой "высокоциклического компрессора" электронных колец ^{/5/}. При этом может показаться, что повторная накачка энергии в уже использованное кольцо ничего не даёт по сравнению с формированием нового кольца - и то и другое требует работы импульсной системы с одинаковой частотой. Однако, поскольку затраченная на ускорение ионов энергия не может превысить $\approx 50\%$ от первоначально запасенной в кольце вследствие резкого снижения допустимого темпа ускорения ^{*)}, к.п.д. однофазовой схемы уже оказывается ниже. Во-вторых, при возвращении кольца "магнитный поршень" должен совершать работу против существенно меньшего градиента статического поля, чем в компрессоре, и это позволяет получить более полную перекачку энергии из линии в кольцо. Понять это помогают следующие простые соображения, подтверждаемые более строгим анализом. Токи в линии являются суперпозицией токов, индуцируемых движущимся кольцом и возбуждаемых генератором. 100% - я передача энергии будет иметь место, если кольцо полностью гасит сигнал, идущий от генератора. Нетрудно увидеть, что действующая при этом на кольцо сила равна по величине (и противоположна по направлению) силе торможения, которое кольцо испытывало бы в отсутствие сигнала от генератора. Дальнейшее повышение действующей на кольцо силы неизбежно сопряжено с проигрышем в к.п.д.

Число "качаний" одного кольца ограничено, в основном, его разогревом при сбросе ионов. Для уменьшения скачка частоты колебаний электронов при сепарации предполагается использовать экраны "беличьего колеса" (рис.1, п.8). При проведении численных расчётов ^{/4/}, результаты которых показаны на рис.2, расстояние до экранов считалось неизменным. Очевидно, что если сближать экраны так, чтобы увеличение их фокусирующего действия компенсировало снижение ионной фокусиров-

^{*)} Использование внутреннего соленоида, создающего дополнительный магнитный поток ^{/6/}, позволило бы замедлить падение ускоряющей силы кольца и добиться большей передачи энергии ионам. Неясно, однако, как обеспечить механическую прочность и крепление такого соленоида при длине $10 \div 20$ м.

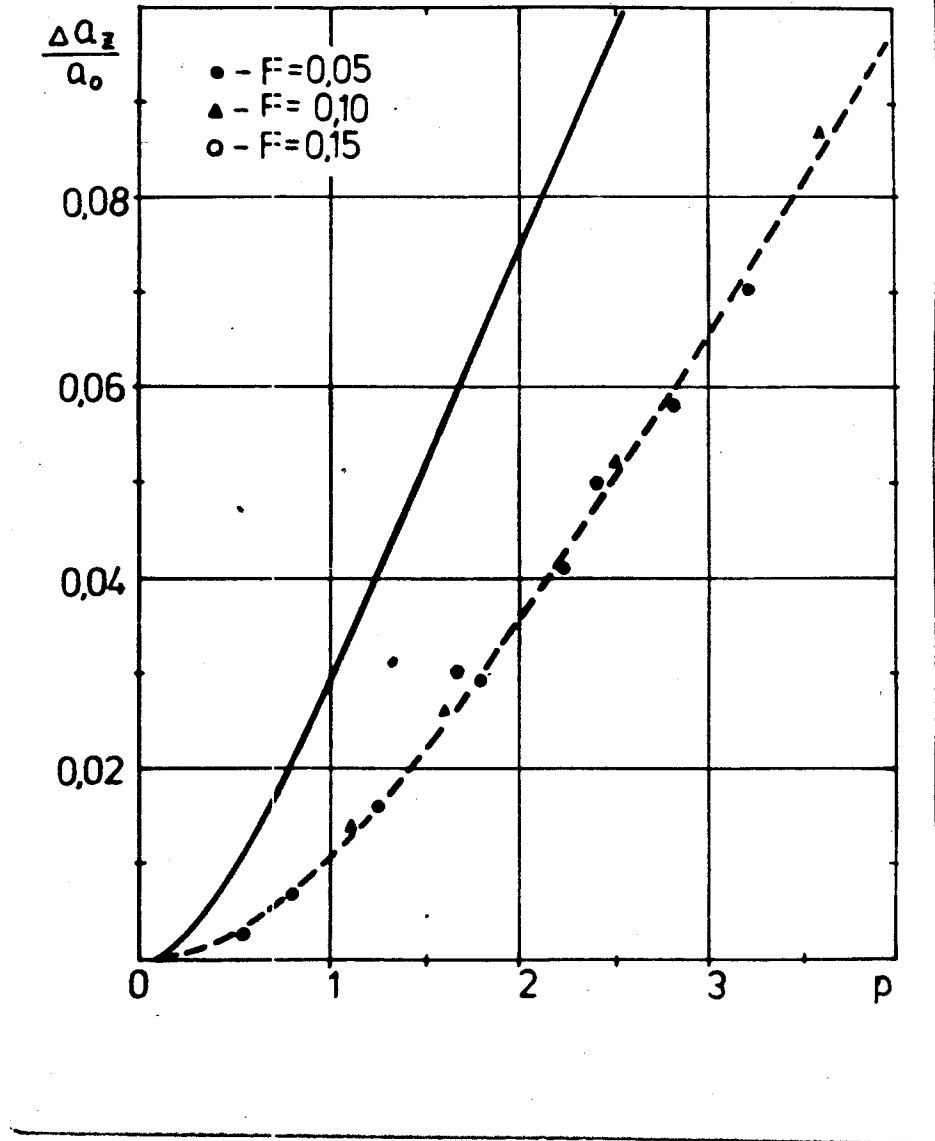


Рис.2. Необратимое увеличение аксиального размера электронного кольца при сепарации. Сплошная кривая - скачкообразное изменение магнитного поля, пунктирная - оптимальная геометрия магнитного поля. Аргумент $\rho = 6f \left(\frac{\Delta}{\pi a}\right)^2$. f - фактор зарядовой нейтрализации, Δ - расстояние между экранами.

ки по мере отделения ионов от кольца, то можно значительно уменьшить "встряску" электронов и увеличить допустимое число качаний. Для того, чтобы частота аксиальных колебаний электронов не падала резко при обратном движении от магнитной пробки (создаваемой витками 7, рис. I), отражение должно быть неупругим, что можно достичь выбором толщины и проводимости экранов.

3) При проведении численных оценок в /4/ за основу были взяты значения параметров электронных колец, заложенные в проект КУТИ-20 /3/. Однако эти значения определены принятым в /3/ способом формирования колец, а не какими-либо фундаментальными ограничениями. Так, условия устойчивости (I.I) допускают увеличение числа электронов N_e при одновременном увеличении радиуса кольца r_0 и отношения малого размера к радиусу a/r_0 как $r_0 \sim a/r_0 \sim N_e^{1/3}$, если фиксирована энергия электронов, или как $r_0 \sim a/r_0 \sim N_e^{1/4}$, если фиксирована напряжённость магнитного поля. При этом достигается:

- а) увеличение интенсивности ионного пучка ($\sim N_e$);
- б) ослабление абсолютных допусков на точность изготовления и установки узлов ускорителя (до $I \div 2$ мм при $N_e = 10^{14}$);
- в) уменьшение многократного рассеяния электронов на ионах вследствие снижения плотности;
- г) снижение потерь на синхротронное излучение (в первом случае);
- д) во втором случае - увеличение удерживающей ионы силы и, соответственно, уменьшение длины ускорителя как $N_e^{-1/4}$.

Приведём возможные параметры ускорителя ионов урана на энергию 20 МэВ/нуклон:

Число электронов в кольце	$N_e = 10^{14}$
Энергия электронов до ускорения ионов	$E_{in} = 15$ МэВ
Начальный радиус кольца	$r_{in} = 8$ см
Напряжённость магнитного поля на начальном участке	$B_{in} = 6,4$ кГс
Отношение радиуса сечения к большому радиусу	$a_{in}/r_{in} = 0,1$
Число ионов урана в кольце	$N_i = 1,65 \cdot 10^{11}$
Фактор зарядовой нейтрализации (при $Z/A = 0,08$)	$f = 3\%$
Длина ускорения	$l = 30$ м
Коэффициент передачи энергии ионам	$\eta = 0,5$
Конечный радиус кольца	$r_f = 16$ см

Подчеркнем, что закон спада магнитного поля и, соответственно, длина ускорения выбраны с учетом падения удерживающей ионы силы по мере расширения кольца. Поскольку для достижения зарядности ионов урана $Z = 18 + 19$ требуется время ≤ 1 мсек, возможна интенсивность ионного пучка на выходе $\sim 1,5 \cdot 10^{14}$ ядер/сек.

В случае легких элементов достижима существенно большая интенсивность. Рассмотрим в качестве примера ускорение дейтронов до энергии 40 МэВ :

Число электронов в кольце

Энергия электронов до ускорения

Начальный радиус кольца

Отношение малого радиуса к большому

Число дейтронов в кольце

Длина ускорения

Коэффициент передачи энергии

Конечный радиус кольца

$$\begin{aligned} N_e &= 10^{14} \\ E_{in} &= 15 \text{ МэВ} \\ r_{in} &= 10 \text{ см} \\ a_{in} / r_{in} &= 0,2 \\ N_i &= 2 \cdot 10^{13} \\ l &= 12,5 \text{ м} \\ \eta &= 0,5 \\ r_f &= 20 \text{ см} \end{aligned}$$

В соответствии с упрощенным расчётом (рис.3) возможно 100 - кратное использование каждого кольца. При частоте срабатывания генератора электронных колец 100 Гц получим интегральную интенсивность $2 \cdot 10^{17}$ дейтронов/сек. Напомним, что в соответствии со сделанным выше замечанием (2), предельная интенсивность в действительности может быть гораздо больше ($\sim 10^{18}$). В соответствии же с замечанием (1) можно надеяться на высокий к.п.д. устройства, что позволило бы его промышленное применение для электробридинга ядерного горючего.

1.2. Ускорение ионов до средних энергий (~ 200 МэВ/нуклон).

Круг вопросов, для решения которых необходимы интенсивные пучки ионов средних энергий, со всей полнотой освещён в /3/. Здесь упомянем лишь поиск фазовых переходов в ядерном веществе, существование которых открывало бы новые горизонты в ядерной технике, а также исследование мультинейтронных систем.

Для достижения таких энергий предложены способы ускорения электрон-ионных колец в

- 1) высокочастотных резонаторах /7/ ;
- 2) индукционных секциях /3/ ;
- 3) спиральном волноводе /8/ .

Процесс ускорения в таких структурах исследован недостаточно ж), и вопрос о выборе оптимальной остается открытым.

Начальный темп ускорения для приведенных в предыдущем подпункте параметров ускорителя ионов урана равен 1,35 МэВ/нуклон/м. Однако ввиду малой достижимой частоты срабатывания генератора электронных колец и ускоряющей системы (50 ÷ 100 Гц), время, затрачиваемое на обдирку ионов и, следовательно, отношение Z/A , определяющее допустимый темп ускорения, могут быть значительно увеличены, так что вполне реален темп ускорения 2 ÷ 3 МэВ/нуклон/м, а интенсивность пучка урана $\sim 10^{13}$ ядер/сек. Эти цифры на много порядков превосходят то, что может быть получено прямым ускорением ионов.

1.3. Получение голых ядер тяжёлых элементов - представляет интерес с точки зрения проверки квантовой электродинамики в области сверхсильных электрических полей /1,3/. Для полной обдирки тяжёлых элементов требуется значение параметра $n_e \tau$, где n_e - плотность электронов, τ - время экспозиции, порядка $n_e \tau = 5 \cdot 10^{12}$. Удержание в течение времени $\tau \gtrsim 0,1$ сек сопряжено с рядом труднорешаемых проблем /1/ - требуется высокий вакуум ($p < 10^{-10}$ Торр при достигнутом ныне $p > 10^{-8}$ Торр) для предотвращения перезарядки ионов на остаточном газе; уменьшение энергии электронов на синхротронное излучение делает проблематичной устойчивость кольца относительно когерентных возмущений. Возможное решение проблемы видится в получении максимальных плотностей электронов n_e , выполнении требований когерентной устойчивости за счёт высокой кинетической энергии электронов и компенсации потерь на синхротронное излучение наложением мощного ВЧ - поля.

Приведём возможный набор параметров, выбранный с учетом требований устойчивости электрон-ионных дипольных колебаний в поле с малым показателем спада и азимутальной модуляции кольца при максимальном продольном импедансе /1/ $|Z_{\parallel}/\ell|_{max} = 40$ Ом :

Число электронов

Большой радиус кольца

$$N_e = 10^{14}$$

$$r_0 = 4 \text{ см}$$

ж) Простой приближённый метод анализа взаимодействия нерелятивистски движущегося кольца с радиальными линиями, пригодный как в случае индукционных секций, так и в случае резонаторов, приведен в /9,10/.

Малый радиус кольца	$a = 1,8$ мм
Плотность электронов	$n_e = 4 \cdot 10^{13}$ см ⁻³
Энергия электронов	$\mathcal{E} = 60$ МэВ
Индукция магнитного поля	$B = 5$ Тл
Фактор нейтрализации при $Z/A = 0,4$	$f = 5 \cdot 10^{-3}$
Интегральная мощность потерь на синхротронное излучение	$W = 0,54$ МВт
Допустимый темп ускорения	20 МэВ/нуклон·м

Требуемое значение $n_e \tau$ достигается за время $\tau = 0,1$ сек, что допускает частоту следования 10 Гц и интенсивность пучка ядер, ядер, например, ксенона, $\sim 10^{11}$ сек⁻¹.

Заметим, что банчировка электронов внешним ВЧ - полем повышает продольную устойчивость кольца /II/, так что допустима, по-видимому, и более низкая энергия электронов.

1.4. Электрон - нейтронное рассеяние.

Кольца с приведенными в предыдущем пункте параметрами предоставляют любопытную возможность исследования прямого электрон-нейтронного взаимодействия /I2/. Тепловые нейтроны из импульсного реактора, дающего поток $\sim 10^{17}$ нейтронов/см²·сек в импульсе длительностью 100 мксек, при рассеянии на них ультрарелятивистских электронов приобретают энергию до 8 МэВ и могут быть достаточно эффективно зарегистрированы по пороговым ядерным реакциям. При сечении взаимодействия $d\sigma/d\Omega = 5 \cdot 10^{-32}$ см²/стерад число рассеянных нейтронов составит ~ 10 нейтронов/стерад за импульс, что вполне достаточно для проведения эксперимента.

1.5. Использование генераторов электронных колец как ускорителей электронов.

Генераторы электронных колец, о которых подробнее пойдет речь в следующем разделе, являются альтернативой ЛИУ и бетатронам. Уступая ЛИУ по интенсивности (рекордным параметрам ускорителя АТА: число электронов в импульсе $N_e \approx 3 \cdot 10^{15}$ при энергии 50 МэВ и средней частоте следования до 50 Гц), они имеют сравнимый или даже более высокий к.п.д., обеспечивают лучшую моноэнергетичность, а главное - имеют несравнимо меньшие габариты. По сравнению с бетатронами они проигрывают в компактности, но могут обеспечить существенно более высокие к.п.д. и цикличность, конечную энергию электронов и их число. Смещение кольца при ускорении облегчает вывод электронов из

устройства ; (например, возможен вывод электронов вдоль оси за счёт перевода азимутальной скорости в продольную, не требующий никаких дополнительных устройств). Кроме этого, оно позволяет вводить электроны во взаимодействие с различными структурами (ондуляторами, дифракционными решётками) лишь после того, как достигнута конечная энергия, избегая тем самым преждевременного ухудшения параметров кольца.

Генераторы электронных колец способны решить большое число важных народнохозяйственных задач, для которых сейчас применяют бетатроны и линейные резонансные ускорители - разрушение горных пород, гамма и рентгенография, дезинсекция сельскохозяйственных продуктов, обеззараживание сточных вод, технология материалов, генерация нейтронов и т.д. Весьма интересной представляется возможность создания кольцевых лазеров на свободных электронах /13,14/ и генераторов дифракционного излучения. Отметим очевидные преимущества использования колец вместо линейных пучков: значительно легче осуществить режим генерации, а не усиления ; существенно большее время взаимодействия позволяет генерировать более коротковолновое излучение без уменьшения к.п.д. ; возможно значительное увеличение длительности сигнала за счёт высокочастотной подкачки энергии в кольцо .

1.6. Атомная физика.

Исследования в области физики атомов и ионов, которые могут быть осуществлены с помощью электронных колец даже умеренной интенсивности, обсуждены в /3/. Здесь же отметим предложенное в работе /15/ ускорение встречных ионных пучков в сжимающихся электронных кольцах. При конечных значениях параметров колец, приведенных в п.1.3 , достижимы светимости $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ при энергии столкновения до сотен кэВ/нуклон.

1.7. Формирование ионных колец.

В настоящее время активно разрабатываются способы формирования интенсивных ионных колец (число ионов до 10^{17}) для управляемого термоядерного синтеза /16/. Предложено несколько схем УТС с использованием ионных колец /16/, наиболее интересной по-прежнему представляется идея "Астроны". Экспериментально уже получены протонные кольца, обращающие магнитное поле и пригодные, следовательно, для удержания термоядерной плазмы. Основной задачей является увеличение времени жизни таких колец, которое, при наличии плотной плазмы,

ограничивается многократным рассеянием протонов и развитием коллективных неустойчивостей. Повысить устойчивость колец и снизить рассеяние протонов можно за счёт существенного увеличения их энергии (до 100 МэВ и более). Последующая компрессия позволит получить реверс при меньших токах колец, что также повысит их устойчивость.

Таким образом методы формирования электронных колец, о которых пойдёт речь ниже, могут помочь решить проблему УТС, если удастся довести энергозатрат в кольцо до уровня > 1 МДж.

Суммируя сказанное, можно сделать вывод, что электронно-кольцевая техника способна обеспечить прогресс практически на всех прикладных направлениях, и дать эффективный инструмент для фундаментальных исследований в области низких и средних энергий.

2. СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕЦ.

Для реализации описанной в первой части работы возможностей необходимо устройство для формирования электронных колец, удовлетворяющее требованиям:

Число электронов в кольце	$N_e \sim 10^{14}$
Энергия электронов	$\mathcal{E} = 10 \div 100$ МэВ
Частота срабатывания	≈ 100 Гц
Магнитная индукция в конечном состоянии	до 10 Тл
К.п.д. на уровне десятков %	

Очевидно, принятая в настоящее время схема компрессии электронных колец /1,3/ не в состоянии обеспечить такие характеристики.

Более перспективна высказанная в /17,18/ идея компрессии в статическом магнитном поле (см. также /1/), позволяющая "вталкивать" электронные кольца в сильное статическое магнитное поле с высокой частотой следования. Однако этой схеме в её первоначальном виде присущ ряд серьёзных недостатков /1/, связанных с тем что движение в статическом поле не сопровождается набором энергии:

1) для устойчивости кольца с большим N_e необходим инжектор на энергию в десятки МэВ, частота срабатывания которого и к.п.д. вряд ли могут отвечать поставленным требованиям;

2) амплитуды бетатронных колебаний уменьшаются $\sim \sqrt{r_0}$, что не позволяет достичь высоких плотностей и больших ускоряющих напряжений.

В работе /5/ предложена гибридная схема - "поршень", создаваемый локализованным в пространстве импульсным магнитным полем небольшой напряжённости, заталкивает кольцо на "горку" квазидиорез-

ного по радиусу статического магнитного поля. Размеры кольца и энергия электронов изменяются приблизительно также, как в динамических адгезаторах /1/ (в частности, $\gamma r_0 \approx const$, где γ - релятивистский фактор). Сочетая, в принципе, достоинства и динамических, и статических адгезаторов, эта схема имеет и ряд недостатков, ограничивающих её возможности и затрудняющих её реализацию:

1) в соответствии с зависимостью $\gamma_f \approx \gamma_i r_i / r_f$, для получения больших конечных значений энергии электронов (γ_f), требуется либо значительная энергия инжекции (γ_i), либо большие начальные радиусы r_i (конечный радиус r_f считаем фиксированным), что влечёт за собой увеличение всех габаритов установки;

2) ввиду значительной пространственной неоднородности импульсного поля ($\vec{V}_2^f \neq V_2^i$) коэффициент $\rho = r_0 / V_2 \cdot \partial V_2 / \partial z$ отличен от нуля, несмотря на равенство $\partial \vec{V}_2 / \partial z = 0$ для суммарного поля, вследствие этого условие устойчивого движения центра кольца /5/

$$n(1-n) > \rho^2 \quad (2.1)$$

где $n = -r_0 / V_2 \cdot \partial V_2 / \partial r$ заставляет снижать градиент статического поля $\partial V_2^{st} / \partial z$, что также ведёт к удлинению установки;

3) для сохранения эффективности взаимодействия кольца с линией, расстояние между ними по мере сжатия должно уменьшаться $\sim r_0$, во избежание неоднородности импульсного поля также должен уменьшаться и шаг между витками, в результате линия оказывается сильно неоднородной, что неудобно из технологических соображений и приводит к отражению значительной части энергии импульса, снижая к.п.д.

Можно предложить следующую схему компрессии свободную от перечисленных недостатков: на первом этапе электронное кольцо, образованное многооборотной инжекцией и имеющее значительную аксиальную протяжённость, ускоряется в пространственном бетатроне /19/. Радиус кольца остается при этом приблизительно постоянным. По достижении конечной энергии электроны попадают в статический адгезатор /18/ и происходит компрессия кольца по радиусу. Очевидно, в таком устройстве нет жесткой связи между радиусом и энергией электронов, и энергия инжекции может быть сделана настолько низкой, насколько это позволяют требования устойчивости.

2.1. Пространственный бетатрон.

Схема установки показана на рис.3. Отметим существенные моменты в её работе.

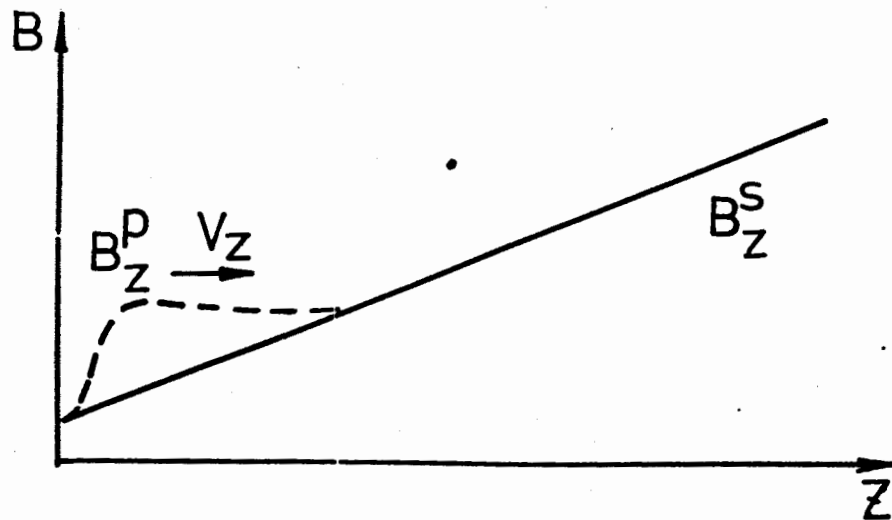
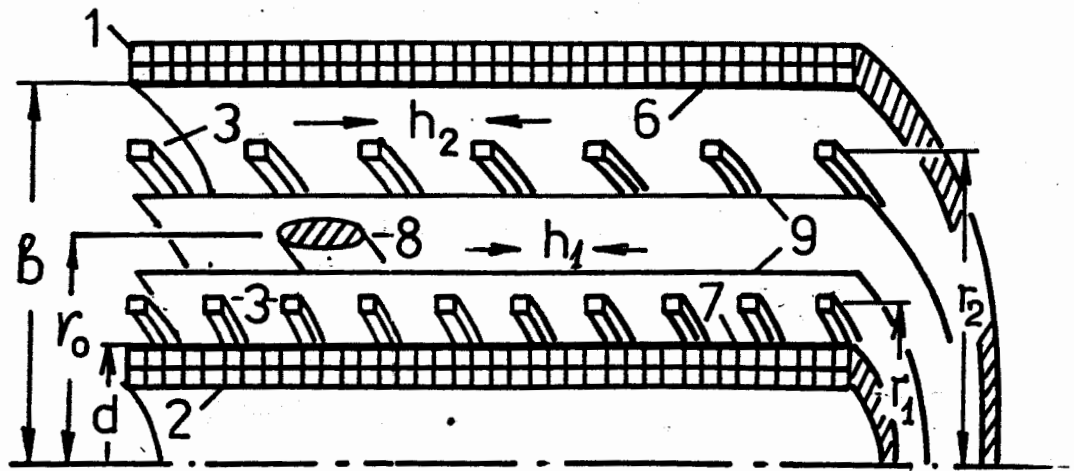


Рис.3. Пространственный бетатрон: 1 - наружный, 2 - внутренний соленоиды; 3 - витки искусственных замедляющих линий, 6,7 - проводящие экраны, 8 - электронное кольцо, 9 - вакуумная камера.

1. Для ослабления эффектов, связанных с собственными полями кольца, при низких энергиях инжекции желательна его максимальная протяжённость в z - направлении (так что поначалу это не кольцо, а Е - слой). Это позволяет использовать многооборотную инжекцию, так что необходима небольшая величина тока инжекции.

2. Для того, чтобы при значительной протяженности обеспечить достаточно малый фазовый объём, необходимо, очевидно, минимизировать аксиальную скорость электронов. Для рассмотренных в первом разделе приложений требуется $\gamma_i \beta_z a_z \approx 2$ см, где a_z - аксиальный полуразмер. Например, при $\gamma_i = 4$, $a_z = 10$ см имеем $\beta_z = 5 \cdot 10^{-2}$. Соответственно, требуется обеспечить постоянство суммарного магнитного поля с точностью не хуже

$$|\Delta B_z / B_z| \leq \beta_z^2 / 2 \quad (2.2)$$

3. Противоречие между требованием устойчивости движения центра кольца (2.1), сводящимся к ограничению на величины первой и второй производных суммарного поля, и требованием максимального градиента статического поля для сокращения длины установки, будет устранено, если градиент импульсного поля скомпенсирует градиент статического, так чтобы для суммарного поля выполнялось условие (2.2). Электроны, инжектированные на "полку" суммарного поля, поднимаются на ней, как на ступеньке эскалатора.

4. Наиболее серьезные ограничения требование (2.1) накладывает на начальном этапе ускорения. По мере продвижения кольца в растущее статическое поле допустимы всё большие значения градиента суммарного поля и выполнение бетатронного условия для импульсного поля становится необязательным. Это позволяет оборвать внутреннюю линию, осуществив перед тем за счет изменения параметров линий перекачку энергии из внутренней линии во внешнюю.

Приведём для иллюстрации возможные значения основных параметров бетатрона на энергию 100 МэВ /19/:

Радиус орбиты

Энергия инжекции

Число электронов

Набор энергии

Скорость перемещения кольца

$$r_0 = 60 \text{ см}$$

$$E_i = 1,5 \text{ МэВ}$$

$$N_e = 10^{14}$$

$$23 \text{ МэВ/м}$$

$$\beta_z = 3,5 \cdot 10^{-5}$$

Параметры линий:	внутренней	внешней
Шаг	4 см	6 см
Радиус витков	50 см	74,5 см
Пиковое напряжение	30 кВ	30 кВ
Пиковый ток	7,2 кА	10,4 кА
Ёмкости конденсаторов	0,9 мкФ	2,0 мкФ

Энергия, запасённая в импульсе треугольной формы со временем нарастания и спада 45 мксек, составляет 16 кДж, конечное значение суммарной энергии электронов - 1,6 кДж.

2.2. Статический адгезатор.

Основная идея компрессии кольца в статическом поле сводится к обеспечению на выбранной траектории $r(z)$ условия безразлично-го равновесия

$$n(1-n) = \rho^2 \quad (2.3)$$

где ρ и n - те же величины, что и в (2.1).

Когерентная фокусировка движения кольца вдоль траектории, таким образом, отсутствует. Фокусировка некогерентных колебаний электронов может быть обеспечена с помощью зарядовых изображений в стенках камеры. Вследствие неточности изготовления обмоток могут образоваться локальные "ямы". Чтобы кольцо не застряло в них, предложено два варианта:

1) кольцо предварительно разгоняется на участке со спадающим полем до скорости, удовлетворяющей условию (2.2), в котором левую часть следует понимать как относительную ошибку, и затем по инерции проходит участок с нарастающим статическим полем /17/;

2) импульсом тока небольшой величины в витках замедляющей линии создаётся магнитная потенциальная яма, сопровождающая кольцо /18, без совершения над ним работы.

Тангенс угла наклона траектории кольца даётся, с учётом (2.3), формулой

$$\frac{dr}{dz} = -\frac{\rho}{1-n} = -\sqrt{\frac{n}{1-n}} \quad (2.4)$$

так что углу $\pi/4$ соответствует показатель спада $n = 0,5$.

Если в конечном состоянии кольцо находится в однородном поле ($\overline{B_{zf}} = B_{zf}$) на радиусе r_f , то как в бетатроне, так и в адгезаторе должны выполняться соотношения

$$B_z = B_{zf} \frac{r_f}{r} \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\rho_f^2 - 1}} \quad (2.5)$$

$$\overline{B}_z = 2B_z \left(1 - \frac{r_f}{2r} \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2 - 1}} \right)$$

В частности, на участке компрессии, где $\gamma = \gamma_f$, должно быть

$$\overline{B}_z / B_z = 2(1 - r_f / 2r) \quad (2.6)$$

В работа /18/ приведен пример расчёта, показывающий выполнимость условий (2.3), (2.6).

Отметим важное свойство статической компрессии, привлекательное с точки зрения формирования обращаемых поле ионных колец для УТС: по мере сжатия собственное магнитное поле растёт как

$$|B_{self}| \sim \frac{I}{r} \sim \frac{1}{r^2} \sim B_{ext}^2$$

соответственно увеличивается диамагнитная сила кольца:

$$\xi = |B_{self} / B_{ext}| \sim B_{ext} \quad (2.7)$$

Можно поэтому предлагаемую здесь схему пространственный бетатрон + статический адгезатор применить и для этих целей. Добавим, что в соответствии со сказанным в п.1.1., большая величина тока в зарядово - нейтрализованном ионном кольце ($\sim 10^5$ А на бетатронном участке) позволит обеспечить высокий к.п.д. устройства.

2.3. Примерная программа работ.

Можно предложить следующий путь развития электронно-кольцевой техники, состоящий из трёх основных этапов (рис.4).

Первый этап включает создание пространственного бетатрона на энергию 15÷30 МэВ (нижний предел соответствует энергии, требуемой в челночном ускорителе п.1.1, верхний - планируемой энергии ЛИУ-30 /20/). Помимо проверки основной концепции, на этом устройстве можно провести эксперименты по:

- 1) устойчивости кольца относительно банчирования при различных значениях продольного импеданса ;
- 2) устойчивости электрон - ионных дипольных колебаний в зависимости от показателя спада поля, фактора нейтрализации и других параметров ;
- 3) влиянию принудительной модуляции тока кольца на его устойчивость ;
- 4) генерации коротковолнового излучения при взаимодействии с различными структурами ;
- 5) выводу пучка с использованием лазерной техники.

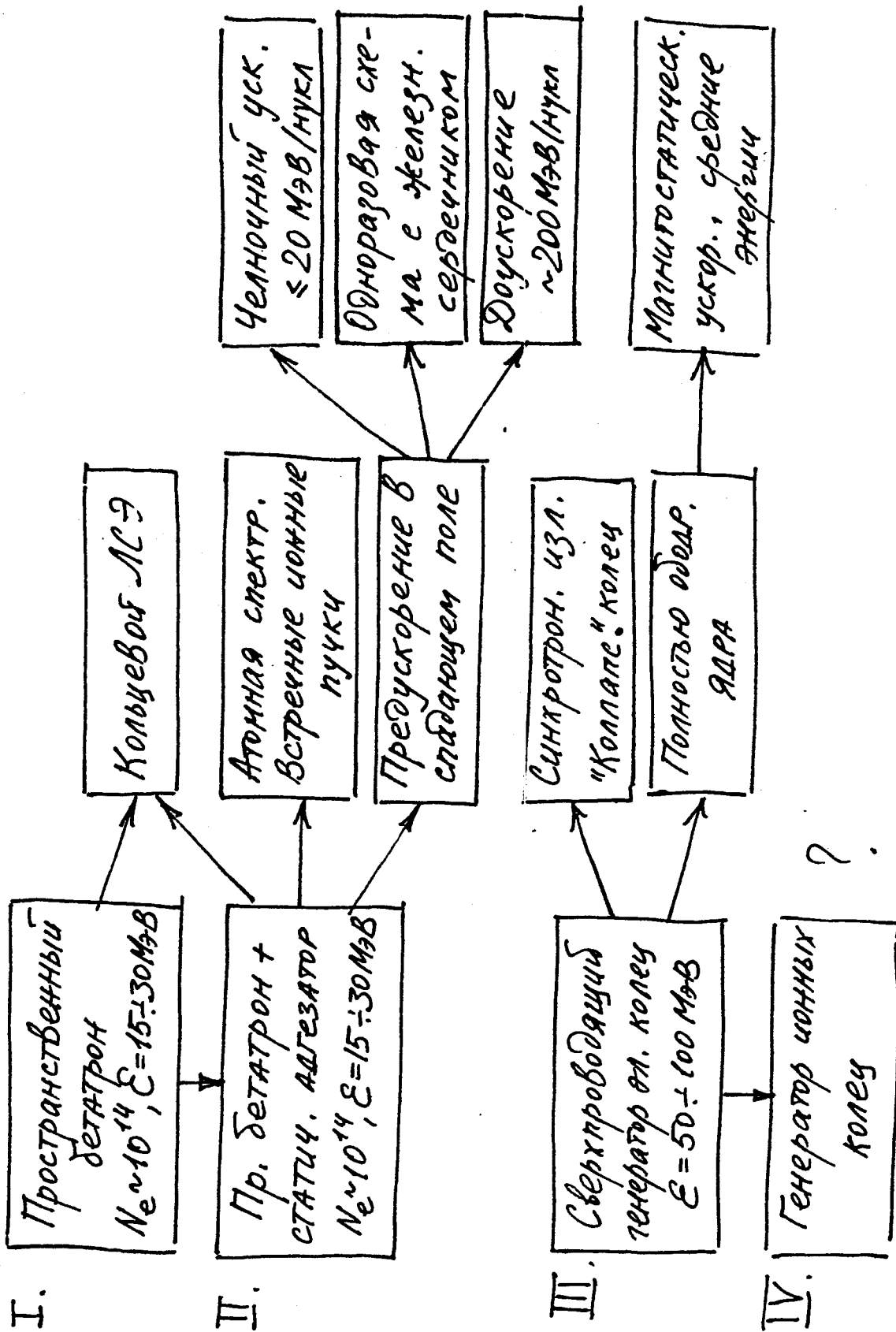


Рис. 4. Программа развития электронно-кольцевой техники

Эксперименты (I-3) дадут ответ на ключевые вопросы устойчивости интенсивных электрон - ионных колец и позволят перейти к следующим этапам.

Второй этап включает статическую компрессию и ускорение колец в магнитных полях умеренной напряжённости, создаваемых тёплыми обмотками (или же охлаждёнными до азотных температур). Если система формирования колец окажется способной работать с частотой повторения в сотни Гц, то для ускорения тяжёлых ионов до низких энергий достаточно одноразовой схемы, возможно, с использованием внутреннего соленоида ^{/6/} или железного стержня ^{/21/} в целях более полной передачи энергии от электронов ионам и сокращения длины установки. Для ускорения ионов легких и средних элементов независимо от достигнутой цикличности генератора колец целесообразна челночная схема ускорения.

В случае успешных результатов по ускорению в спадающем магнитном поле можно перейти к ускорению до средних энергий одним из упомянутых в п. I.2 способов.

Третий этап связан с использованием сверхпроводимости и имеет целью формирование электронных колец с высокой плотностью (достаточной для полной обдирки ионов тяжёлых элементов), большими энергозапасом и удерживающей силой, позволяющими осуществить магнитостатическое ускорение до средних энергий. Исключительный интерес представляет исследование действия синхротронного излучения на размеры кольца ^{/22/}, как при наличии высокочастотной подкачки энергии для сохранения большого радиуса кольца, так и в её отсутствие. Если окажется, что можно далеко выйти за рамки ограничений, налагаемых условиями когерентной устойчивости, то на повестку станет вопрос об ускорении до ультрарелятивистских энергий, однако реальных оснований для таких надежд пока нет.

Успешное продвижение по обрисованному здесь пути прояснит перспективность предлагаемой схемы для формирования ионных колец, о которых говорилось ранее.

3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО АДГЕЗАТОРУ КУТИ-20.

Основной особенностью адгезатора КУТИ-20 ^{/3/} является узкая металлическая камера, экранирующая электрическое поле кольца, но прозрачная для его магнитного поля (при условии медленности движения кольца). Положительные заряды, наведенные смещённым кольцом на стенках, стремятся увеличить его смещение; причем при приближении кольца к одной из стенок индуцированный заряд собирается на ней, что

усиливает эффект /23/. Внешнее магнитное поле системы сжатия КУТИ-20 близко к однородному и слабо препятствует перемещению кольца вдоль силовых линий. (В отличие от этой ситуации в рассмотренном в предыдущем разделе устройстве индуцированные заряды стремятся сместить электроны поперек силовых линий магнитного поля). В результате при данном значении показателя спада существует предельное число электронов, которое может быть удержано от затягивания на стенку, причем, как показывает анализ /23/, это число резко падает при наличии рас- согласования медианных плоскостей камеры и магнитного поля.

Требование устойчивости кольца с данным числом электронов может быть переформулировано как ограничение снизу на величину показателя спада магнитного поля /23/

$$n > \frac{\nu}{\mu} \left(\frac{\pi r_0}{h} \right)^2 \quad (3.1)$$

где $\nu = 0,45 \cdot 10^{-13} N_e / r_0$, h - апертура камеры на радиусе r_0 . Данные расчётов по более точной формуле /23/ для камеры адгезатора КУТИ-20 представлены на рис.5. Они показывают, что для устойчивости кольца с проектными параметрами требуются большие значения показателя спада, (даже при идеальном совмещении медианных плоскостей) чем в существующей магнитной системе.

Основным требованием, которым руководствовались при выборе n - траектории, было отсутствие параметрического резонанса аксиальных колебаний электронов на всём протяжении сжатия кольца. Значения показателя спада, соответствующие резонансу дипольных колебаний, также показаны на рис.5 (резонансу квадрупольных колебаний, то есть колебаний размера кольца, соответствуют n , большие на так называемый кулоновский сдвиг частоты). Важно отметить, что поле индуцированных на стенках зарядов сдвигает резонансные значения показателя спада в соответствии с формулой /23/

$$n_{eff} \equiv n - \frac{\nu}{3\mu} \left(\frac{\pi r_0}{h} \right)^2 = 0,25 \quad (3.2)$$

Различие стеночных поправок в (3.1) и (3.2) объясняется тем, что при быстрых колебаниях кольца (глубина скин-слоя меньше толщины стенок) перераспределение индуцированных на стенках зарядов компенсируется возбуждением токов Фуко, стремящихся, согласно правилу Ленца, вернуть кольцо в среднюю плоскость /24/. Вследствие этого различия при определенных значениях r_0/h (достигающих максимума в существующей камере при $r_0 \approx 20$ см) удовлетворить одновременно требованиям (3.1) и $n_{eff} < 0,25$ невозможно.

Предложены два пути решения проблемы.

1. Дополнить конструкцию камеры адгезатора системой наружных пассивных витков /23/, соединённых попарно навстречу друг другу. Внешнее магнитное поле, симметричное относительно средней плоскости между витками, не возбуждает в них ток, в то же время кольцо, смещаясь из медианной плоскости, наведёт в них антисимметричные токи, которые скомпенсируют перераспределение индуцированных зарядов и при медленном движении кольца. При полной компенсации правая часть в (3.1) будет втрое меньше, и противоречие между требованием $n_{eff} < 0,25$ и условием устойчивости равновесия кольца в медианной плоскости будет устранено.

2. Отказаться от попыток сжать кольцо, не пересекая параметрический резонанс. Как показывают расчёты, практически невозможно удовлетворить одновременно условиям $n_{eff} < 0,25$ и (3.1) даже для меньших значений ν/μ при существующем числе ступеней сжатия. В то же время, согласно экспериментальным наблюдениям, даже после многократного прохождения резонанса выживает значительная доля электронов. Один из механизмов, позволяющих благополучно пересекать резонанс, связан с ионной фокусировкой /25/. Как известно /1/, плотность ионов, образовавшихся в электронном кольце, имеет максимум в центре его сечения. Соответственно, чем больше амплитуда колебаний электрона, тем меньше ионная добавка к его частоте. Поэтому, когда резонанс проходится уменьшением показателя спада, ослабление ионной фокусировки помогает быстрее выйти из резонанса. Уширение ионного пучка работает в ту же сторону. Если пересечение резонанса будет происходить в конце сжатия, где азимутальная неоднородность поля и определяемая ею ширина резонансной полосы малы, то можно ожидать лишь незначительного увеличения размеров кольца. Таким образом, n - траекторию следует формировать так, чтобы как можно дольше оставаться в коридоре $0,36 < n_{eff} < 0,64$ (граничные значения соответствуют резонансам связанных r - и z - колебаний на второй гармонике поля) и снижать n только после того, как будет накоплен достаточный ионный заряд. Такой выбор n - траектории позволит удовлетворить условию (3.1) и при $N_2' > 10^{13}$.

Очевидно, кольца с еще большим числом электронов могут быть получены при одновременной реализации этих двух предложений. В частности, последовательная запитка пар витков (п.1) током небольшой величины позволит создать сопровождающий электронное кольцо перепад магнитного поля с требуемым градиентом.

Предложенный в пункте 2 выбор h -траектории приведёт также к снижению амплитуды радиальной процессии кольца, регистрируемой во всех установках с электронными кольцами при малых значениях показателя спада n . Наиболее вероятной причиной её возникновения является электрон-ионная неустойчивость дипольных радиальных колебаний^{/1/}. На рис.6 показана область неустойчивости на плоскости переменных n_{eff}
 $Q_{ei}^2 = f^2 \frac{2\pi}{\omega} (r_0/a)^2$, где f - фактор зарядовой нейтрализации кольца, полученная в рамках линейной теории. При малых n_{eff} кольцо становится неустойчивым прежде, чем успеет накопиться заметное число ионов. При больших n_{eff} кольцо попадёт в область неустойчивости только после того, как будет накоплен значительный ионный заряд, создающий поле с сильной нелинейностью. Эта нелинейность приведёт к стабилизации кольца на уровне малых амплитуд^{/26/}.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.; Атомиздат, 1979.
2. Флёров Г.Н. - В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускор. зар. частиц. Дубна, 1985, т.2, с.86.
3. Александров В.С. и др. Ускорительный комплекс тяжёлых ионов в ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.
4. Alexahin Yu.I., Sarantsev V.P.-Particle Accelerat. 1985, v.16, p. 171; - В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985, т.2, с.178.
5. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ Р9-11776, Дубна, 1978.
6. Furth H., Rosenbluth M.N. - in: Symposium ERA, Berkeley, California, 1968, p.210.
7. Агеев А.И. и др. ОИЯИ 9-11007, Дубна, 1977.
8. Гаврилова Э.Г. и др. - В сб.: II Симпозиум по коллект. методам ускор., Д9-10500. Дубна: ОИЯИ, 1976, с.84.
9. Алексахин Ю.И. Деп. сообщение ОИЯИ Б1-9-83-751, Дубна, 1983.
10. Алексахин Ю.И., Казача В.И., ОИЯИ Р9-83-752, Дубна, 1983.
11. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. ОИЯИ Р9-11788, Дубна, 1978.
12. Александров Ю.А., Матора И.М. ОИЯИ Р3-7634, Дубна, 1973.
13. Schumacher U. -Nucl. Instr. Meth., 1981, v.185, p.545.
14. Yin Y.Z., Bekefi G.-Phys. Fluids, 1985, v.28, N4, p.1186.
15. Кузнецов И.В. и др. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, М10-85, Дубна, ОИЯИ, 1985, с.62.

16. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984, с.128.
17. Christofilos N.C.-Phys.Rev.Lett., 1969, v.22,p.830.
18. Laslett L.J., Sessler A.M.-IEEE Trans. Nucl.Sci., 1969, NS-16, N3, p.1034.
19. Алексахин Ю.И. - В сб.: X Всесоюзное совещание по ускор. заряж. частиц. Р9-86-620, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.71.
20. Anatsky A.N. et al. -IEEE Trans. Nucl. Sci., 1971, NS-18, N3, p.625.
21. Плотников В.К. - В сб.: II Симпозиум по коллект. методам ускор., Д9-10500. Дубна: ОИЯИ, 1976, с.41.
22. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. - ЭЧАЯ, 1987, т.18, в.1, с.154-197.
23. Алексахин Ю.И., Перельштейн Э.А. ОИЯИ Р9-12335, Дубна, 1979.
24. Alexahin Yu.I, Perelstein E.A. -Particle Accelerat., 1979, v.10, p.41.
25. Алексахин Ю.И., ОИЯИ Р9-86-608, Дубна, 1986.
26. Andelfinger C. et al. -IEEE Trans. Nucl.Sci., 1979, NS-26, N3, pt. 2, p.4172.

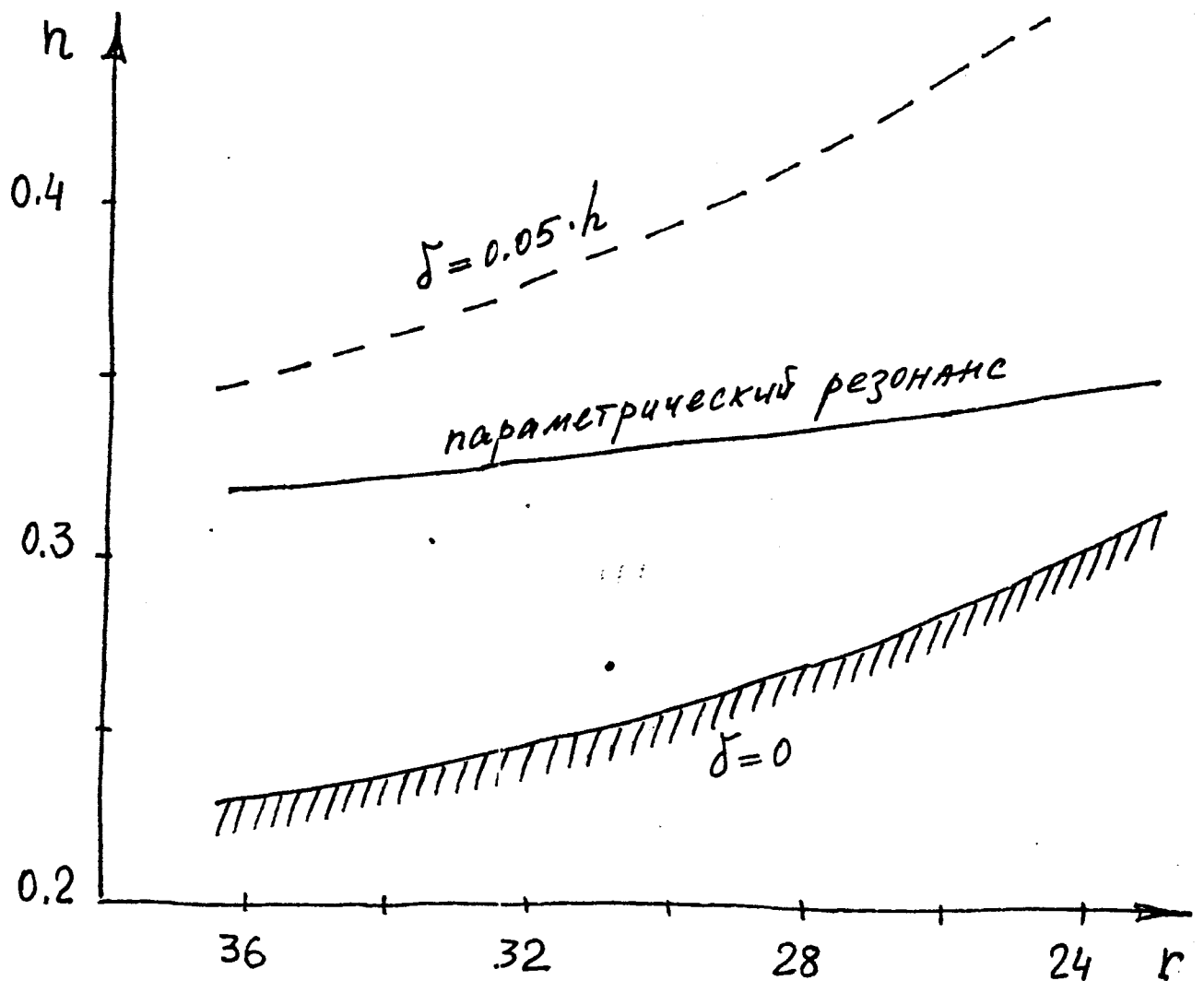


Рис. 5. Значения показателя слэда, отвечающие резонансу дипольных колебаний кольца и границе устойчивости относительно когерентного сдвига кольца при идеальном совмещении медианных плоскостей поля и камеры ($\delta=0$) и неточном ($\delta=5\%$ от апертуры) для параметров инжекции $N_e=10^{13}$, $E_{in}=2$ МэВ $r_{in}=35$ см.

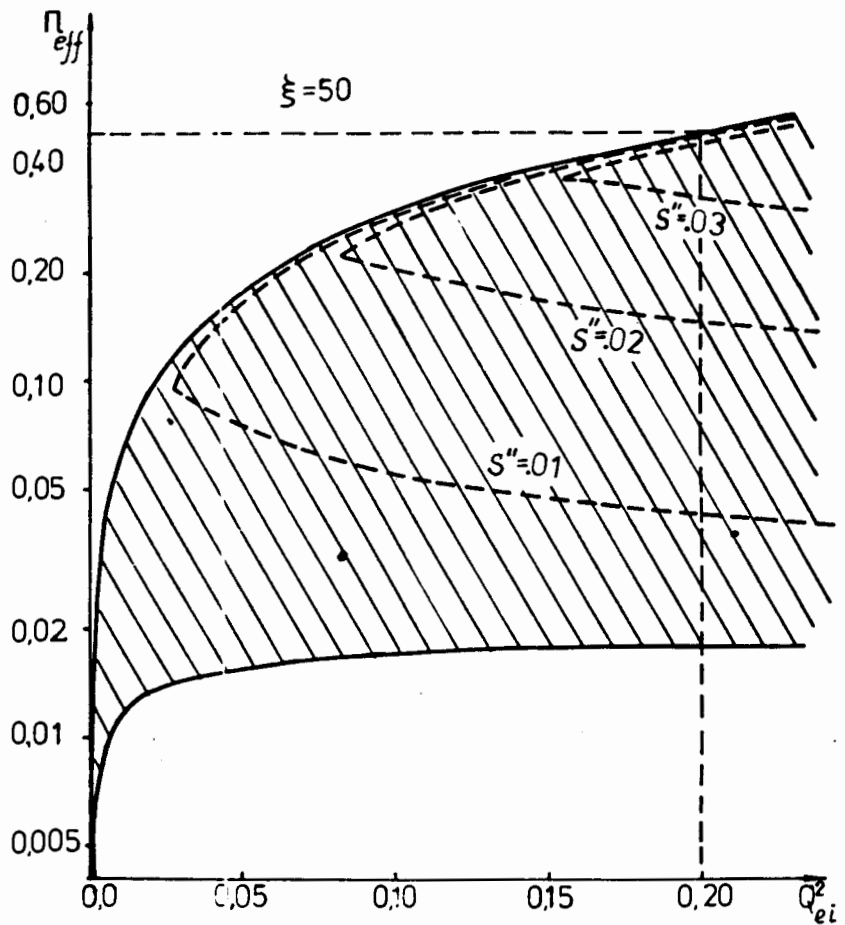


Рис.6. Область неустойчивости радиальных электрон-ионных колебаний при факторе загрузки (отношении полной массы ионов к суммарной релятивистской массе электронов) $\xi = 50$. Пунктир - линии равного инкремента $s'' = \text{Im } \omega / \omega_0$, ω_0 - гирочастота электронов