

Ш - 643

9-82-787

ШИРКОВ

Григорий Дмитриевич

НАКОПЛЕНИЕ ИОНОВ  
В ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЬЦАХ  
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Э.А. ПЕРЕЛЫШТЕЙН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В.В. КОЛЬГА  
кандидат физико-математических наук  
В.П. БЕЛОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт теоретической  
и экспериментальной физики (Москва)

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 198 года  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета  
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, г. Дубна,  
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 198 года.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

Ю.А. БАТУСОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

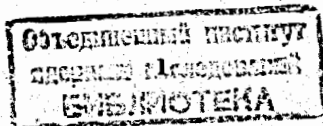
Актуальность проблемы. Для решения различных фундаментальных и прикладных задач требуются интенсивные пучки тяжелых ионов. В последние годы получил значительное развитие один из коллективных методов - ускорение ионов электронными кольцами. Этот метод имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами ускорения ионов. На коллективном ускорителе тяжелых ионов (КУТИ) с электронными кольцами можно ускорять с высоким темпом набора энергии интенсивные пучки ионов практически любых элементов вплоть до самых тяжелых. Кроме того КУТИ, в отличие от других ускорителей, не требует отдельного источника ионов - ионы образуются непосредственно в электронных кольцах из нейтрального газа в камере ускорителя.

При проектировании и создании КУТИ необходимо знать характеристики электронно-ионных колец на всех этапах их формирования и ускорения. Особое значение имеют параметры ионного пучка, то есть общее число ионов, их средний заряд, распределение по зарядам, а также функция распределения отдельных ионных зарядностей в течении времени формирования и ускорения электронно-ионных колец и на выходе из ускорителя. Процессы накопления в электронных кольцах КУТИ и в электронных пучках линейных коллективных ускорителей и электронно-лучевых источников проходят аналогично. В диссертационной работе проведено теоретическое исследование процессов накопления ионов в электронных кольцах и пучках.

Цель работы. Целью работы является изучение динамики накопления и ускорения ионов различных элементов в электронных кольцах, влияние атомных столкновений на накопление, основных характеристик ионных и электронной компонент в фазовом пространстве и исследование возможности получения многозарядных ионов в электронных кольцах КУТИ.

Научная новизна. В диссертации впервые проведен подробный и систематический анализ процессов накопления и ускорения ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя.

В работе получены также следующие новые результаты: проведен расчет накопления ионов различных элементов из остаточного газа в камере ускорителя и специальной струи нейтрального газа в течении времени формирования электронно-ионного кольца в КУТИ; определен вклад



ион-ионных столкновений в процесс накопления ионов; предложен новый способ уменьшения размеров электронного кольца за счет синхротронного излучения, который использован при расчете адгезатора КУТИ, формирующего электронно-ионные кольца, позволяющие повысить темп ускорения в пять раз; показана возможность получения многозарядных ионов тяжелых элементов в электронных кольцах КУТИ; установлено, что эффективные фазовые объемы ионных компонент в электронных пучках и кольцах убывают с ростом заряда ионов, найдены стационарные функции распределения ионов при их накоплении в электронных пучках с гауссовской плотностью в сечении. С помощью методов крупных частиц и моментов функции распределения изучено накопление ионов нескольких зарядностей в электронных пучках и кольцах; проведено численное моделирование ускорения ионов в прототипе КУТИ ОИЯИ с использованием полученной в диссертации системы уравнений для локальных центров масс и среднеквадратичных размеров многокомпонентного электронно-ионного кольца.

**Практическая ценность.** Результаты расчетов по накоплению ионов, изложенные в диссертации, использовались при анализе экспериментов по ускорению ионов и диагностике электронно-ионных колец по синхротронному и тормозному излучению на прототипе КУТИ ОИЯИ, а также при проектировании КУТИ-20 - инжектора ускорительного комплекса тяжелых ионов ОИЯИ.

Предложенный способ повышения плотности электронных колец может служить основой для создания КУТИ с увеличенной в несколько раз эффективной ускоряющей силой и для использования электронно-ионных колец коллективного ускорителя в качестве источника многозарядных ионов.

Разработанные в диссертации методики применимы при расчетах процессов накопления ионов в электронных пучках и кольцах в различных областях ускорительной техники.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и публиковались в Трудах Международного семинара по ион-атомным процессам столкновения при высоких энергиях в Дебрецене (ВНР, 1981 г.), на Совещании по проблемам коллективного метода ускорения в Дубне (1982 г.) на УШ Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Протвино (1982), докладывались на семинарах ОНМУ и ЛЯП ОИЯИ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИТЭФ (Москва) и ИТФ АН УССР (Киев).

**Публикации.** Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены в 12 печатных работах и изобретении и опубликованы в "Журнале технической физики", в Трудах совещаний, в виде препринтов и сообщений ОИЯИ.

**Объем работы.** Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста и иллюстрируется 27 рисунками на 21 странице и одной таблицей.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы из 98 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены основные принципы коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами, приведены характерные параметры электронно-ионных колец в коллективных ускорителях, качественно рассмотрены процессы образования и накопления ионов в электронных пучках и кольцах и сформулированы основные проблемы, исследуемые в диссертации.

В первой главе рассматривается процесс накопления ионов в течении времени формирования электронно-ионного кольца в коллективном ускорителе.

Ускоряемые ионы образуются в результате ионизации электронным ударом нейтралов (нейтральных атомов или молекул) внутри кольца. Нейтралы попадают в кольцо из остаточного газа в камере ускорителя или из специальной газовой струи, впрыскиваемой в кольцо. Положительно заряженные ионы оказываются в потенциальной яме отрицательного заряда электронов и последовательно ионизируются в результате столкновений с электронами. Накапливаясь в электронном кольце ионы взаимодействуют друг с другом.

В общем случае, процесс накопления ионов из нейтрального газа в электронном кольце или пучке описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающей все виды межатомных электронных переходов. При расчетах необходимо учитывать только те переходы, которые вносят реальный вклад в процесс накопления ионов.

В диссертации показано, что основным процессом в электронно-ионном кольце, при плотностях электронов  $< 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , является ионизация нейтралов и ионов электронным ударом. При расчетах накопления ионов тяжелых элементов необходимо учитывать также двукратную ионизацию. В ряде случаев важную роль играют ион-ионные процессы. При существующих параметрах электронно-ионных колец (число электронов  $\frac{1}{2} = 10^{13}$ , радиус  $R \approx 3,5 \text{ см}$ , малые размеры  $a \approx 2 \text{ мм}$ ) наибольшую вероятность имеет процесс перезарядки ионов друг на друге или на нейтралах. Перезарядка ионов на остаточном газе в камере ускорителя препятствует образованию полностью ионизированных ионов тяжелых элементов при длительном удержании электронно-ионных колец в КУТИ.

Выполнен расчет накопления ионов азота, аргона, криптона и ксенона из атмосферы соответствующих газов в камере ускорителя. На рис. I приведено расчетное изменение числа ионов азота в течении времени формирования электронного кольца в прототипе КУТИ  $\sim 2 \text{ мс}$  для раз-

личных значений давления остаточного газа в камере ускорителя. Замедление скорости накопления ионов при  $T = 1.2 - 1.3$  мс соответствует среднему заряду ионов около единицы и вызвано их перезарядкой друг на друга. Пунктирные кривые соответствуют расчетам без учета ион-ионных взаимодействий. На рис.1, также приведено изменение среднего радиуса электронного кольца.

Получены аналитические выражения для среднего заряда и общего числа ионов в электронных пучках и кольцах переменного объема, которые позволяют рассчитывать накопление ионов средних и тяжелых элементов с точностью до нескольких процентов не прибегая к громоздким вычислениям на ЭВМ. В результате расчетов показано, что, при числе электронов  $N_e = 10^{13}$  в сформированном электронно-ионном кольце средний заряд ионов азота равен 5, аргона - 7, криптона - 11 и ксенона - 16.

Установлено, что при накоплении ионов тяжелых элементов является существенным рассеяние электронов на ионах. Например, при накоплении ионов из атмосферы ксенона в камере ускорителя, поперечный аксиальный фазовый объем электронного пучка увеличивается в 1.5-2 раза за счет рассеяния электронов на нейтральном ксеноне и его ионах. Загрузку электронного кольца тяжелыми ионами предпочтительно проводить из относительно короткой струи нейтральных атомов, впрыскиваемых в достаточной степени сжатое кольцо с последующей их обдиркой в течении не менее 0.5 + 1.0 мс. Выполнен расчет накопления ионов ксенона и урана из импульсной струи в прототипе КУТИ ОИЯИ.

В течении нескольких лет на прототипе КУТИ ОИЯИ проводились эксперименты по ускорению ионов азота. При числе электронов  $N_e = 10^{13}$ , число ионов в кольце составляло  $N_i = 5 \cdot 10^{11}$ . При ускорении ионы имели набор энергии 4 МэВ/м.нуклон.

Проведено сравнение расчетов по накоплению ионов в электронных кольцах с экспериментами по ускорению ионов на прототипе КУТИ, с результатами диагностики электронно-ионных колец по тормозному излучению и с данными по обнаруженному на прототипе КУТИ эффекту уширения углового распределения синхротронного излучения электронного кольца при накоплении в нем ионов. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию возможностей повышения эффективности коллективного ускорителя с электронными кольцами и использования электронных колец КУТИ в качестве источника многозарядных ионов.

Эффективность коллективного метода ускорения в значительной степени определяется набором энергии ускоряемых ионов на единице длины ускорителя. Повысить максимальный темп ускорения можно тремя путями:

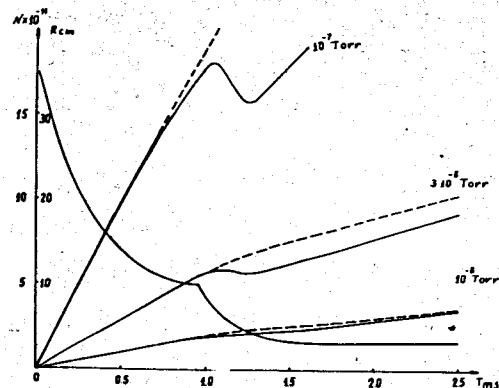


Рис. 1  
Радиус электронного кольца и число ионов в нем для различных значений давления остаточного газа в камере ускорителя.

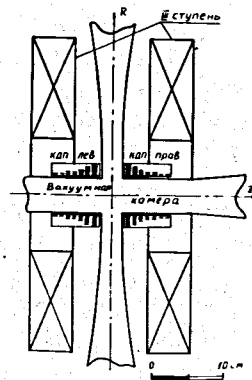


Рис. 2  
Система дополнительного поджатия электронного кольца КУТИ.

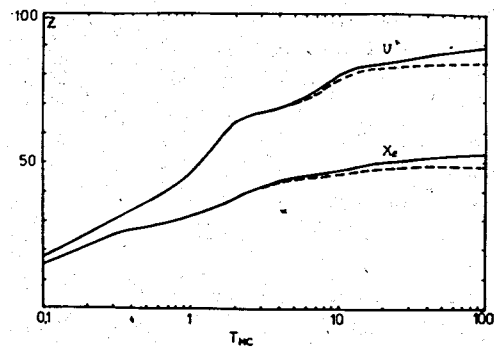


Рис. 3  
Накопление многозарядных ионов ксенона и урана в электронных кольцах КУТИ.

а) увеличением числа электронов в кольце; б) уменьшением размеров электронного кольца; в) увеличением заряда ускоренных ионов. Существующая конструкция и магнитная система адгезатора (компрессора) прототипа КУТИ позволяет формировать электронные кольца с числом электронов  $N_e \leq 1.5 \cdot 10^{13}$ . Скорость роста среднего заряда ионов зависит от плотности электронного кольца. Поэтому для повышения максимально - возможного темпа ускорения, оптимальным является накопление многозарядных ионов с одновременным уменьшением размеров электронно-ионного кольца. В конце сжатия в коллективных ускорителях возрастает потеря энергии электронов E на синхротронное излучение. Если внешние магнитные поля постоянные во времени, то радиус кольца уменьшается по закону:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{1-n} \frac{dE}{dt} \frac{R}{E}$$

где  $n$  - показатель спада магнитного поля.

В прототипе КУТИ на конечных этапах сжатия  $n \rightarrow 0$  и относительные потери энергии и уменьшение радиуса электронного кольца за счет синхротронного излучения равны между собой и составляют 2-3%. Скорость уменьшения радиуса в постоянном во времени магнитном поле увеличится в десятки раз, если показатель спада магнитного поля выбрать близким к единице. Дополнительное сжатие кольца происходит с уменьшением энергии электронов, поэтому в конце сжатия не требуется больших значений индукции магнитного поля в камере ускорителя. Одновременно уменьшаются малые размеры электронного кольца за счет радиационного охлаждения и могут накапливаться многозарядные ионы тяжелых элементов. Выполнен расчет системы сжатия электронного кольца с использованием радиационных эффектов, применительно к прототипу КУТИ и КУТИ-20. Система состоит из двух катушек дополнительного поджатия (КДП) по 20 витков в каждой с неравномерной плотностью намотки (рис.2), обеспечивающих сжатие электронного кольца, сформированного в существующей магнитной системе, в магнитном поле, близком к постоянному в течение примерно 6 мс, до  $R = 1.9$  см и последующий вывод кольца в существующий ускорительный тракт прототипа КУТИ. За время дополнительного поджатия средний заряд тяжелых ионов повышается в 2-3 раза и достигает для ионов ксенона величины + 46, урана + 72. Максимальные значения тока в КДП не превышают 10 кА, индукции магнитного поля в камере ускорителя - 30 кэ, показателя спада магнитного поля - 0,97. Показано, что в дополнительно сжатом электронном кольце за 100 мс можно получить ионы  $Xe^{48+}$  и  $U^{84+}$  (рис.3).

Основным фактором, ограничивающим средний заряд при длительном накоплении ионов, является их перезарядка на нейтральном газе в камере ускорителя. В свою очередь время жизни электронного кольца с ионами

ограничено увеличением поперечных фазовых объемов электронного кольца за счет рассеяния электронов на накопленных ионах и нейтрализацией электронного заряда ионами из остаточного газа в камере ускорителя. При числе тяжелых ионов  $5 \cdot 10^{10}$  и давлении остаточного газа  $2 \cdot 10^{-9}$  тор можно удерживать электронное кольцо в течении времени  $\sim 100$  мс.

В третьей главе диссертации исследуется функция распределения ионов в электронных пучках. Результаты первых двух глав получены в предположении о равномерной плотности и совпадающих размерах электронной и ионной компонент в кольце. Это приближение является вполне удовлетворительным при определении общего числа и среднего заряда ионов. Однако, условия коллективного ускорения ионов в электронных кольцах и сильноточных электронных пучках, параметры электронно-лучевых источников ионов в значительной степени зависят от распределения по плотностям и скоростям накопленных ионов. Вид функции распределения ионов определяется профилем плотности электронного пучка, а также собственными электромагнитными полями электронов и ионов.

В этой главе все результаты получены для линейных электронных пучков, но они справедливы и для достаточно тонких электронных колец, когда эффектами, связанными с кривизной можно пренебречь.

Рассмотрено накопление ионов в электронном пучке с постоянной плотностью. Для случая, когда собственными полями ионов можно пренебречь, используя закон сохранения энергии и вириальную теорему, найдены среднеквадратичные размеры и скорости ионов в зависимости от зарядности. Для линейных собственных полей электронного пучка получено совпадение с известными ранее результатами Ласлетта (1973 г.). Найдены асимптотики среднеквадратичных размеров, скоростей и эффективных фазовых объемов ионных компонент для ионов высокой зарядности. Среднеквадратичные размеры убывают с ростом заряда  $Z$ , как  $Z^{-1/4}$ , среднеквадратичные скорости растут, как  $Z^{1/4}$ , эффективные фазовые объемы увеличившись, примерно, на 13%, остаются постоянными. На рис.4 и 5 сплошными кривыми под номером 2 приведены зависимости относительных среднеквадратичных размеров и фазовых объемов ионных компонент от заряда в электронных пучках с постоянной плотностью.

Реальные электронные пучки, как и любые ограниченные в пространстве распределения частиц, не имеют резких границ и постоянных плотностей. Электронный пучок, находящийся в линейных внешних электромагнитных полях, медленно меняющихся за характерные времена накопления ионов и периодов электронных колебаний, имеет стационарное гауссовское распределение плотности в сечении.

В электронном пучке с неравномерной плотностью вероятность иони-

зависит от радиуса. Ионы, имеющие разную энергию, а следовательно и амплитуду колебаний, имеют различную вероятность быть ионизированными дальше. Ионы с низкой энергией, совершающие движение в центре пучка, имеют более высокую вероятность подвергнуться ионизации, чем ионы с большой энергией, проводящие значительное время на краю пучка, где плотность электронов невелика. Поэтому средняя энергия каждой новой зарядности ниже, чем для электронного пучка с постоянной плотностью, соответственно меньше среднеквадратичные размеры и скорости. В предположении о малости собственных полей ионов, линейности полей электронов в центре пучка, где совершают движение ионы, и пренебрежимо малом моментом количества движения ионов  $M\varphi$  относительно центра пучка, впервые найдены стационарные функции распределения для любой зарядности ионов, образующихся в электронном пучке с гауссовской плотностью

$$f_z = \frac{M}{\pi a_z^2 \omega_z} \exp(-E/2Ma_z^2\omega_z^2) \delta(M\varphi) \quad (1)$$

где  $E, M$  и  $\omega_z$  полная энергия иона с зарядом  $Z$ ; его масса и частота колебаний;  $a_z$  - среднеквадратичный радиус  $Z$ -ой ионной компоненты. Функции распределения (1) соответствует плотность ионов в сечении пучка

$$\rho_z = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp(-z^2/2a_z^2)}{a_z \sqrt{2}} \quad (2)$$

Это распределение имеет особенность в центре пучка, появление которой связано с тем, что при выводе не были учтены скорости нейтралов и собственные поля ионов.

Полученная функция распределения (1) имеет моменты второго порядка, которые соответствуют среднеквадратичным размерам и скоростям:

$$a_z^2 = a_e^2/Z; \quad u_z^2 = a_z^2 \omega_z^2 = a_e^2 \omega_e^2 = const; \quad a_z = a_e/\sqrt{Z}$$

где  $a_e$  - среднеквадратичный радиус электронного пучка. Эффективный фазовый объем ионов  $F_z = a_z u_z = a_e \omega_e / \sqrt{Z}$ . Полученные зависимости приведены на рис. 4 и 5 сплошными кривыми под номером 1.

Для проверки полученных соотношений было проведено численное моделирование. Каждую ионную зарядность представляло 1000 пробных ионов, которые образовывались и двигались в электронном пучке с гауссовской плотностью, в соответствующих ей реальных нелинейных полях. Результаты представлены на рис. 4 и 5 точками. Расчеты были выполнены для двух случаев. В первом (случай "а"), соответствующем условиям, при которых найдена функция распределения (1), предполагалось, что при образовании новых ионов функция распределения предыдущей зарядности остается неизменной. В случае "б" учитывалось изменение функций распределения. Эти расчеты моделируют два крайних случая накопления ионов в реальных электронных пучках. При накоплении ионов из остаточного газа, когда

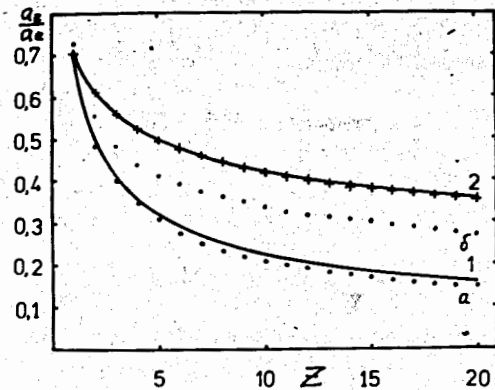


Рис. 4  
Среднеквадратичные размеры ионных компонент в зависимости от заряда ионов в электронном пучке с гауссовой плотностью (1) и равномерной плотностью (2).

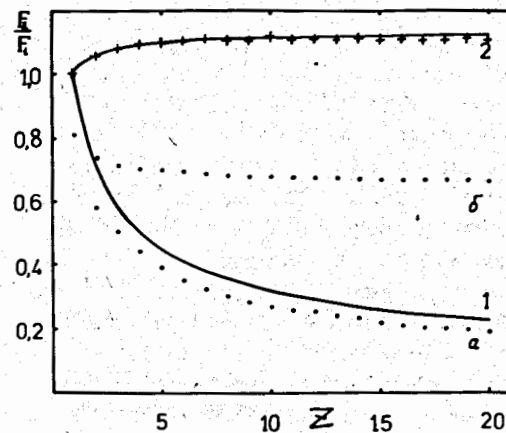


Рис. 5  
Эффективные фазовые объемы ионных компонент в зависимости от заряда ионов в электронном пучке с гауссовой плотностью (1) и равномерной плотностью (2)

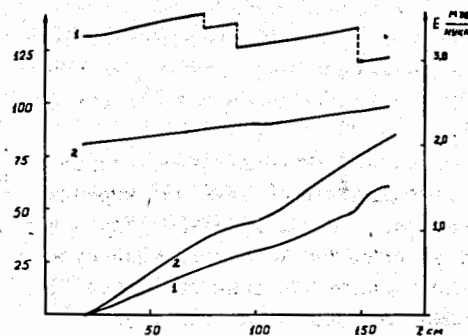


Рис. 6  
Набор энергии ионами на нуклон и изменение загрузки электронного кольца при ускорении для числа электронов в кольце  $5 \cdot 10^{12}$  (1) и  $10^{13}$  (2).

существует постоянный приток новых ионов из нейтралов, происходящие процессы близки к случаю "а". С другой стороны, процесс образования ионов в коллективном ускорителе из короткой импульсной струи нейтрального газа и последующая их длительная обдирка в электронном кольце, приближается к случаю "б".

О точности вычислений можно судить по расчетам процесса накопления ионов в электронном пучке с постоянной плотностью (обозначены крестами на рис. 4 и 5). Некоторое отличие полученных соотношений для гауссовской плотности электронного пучка, от результатов численных расчетов, в особенности для первых двух зарядностей ионов, связано с предположением о линейности полей электронов при выводе функции распределения (I).

Возможности эффективного использования сооружаемого КУТИ-20 в качестве инжектора тяжелоионного синхротрона (ТИС) в значительной степени определяются величиной эффективного эмиттанта ионного пучка. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что минимальное возможное значение эмиттанта пучка ионов  $U^{25+}$ , по крайней мере вдвое меньше, чем это предполагалось ранее для электронного кольца с постоянной плотностью в сечении и не превосходит величины  $0,4 \pi$  мрад. см. Это облегчает транспортировку и инжекцию ионного пучка в ТИС. Изучено влияние полей ионов на функции распределения ионов и электронов. В результате анализа зависимостей собственных полей ионов и электронов от радиуса и численного моделирования показано, что поля ионов не оказывают существенного влияния на движение частиц в пучке при факторе зарядовой нейтрализации электронного заряда  $f \leq 0,2$ .

Методом крупных частиц проведено моделирование процессов накопления ионов в электронных пучках. Изучено изменение потенциала электрического поля в зависимости от зарядовой нейтрализации электронов накопленными ионами. Исследована динамика функций распределения электронов и ионов в зависимости от фактора нейтрализации и приведены фазовые портреты электронов и ионов. Рассмотрены изменения среднеквадратичных размеров и скоростей электронной и нескольких ионных компонент при накоплении ионов в электронных пучках при их разной внешней фокусировке, а также потери ионов в нейтрализованных по заряду пучках.

Четвертая глава посвящена исследованию динамики среднеквадратичных размеров электронно-ионных колец при накоплении и ускорении ионов. При исследовании пучков заряженных частиц в большинстве случаев основной интерес представляют усредненные характеристики пучка, такие как средняя скорость, среднеквадратичные размеры, эмиттанс, температура и т.д. Метод полных моментов функции распределения,

развитый за последние годы в физике пучков заряженных частиц, позволяет получать все эти величины и при численных расчетах по сравнению с методом крупных частиц требует значительно меньших ресурсов ЭВМ.

При времени жизни релятивистских электронных колец 10-100 мс существенными становятся потери на синхротронное излучение и рассеяние электронов на накопленных ионах и остаточном газе.

В диссертации получены линейризованные уравнения движения в цилиндрической системе координат с учетом указанных эффектов и начального продольного азимутального энергетического разброса электронов. Уравнения движения используются при выводе системы уравнений для моментов второго порядка с учетом бетатронных колебаний, энергетического разброса, рассеяния электронов на накопленных ионах и остаточном газе и радиационных эффектов. При изменениях энергии электронов только вследствие синхротронного излучения, получена система уравнений, описывающая рост поперечного фазового объема электронного кольца за счет рассеяния электронов, которая при отсутствии рассеяния, переходит в систему адиабатических инвариантов. Определено изменение продольного энергетического разброса электронов в электронно-ионном кольце, вызванного синхротронным излучением.

Получена система уравнений, описывающая изменение среднеквадратичных размеров электронной и ионных компонент при накоплении ионов в электронных пучках и кольцах. Определены усредненные частоты колебаний частиц при накоплении в электронных пучках с гауссовской плотностью ионов с функцией распределения вида (I). Показано, что высокая плотность ионов в центре пучка, в некоторых случаях, например, когда средний заряд ионов близок к единице, значительно повышает роль ион-ионных процессов при накоплении ионов.

Выполнен расчет адиабатического сжатия электронно-ионного кольца в адгезаторе прототипа КУТИ в атмосфере остаточного газа (азота).

Изучены некоторые вопросы, связанные с коллективным ускорением электронно-ионных колец. Установлено, что при расчетах необходимо учитывать реальное распределение ионов по зарядностям, в частности присутствие ионов из остаточного газа. Найдены условия, при которых потеря низших ионных зарядностей приводит к постепенному ухудшению параметров электронной компоненты и срыву компактного ускорения электронно-ионного кольца. Показано, что максимально-допустимый темп ускорения необходимо определять не для среднего заряда ионов в кольце а для величины  $z = \bar{z} - \sqrt{2} \sigma$ , где  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение зарядностей ионов от  $\bar{z}$ .

На основе метода моментов функции распределения получены уравнения для относительных поляризаций и среднеквадратичных размеров мно-



гокомпонентных электронно-ионных колец, при их ускорении в электрических и магнитных полях. Выполнен расчет ускорения ионов ксенона в присутствии ионов азота в спадающем магнитном поле прототипа КУТИ, результаты которого приведены на рис. 6. Рассмотрено два случая. Кривые I соответствуют электронным кольцам с числом электронов  $5 \cdot 10^{12}$ , числом ионов ксенона  $6 \cdot 10^{10}$  и ионов азота  $4 \cdot 10^{11}$ . Кривые 2 - число электронов  $10^{13}$ , ионов ксенона -  $5 \cdot 10^{10}$ , ионов азота  $2.5 \cdot 10^{11}$ . На рис. 6 представлены набор энергии  $E$  ионами на нуклон и отношение суммарных масс электронного и ионного колец  $\gamma$ . В случае I электрическое поле, создаваемое электронами, недостаточно для ускорения всех ионных зарядностей и малозарядные ионы  $Xe$  теряются в процессе ускорения. Средний заряд ионов ксенона в кольце равен I3 и потеря первых девяти, относительно малочисленных зарядностей, не приводит к заметным изменениям параметров кольца. На рис. 6 первых два скачкообразных изменения загрузки отражают потери I0 и II зарядностей. В результате этого, а также постепенного уменьшения ведущего магнитного поля, электронное кольцо увеличивается в размерах, и теряется большое число ионов с зарядностью I2. Это приводит к резкому росту аксиальных размеров электронной компоненты и разрушению всего кольца. Для компактного ускорения электронных колец с тяжелыми ионами в существующих полях на прототипе КУТИ необходимое расчетное число электронов должно быть более  $5 \cdot 10^{12}$ .

В приложении содержится краткое описание программы, моделирующей с помощью метода крупных частиц процесс накопления ионов в электронных пучках. Предложены алгоритмы расстановки частиц в четырехмерном фазовом пространстве в соответствии с заданной функцией распределения и моделирования образования и перехода из зарядности в зарядность ионов и ион-ионных столкновений. Приведен текст программы на языке фортран.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено теоретическое исследование накопления ионов в электронных пучках и кольцах. Изучены динамика накопления ионов различных элементов, влияние атомных столкновений на накопление и основные характеристики ионного и электронного пучков в фазовом пространстве. Результаты исследований использовались для анализа экспериментов на коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ и при проектировании инжектора ускорительного комплекса тяжелых ионов ОИЯИ - КУТИ-20.

2. Выполнен расчет накопления ионов из остаточного газа и импульсной струи при формировании электронно-ионного кольца в коллек-

тивном ускорителе тяжелых ионов. Получено хорошее согласие по числу накопленных ионов и их среднему заряду с экспериментами по ускорению ионов азота и диагностике электронно-ионных колец на прототипе КУТИ. Выработаны требования к длительности, плотности и геометрии струи импульсного источника нейтральных атомов инжектора УКИ ОИЯИ - КУТИ - 20.

3. Изучено влияние взаимодействия ионов с ионами и нейтральным газом при формировании электронно-ионных колец коллективного ускорителя ионов. В результате численных расчетов показано, что перезарядка ионов несколько уменьшает их дисперсию по зарядам и несущественно влияет на их средний заряд и число при накоплении средних и тяжелых элементов в электронных кольцах КУТИ.

4. Предложен новый способ уменьшения размеров электронных колец за счет некогерентного синхротронного излучения с одновременным накоплением в них многозарядных ионов путем создания на конечных радиусах сжатия электронного кольца магнитного поля с показателем спада близким к единице. Проведен расчет адгезатора КУТИ, формирующего электронно-ионные кольца с параметрами, позволяющими увеличивать темп ускорения в пять раз.

5. Исследована возможность использования электронных колец КУТИ в качестве источника многозарядных ионов. Установлено, что основными факторами, ограничивающими средний заряд при длительном накоплении ионов в электронных кольцах, является их перезарядка на нейтральном газе в камере ускорителя и увеличение поперечных размеров кольца за счет рассеяния электронов на накопленных ионах. Показано, что в дополнительно сжатом за счет синхротронного излучения электронном кольце с радиусом 2 см, возможно за 100 мс при давлении остаточного газа в камере ускорителя меньше  $2 \cdot 10^{-9}$  Тор получить ионы ксенона со средним зарядом +48 и ионы урана со средним зарядом + 84.

6. Установлено, что эффективные фазовые объемы ионных компонент убывает с ростом заряда ионов в электронных пучках. Впервые показано, что при малых факторах зарядовой нейтрализации  $f \leq 0,2$  электронного пучка с гауссовой плотностью в сечении среднеквадратичные размеры ионных компонент уменьшаются с ростом заряда  $Z$  быстрее чем  $Z^{-1/2}$ , как это считалось ранее для равномерно заряженных пучков. Найдены соответствующие стационарные функции распределения. Получено, что за счет гауссовского распределения электронов минимальный фазовый объем ионного пучка КУТИ-20 должен быть не менее чем вдвое меньше, чем предполагалось для равномерной плотности электронов, что облегчает его транспортировку.

7. Исследовано влияние нелинейности собственных полей электронов

и ионов на движение и функцию распределения ионов. Показано, что нелинейность электрических полей гауссовского распределения электронов практически не влияет на функцию распределения ионов. Изучено изменение потенциала электрического поля в зависимости от зарядовой нейтрализации электронов накопленными ионами. Показано, что при  $f \leq 0,2$  искажение электронных полей незначительно, и можно пренебречь собственными полями ионов.

8. С помощью метода крупных частиц проведено численное моделирование процессов в многокомпонентных электронно-ионных пучках. Создан алгоритм начальной расстановки частиц в четырехмерном фазовом пространстве в соответствии с заданной функцией распределения. Разработан алгоритм позволяющий имитировать образование и переходы из зарядности в зарядность ионов, а также ион-ионные процессы.

9. Получена система уравнений, определяющая изменение во времени среднеквадратичных размеров поперечного сечения электронного кольца с учетом синхротронного излучения электронов и рассеяния электронов на накопленных ионах и нейтральном газе в камере ускорителя. Найдены адиабатические инварианты этой системы, описывающие изменение во времени среднеквадратичных размеров в постоянном внешнем магнитном поле при отсутствии рассеяния электронов.

10. Получены уравнения, определяющие изменение во времени среднеквадратичных размеров многокомпонентных электронно-ионных пучков при накоплении ионов в электронных пучках с гауссовой плотностью с учетом ионного зерна. Показано, что высокая плотность ионов в центре пучка, в некоторых случаях, увеличивает вклад ион-ионных перезарядок в процесс накопления ионов примерно в десять раз.

11. На основе метода моментов функции распределения получены уравнения, описывающие изменения во времени координат локальных центров масс и среднеквадратичных размеров многокомпонентного электронно-ионного кольца при его ускорении в электрическом и магнитном поле. Показано, что при моделировании процессов ускорения необходимо учитывать реальное распределение ионов по зарядам и массам. Найдены условия разрушения электронно-ионного кольца и срыва ускорения при потерях ионных зарядностей в больших ускоряющих полях.

Проведен расчет ускорения ионов ксенона в присутствии ионов азота в спадающем магнитном поле прототипа КУТИ. Показано, что ускорение тяжелых ионов на прототипе КУТИ возможно при числе электронов в кольце  $N_e \approx 5 \cdot 10^{12}$ .

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. Самосогласованная задача о движении

заряженных эллипсоидальных сгустков частиц. ОИЯИ, Р9-10468, Дубна, 1977, ЖТФ, 1978, 48, с.249-253.

2. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. Расчет процесса накопления ионов в электронных пучках с учетом ион-ионных взаимодействий. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978, ЖТФ, 1979, 49, с.19-23.

3. Г.Д.Ширков. О накоплении ионов в электронных кольцах. ОИЯИ, Р9-12055, Дубна, 1978; ЖТФ, 1979, 49, с.1471-1475.

4. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. О накоплении тяжелых ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя. ОИЯИ, 9-80-124, Дубна, 1980.

5. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков, Метод моментов в динамике кольцевых пучков заряженных частиц. ЖТФ, 1980, 50, с.549-556.

6. В.С.Александров, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев, Г.Д.Ширков. О возможности увеличения эффективной ускоряющей силы в ускорителях с электронными кольцами. ОИЯИ, Р9-81-20, Дубна, 1981.

7. E.A.Perelshtein, G.D.Shirkov. Ion-ion Collisions in Electron-Ion Rings. Proc. Internation Seminar on High-Energy Ion-Atom Collisions, Debrecen, Hungary, 1981, p.207-210.

8. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. Расчет ускорения многокомпонентных электронно-ионных колец. В кн: Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения, ОИЯИ, Р9-82-664, Дубна, 1982, с.62-65.

9. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. О накоплении многозарядных ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя. В кн: Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ, Р9-82-664, Дубна, 1982, с.31-33.

10. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. О функции распределения ионов в электронных пучках. ОИЯИ, Р9-82-526, Дубна, 1982.

11. Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.Д.Ширков, Б.Г.Щинов. Моделирование процесса накопления ионов в электронных пучках. ОИЯИ, Р9-82-532, Дубна, 1982.

12. Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.Д.Ширков, Б.Г.Щинов. Моделирование накопления ионов в электронных пучках. В кн: Аннотации докладов УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982, с.130.

13. В.С.Александров, В.П.Саранцев, Г.Д.Ширков. Способ формирования электронных колец высокой плотности и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство № 797537. Бюлл. ОИПОТЗ, 1981, №2, с. 255.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 ноября 1982 года.