



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2004-2
На правах рукописи

Буданов Юрий Александрович

**САМОСОГЛАСОВАННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ФАЗОВОЙ ПЛОТНОСТИ
И ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПУЧКОВ
В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ИОНОВ**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2004

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Д.А. Овсянников (СПбГУ, г. Санкт-Петербург), доктор физико-математических наук В.В. Парамонов (ИЯИ РАН, г. Троицк), доктор физико-математических наук А.С. Чихачев (ВЭИ, г. Москва).

Ведущая организация – Московский радиотехнический институт (г. Москва).

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2004 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан «__» _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д201.004.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

При рассмотрении теоретических проблем, связанных с ускорением заряженных частиц, развитие техники ускорителей во многом определяет актуальность тех или иных теоретических разработок. Вопросы изучения пучков ионов, интенсивность в которых оказывает существенное влияние на динамику частиц, стали действительно актуальными в начале пятидесятих годов. Именно в этот период помещение квадрупольных линз внутри трубок дрейфа позволило поднять интенсивность пучков на несколько порядков. Предложенная впоследствии И.М. Капчинским и В.В. Владимирским модель “микроранонического” распределения фазовой плотности позволила теоретически оценивать влияние пространственного заряда на поперечную динамику “длинных” равномерно заряженных пучков и сыграла заметную роль во многих дальнейших теоретических исследованиях. Однако дальнейшее развитие теории и техники ускорителей поставило на повестку дня новые вопросы перед динамикой частиц в интенсивных пучках. Это относится в первую очередь к разработке и созданию ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Первый такой ускоритель был создан в ИФВЭ под руководством В. А. Теплякова. Сейчас такие ускорители, получившие широкое распространение под названием RFQ, работают и создаются во многих ускорительных центрах мира.

Существенное снижение входной энергии в RFQ позволило решить ряд сложных технических вопросов по инжекции пучков в ускорители. Однако именно снижение входной энергии приводит к тому, что в RFQ продольные и поперечные размеры сгустков оказываются соизмеримыми при значительном влиянии пространственного заряда. Это приводит к необходимости рассмотрения в теории самосогласованных трехмерных моделей пучков. Появление RFQ стимулировало разработку многих аналитических и численных моделей. При изучении процессов в пучках по-прежнему велика роль аналитических методов, позволяющих раскрывать физическую сущность явлений и анализировать механизм возникновения различных процессов в пучках заряженных частиц.

Цель диссертационной работы:

- получение новых решений кинетического уравнения с самосогласованным полем при линейных собственных полях в 6-мерном и 4-мерном фазовых пространствах при произвольной зависимости от времени внешних линейных полей;
- получение самосогласованных стационарных нелинейных распределений для продольной и поперечной динамики;
- исследование приложений точных решений при анализе динамики пучков;
- исследование моделей пучков при сложном взаимодействии степеней свободы.

Научную новизну диссертации составляют разработка и применение новых подходов к решению самосогласованной системы уравнений Власова-Пуассона, исследование этих решений, а также разработка ряда новых аспектов в моделях пучков, связанных с взаимным влиянием различных степеней свободы на движение частиц.

1. Разработан новый подход к получению решений системы уравнений Власова-Пуассона в линейных внешних и собственных полях, основанный на понижении размерности задачи и использующий для этого гиперплоскости, определяемые линейными интегралами уравнений движения. Решения получены для гамильтоновых систем с линейными полями общего вида и произвольной зависимостью от времени.

2. Разработан метод решения задач самосогласованной динамики продольно однородных пучков с нелинейным полем пространственного заряда в гладком приближении. Получены значения предельных токов и предельных эмиттансов для поперечного движения при нелинейных собственных полях пучка.

3. В рамках модели продольного движения получено точное решение самосогласованной задачи. Исследовано влияние конечной фазовой плотности в продольных фазовых переменных на предельный ток.

4. На примере RFQ показано, что даже при стремлении к нулю входного эмиттанса измеренный эмиттанс на выходе ускорителя ограничен снизу значением, определяемым геометрией канала и током пучка.

5. При изучении формирования сгустков в RFQ показано, что в процессе увеличения влияния пространственного заряда сгусток переходит в качественно новое состояние с удвоенной частотой продольных колебаний и, хотя это состояние впоследствии разрушается из-за нелинейности колебаний, оно влияет на всю последующую динамику. Найдено значение тока бифуркации, при котором происходит удвоение частоты.

6. Исследовано параметрическое рассогласование сильноточного пучка по поперечному движению за счет пространственного заряда при исходной рассогласованности по продольному движению.

7. Построена теория возмущений продольно однородного пучка. Получены спектр частот поперечных колебаний, при которых возникает неустойчивость поперечного движения, и значения токов, при которых наступает резонанс.

8. Исследована модель роста эмиттанса пучка за счет перераспределения энергии по степеням свободы. Необратимость роста ореола пучка возникает благодаря процессу перемешивания фаз в нелинейной колебательной системе.

9. Для условий равномерного распределения энергии в RFQ получены принципиально новые условия для больших синхронных фаз.

Новые решения уравнений Власова-Пуассона проясняют особенности влияния нелинейности распределения заряда на самосогласованную динамику сильноточных пучков ионов. Полученные в диссертации результаты позволяют анализировать эффекты появления ореола у эмиттанса пучка и выбирать параметры ускорителя, позволяющие минимизировать этот процесс.

Практическая ценность. Результаты, полученные в диссертации, были использованы при выборе параметров ускорителей с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой. Исследования предельных токов и других характеристик пучка по продольному и поперечному движению носят общий характер и могут быть использованы при оценке влияния пространственного заряда на динамику частиц в ускорителях различного типа. Для RFQ получены значения фаз на выходе из ускорителя, минимизирующих эмиттанс пучка. С помощью численных методов проанализирована динамика образования продольного эмиттанса в RFQ. Сформулированы предложения по изменению геометрии ускорителя, при которых удастся существенно снизить продольный эмиттанс пучка.

Многие из полученных результатов были инициированы разработкой ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой, как с пространственно однородной, так и с пространственно периодической. Новые результаты по оценке параметров этих ускорителей приведены в приложении.

На защиту выносятся:

1. Самосогласованные распределения фазовой плотности в 6-мерном и 4-мерном фазовых пространствах, приводящие к линейным полям пространственного заряда.
2. Самосогласованные распределения фазовой плотности с нелинейными полями пространственного заряда для поперечного и продольного движения в жесткофокусирующем канале ускорителя.

3. Исследование самосогласованных решений. Уравнения огибающих для линейного случая и значения предельных токов для нелинейного решения.
 4. Результаты расчетов минимального эмиттанта на выходе RFQ.
 5. Теория возникновения состояний с удвоенной частотой продольных колебаний.
 6. Теория параметрического рассогласования сильноточного пучка за счет пространственного заряда.
 7. Теория возмущений сильноточного продольно однородного пучка.
 8. Модель необратимого роста эмиттанта пучка.
 9. Условия равномерного распределения энергии в RFQ.
- [10] Предложение по изменению параметров RFQ и получению существенно меньшего продольного эмиттанта пучка.

Апробация диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1]-[25], докладывались и опубликованы в трудах Совещаний по ускорителям заряженных частиц: IX, X, XI (Дубна, 1985, 1987, 1988), XII (Москва, 1990), XIII (Дубна, 1992), XIV, XV, XVI, XVII (Протвино, 1994, 1996, 1998, 2000), а также докладывались на I, III, V Международных семинарах по динамике пучков и оптимизации (Workshop BDO, Санкт-Петербург, 1994, 1996, 1998).

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 156 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 21 рисунок и список литературы из 70 наименований.

Содержание работы

В первой главе рассмотрены проблемы построения самосогласованных решений, приводящих к линейным полям пространственного заряда как в 2-мерном, так и в 3-мерном конфигурационных пространствах. Внешнее воздействие описывается гамильтоновыми системами с линейными полями общего вида с произвольной зависимостью от времени. Оценки влияния пространственного заряда с помощью представления ступок или потоков частиц в виде равномерно заряженных эллипсоидов и цилиндров проводились многократно, начиная с самого развития представлений о сильноточной динамике. Серьезные трудности возникают при переходе от феноменологического описания к построению самосогласованных решений для данных систем в фазовом пространстве. В диссертации рассмотрен подход к решению данной задачи, основанный

на методе понижения размерности. С помощью линейных интегралов движения решения строятся на соответствующих гиперповерхностях в 6-мерном и 4-мерном фазовых пространствах, ограниченных с помощью квадратичных интегралов движения. Для некоторых решений выписаны уравнения для огибающих. Однако основная задача в данной главе – доказательство существования решений указанной проблемы. Отсюда и достаточно сильное отличие этой главы от остальных глав, в которых уделяется основное внимание не математическим, а физическим сторонам рассматриваемых вопросов.

Запишем уравнения движения в линейных полях

$$\dot{r} = A(t)r, \quad (1)$$

где $r = (x, p_x, y, p_y, z, p_z)$ – радиус-вектор точки в фазовом пространстве, точка над переменной означает дифференцирование по времени. Общее решение системы (1) имеет вид

$$r(t) = M(t)C, \quad (2)$$

где $M(t)$ – матрица фундаментальной системы решений (1), $C = (C_1, \dots, C_6)$, константы C_i определяются из начальных условий. Поскольку матрица $M(t)$ невырождена, то можно выразить C через r

$$C = M^{-1}(t)r. \quad (3)$$

Величины C_i , выраженные через t и r по формулам (3), представляют собой полную систему интегралов движения. Самосогласованная функция распределения удовлетворяет кинетическому уравнению и также является интегралом движения. Будем искать самосогласованное распределение как функцию от интегралов C_i : $f(t, r) = f(C(t, r))$. Поскольку в проекции на конфигурационное пространство распределение должно давать равномерно заряженный эллипсоид, то уравнение для функции f

$$\iiint f(C) dp_x dp_y dp_z = \rho(t)\theta(1 - B(x, y, z)), \quad (4)$$

где $\rho(t)$ – плотность заряда в ступке, $B(x, y, z)$ – положительно определенная квадратичная форма, задающая эллипсоид, θ – функция Хевисайда

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}.$$

В случае 6-мерного фазового пространства в диссертации получены следующие решения уравнения (4):

$$f(C) = n\delta(1 - C_1^2 - \dots - C_5^2)\delta(C_6), \quad (5)$$

$$f(C) = n \frac{\theta(1 - C_1^2 - \dots - C_6^2)}{\sqrt{1 - C_1^2 - \dots - C_6^2}} \delta(C_5)\delta(C_6), \quad (6)$$

$$f(C) = n\theta(1 - C_1^2 - \dots - C_6^2)\delta(C_4)\delta(C_5)\delta(C_6). \quad (7)$$

Для случая 4-мерного фазового пространства (непрерывных пучков) самосогласованные распределения, зависящие от линейных интегралов движения, имеют следующий вид:

$$f(C) = n\delta(1 - C_1^2 - \dots - C_4^2), \quad (8)$$

$$f(C) = n \frac{\theta(1 - C_1^2 - \dots - C_4^2)}{\sqrt{1 - C_1^2 - \dots - C_4^2}} \delta(C_4), \quad (9)$$

$$f(C) = n\theta(1 - C_1^2 - \dots - C_4^2)\delta(C_3)\delta(C_4). \quad (10)$$

Распределение (8) является обобщением микроканонического распределения и сводится к нему, если уравнения движения разделены по степеням свободы.

На примере распределений (6) и (10) в диссертации проведено исследование этих решений, для них получены уравнения огибающих.

Во второй главе рассматриваются построение и свойства распределений фазовой плотности, приводящих к нелинейным полям пространственного заряда. В силу чрезвычайной математической сложности отдельно рассматриваются вопросы поперечного и продольного движения. В случае поперечного движения для усредненного пучка удается построить метод получения самосогласованных решений, основанный на построении функции распределения от одного интеграла типа энергии через плотность заряда в конфигурационном пространстве. Примененный метод позволяет получать значения предельных токов для различного типа нелинейностей, причем показано, что значение предельного тока сильно зависит от характера нелинейности, так, для распределения плотности в конфигурационном пространстве, убывающем квадратично, предельный ток вдвое меньше, чем при равномерном распределении заряда. Для пучков с плотностью заряда ρ , убывающей от центра к периферии по степенному закону

$$\rho \sim \left(1 - \frac{r^n}{a^n}\right), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

предельный ток I_n зависит от n следующим образом

$$I_n = I_\theta \cdot \frac{n}{n+2},$$

где I_θ – предельный ток при равномерном распределении заряда по сечению пучка, a – радиус пучка.

При равномерном распределении заряда и движении в линейных внешних полях эмиттанс пучка теоретически может принимать сколь угодно малые значения. При рассмотрении существенно нелинейных распределений заряда это принципиально не так. Для конкретных распределений плотности в диссертации получены минимальные значения согласованных с каналом эмиттансов пучка, достижимых для данных распределений. При распределениях фазовой плотности, приводящих к плотностям заряда (11), для эмиттанса $\mathcal{E}^{(n)}$ согласованного пучка при предельном значении тока получено

$$\mathcal{E}^{(n)} = A \frac{8}{\pi(n+2)^2} B\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{n+2}\right), \quad (12)$$

где A – эмиттанс согласованного с каналом пучка без учета пространственного заряда и того же радиуса a , B – бета-функция Эйлера. Например, для квадратичной плотности $n=2$ из (3) получим $\mathcal{E}^{(2)} = 0.56A$. Соотношение (12) быстро выходит на асимптотику, соответствующую большим значениям n

$$B\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{n+2}\right) \approx (n+2), \quad n \gg 1$$

и соответственно

$$\mathcal{E}^{(n)} \approx \frac{8}{\pi(n+2)} A, \quad n \gg 1. \quad (13)$$

Формула (13) справедлива при «больших» n , однако уже при $n=4$ ошибка составляет менее десяти процентов и в дальнейшем уменьшается. Результат (13) интересен медленной скоростью стремления $\mathcal{E}^{(n)}$ к нулю. Итак, при стремлении получать малые эмиттансы пучков, согласованных с фокусирующим каналом, необходимо стремиться к как можно более равномерному распределению заряда по сечению пучка. Кроме того, можно, уменьшая радиус пучка a , уменьшать и A и, следовательно, эмиттанс $\mathcal{E}$. Однако при этом следует помнить, что с уменьшением a уменьшается и предельный ток.

При нелинейных собственных поперечных полях частоты поперечных колебаний для частиц с разными амплитудами существенно различаются.

Наибольшее кулоновское смещение частоты происходит для частиц, совершающих приосевые колебания. Вычисление значений этих частот важно при оценках возможных резонансных явлений в пучке. В диссертации вычислены максимальные и минимальные значения частот поперечных колебаний для степенных распределений заряда.

Для продольного движения в рамках приведенной физической модели получено точное самосогласованное решение. Изучена проблема предельного тока, причем для исследованного решения получены не только ток безразличного равновесия I_n , но и предельные значения тока I_m по продольному движению в случае не равного нулю продольного эмиттанса пучка

$$I_m = I_n \left(1 - \frac{\mathcal{E}_z^2}{A_z^2} \right), \quad (14)$$

где $\mathcal{E}_z$ — продольный эмиттанс пучка, A_z — продольный аксептанс канала.

Показано, сколь значительное влияние неоднородная продольная группировка пучка оказывает на поперечное ограничение тока.

В третьей главе ряд точных решений самосогласованных уравнений применяется для анализа ряда явлений в динамике пучков с пространственным зарядом. Для поперечного движения в RFQ исследован вопрос о минимально возможном значении эмиттанса на выходе ускорителя, что связано с тем, что за время выхода пучка из ускорителя успевает существенно измениться фаза высокочастотного фокусирующего поля. Получены оптимальные фазы выхода пучка из ускорителя. Это — фазы прохождения через нуль ВЧ-поля.

Для условий входа пучка в RFQ на самосогласованной модели эллипсоидов исследовано начало процесса формирования сгустков при монохроматической инжекции. Получены качественные оценки параметров пучка и ускорителя, при которых продольная динамика в сгустке существенно меняется. Удастся отразить ситуацию, при которой сгусток частиц при увеличении влияния пространственного заряда переходит в качественно новое состояние с удвоенной частотой продольных колебаний. Этот результат подтверждается при численном моделировании динамики, что отражено в последней главе диссертации. Для получения простых оценок рассмотрен эллипсоид вращения с поперечными полуосями a , продольной полуосью c и зарядом Q . Внешнее продольное поле характеризуется частотой колебаний в нем частицы ω_0 без учета пространственного заряда. Пусть величина a пока постоянна, и в нашей системе отсчета все частицы первоначально имеют нулевую продольную скорость. Электростатическая энергия такого эллипсоида

$$W_e = \frac{3}{20\varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{\pi a^2 c} \cdot M_0, \quad (15)$$

где $M_0 = 2a^2 M_a + c^2 M_c$, M_a – поперечный, M_c – продольный коэффициенты формы эллипсоида. Под воздействием фазирующих сил эллипсоид начнет сжиматься в продольном направлении. При сжатии электростатическая энергия эллипсоида возрастает, в случае сжатия до диска его энергия

$$W_d = \frac{3Q^2}{40\varepsilon_0 a}. \quad (16)$$

Следует отметить, что и продольные, и поперечные кулоновские силы при сжатии эллипсоида в диск остаются конечными. Рост электростатической энергии идет за счет убыли потенциальной энергии частиц во внешнем поле. Если этот прирост $\Delta W = W_d - W_e$ приравнять к исходной потенциальной энергии сгустка

$$W_{ext} = \frac{m\omega_0^2}{2e} \iiint_V \rho(x, y, z) z^2 dV, \quad (17)$$

то мы получим условие, при котором частицы уже не могут преодолеть центр сгустка. Решение уравнения $\Delta W = W_{ext}$ есть

$$Q_b = \frac{4\pi\varepsilon_0 m\omega_0^2 a^2 c^3}{3e(\pi a c - 2M_0)}. \quad (18)$$

Если перейти от зарядов сгустков к току пучка $I = Q\lambda / C$ (λ – длина волны ускоряющего поля, C – скорость света) и ввести традиционную величину I_l предельного тока, при котором силы кулоновского расталкивания и внешнего сжатия полностью равны, то (18) преобразуется к следующему:

$$I_b = I_l \cdot \frac{M_c}{(\pi a / c - 2M_0 / c^2)}. \quad (19)$$

Итак, I_b – ток бифуркации, при котором происходит удвоение частоты продольных колебаний и начиная с которого частицы более не могут преодолеть центр сгустка. Этот ток существенно меньше предельного, например для шара $I_b = I_l / (3\pi - 6)$, т.е. $I_b \approx 0.3I_l$.

В этой же главе рассмотрено приближенное решение самосогласованных уравнений для “длинных” сгустков, с помощью которого исследована возможность параметрических резонансов при колебаниях продольно несогла-

сованного пучка, параметрически воздействующих через пространственный заряд на поперечное движение. Для функции распределения фазовой плотности в 6-мерном фазовом пространстве

$$f(\vec{r}, \vec{r}'; \tau) = f_0 \frac{\theta(F_1 - A_z^2)}{\sqrt{F_1 - A_z^2}} \delta(F_0 - A_x^2 - A_y^2), \quad (20)$$

где f_0, F_0, F_1 – соответствующие постоянные, A_i^2 – квадратичные интегралы движения, получена система уравнений для огибающих:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r_x}{d\tau^2} + Q_x r_x - \frac{F_0^2}{r_x^3} - \frac{2r_c^3}{r_z(r_x + r_y)} &= 0, \\ \frac{d^2 r_y}{d\tau^2} + Q_y r_y - \frac{F_0^2}{r_y^3} - \frac{2r_c^3}{r_z(r_x + r_y)} &= 0, \\ \frac{d^2 r_z}{d\tau^2} + Q_z r_z - \frac{F_1^2}{r_z^3} &= 0. \end{aligned} \quad (21)$$

В системе (21) $r_c^3 = \left(\frac{\lambda}{\gamma}\right)^3 \frac{I}{I_0}$, $I_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{m_0 c^3}{e}$.

В диссертации получен спектр критических частот для линеаризованных уравнений огибающих. Приводится пример расчета инкремента нарастания амплитуды в зоне параметрической неустойчивости, обусловленной резонансной передачей энергии из продольных колебаний в поперечные.

Для продольно однородного пучка построена теория возмущений решения системы уравнений Власова-Пуассона. Получен спектр значений частот поперечных колебаний с учетом пространственного заряда, при котором движение частиц становится неустойчивым. Неустойчивости имеют степенной характер нарастания и проявляются в форме вынужденного резонанса. Механизм возникновения резонансов состоит в том, что имеющееся в начальный момент возмущение плотности заряда эволюционирует во времени и оказывает периодическое вынужденное воздействие на движение частиц в пучке.

В четвертой главе рассмотрен ряд вопросов нелинейной нестационарной динамики пучков в линейных ускорителях с учетом пространственного заряда. Усредненные параметры пучка описываются в настоящее время известными, неплохо работающими моделями, сложнее дело обстоит при описании малых групп частиц, например, приводящих к появлению ореола пучка ионов. В диссертации рассмотрена простая физическая модель образования ореола.

В этой модели вводится основной стационарный сгусток и в его кулоновском поле и внешнем фокусирующем поле происходит движение малой группы частиц с амплитудой продольных колебаний, превышающей размер сгустка по продольной координате, и с малой амплитудой поперечных колебаний. При сочетании внешнего собственного поля сгустка и внешнего линейного поля траектории частиц оказываются незамкнутыми и происходит достаточно быстрый рост амплитуды поперечных колебаний отдельных частиц и практически необратимый, из-за перемешивания фаз, рост эмиттанса. По существу, предлагается гипотеза о том, что ореол образуется за счет рассеяния отдельных частиц на макроскопических неоднородностях пучка. В рассматриваемой упрощенной модели пучка роль неоднородности играет сам основной сгусток.

И на простых моделях, и при моделировании динамики замечен процесс перераспределения энергии по степеням свободы. Особую роль, в связи с этим, играют состояния пучков с равными по степеням свободы энергиями. Согласно гипотезе равномерного распределения, при этих состояниях минимизированы переходы энергии из одной степени свободы в другую, приводящие к ухудшению качества пучка. В диссертации впервые сформулированы условия равномерного распределения в RFQ с учетом принципиальной нелинейности продольных колебаний и получены условия адиабатического изменения параметров RFQ, при которых сохраняется равенство энергий вдоль всего ускорителя. При определенных физических условиях получены соотношения для роста эмиттанса за счет перераспределения энергии.

В последнем параграфе четвертой главы представлены результаты численного исследования формирования сгустка в RFQ. Предлагается такое изменение параметров и геометрии ускорителя, которое позволяет уменьшить ширину продольного спектра скоростей в пучке до полутора раз в широком интервале токов от нуля до 100 мА. Предлагаемые изменения рассчитаны на инжекцию непрерывного пучка, дальнейшего снижения ширины спектра можно достичь при специально отсеченном пучке на входе. Для токов далеких от предельных процесс фазовых колебаний качественно мало отличается от случая $I = 0$, происходит уменьшение частоты продольных колебаний – потенциальная яма несколько уплощается. Однако начиная с некоторых значений тока, в нашем случае порядка $1/3$ от предельного, в фазовом движении происходят качественные изменения, приводящие, в частности, к тому, что с ростом тока растет и продольный эмиттанс. Для того чтобы в сгустке не возникало больших перепадов кулоновского потенциала, нужно, чтобы не возникало больших плотностей заряда. Для этого, не доходя до точки бифуркации, нужно ослабить внешние фокусирующие силы (в нашем случае мы полностью снимаем фазировку) и дать возможность заряду перераспределить плотность. Кулоновские силы нелинейны и в области линейности внешних сил, и при перераспределении заряда возникающее новое фазовое распределение будет приводить к меньшим

плотностям в центре сгустка при последующих колебаниях. Естественно, процесс дрейфа должен быть достаточно кратковременным, чтобы частицы не успели разойтись настолько, чтобы вызвать обратный эффект увеличения спектра или вообще выпасть из процесса ускорения. При этом можно так выбрать параметры, что в определенном интервале токов спектр будет лишь уменьшаться. Поиски оптимального режима проводились численными методами. Численная оптимизация по спектру приводит к следующим числам: дрейф с восьмого по четырнадцатый периоды. Результат моделирования динамики на всей длине RFQ показывает, что энергетический спектр на уровне отсечки 0.1 от максимума в RFQ с дрейфом уменьшился по сравнению с исходной RFQ в 1.5 раза. Значения тока пучка при этом изменялись вплоть до 100 мА. На **рис. 1** изображено изменение продольного среднеквадратичного эмиттанта пучка в зависимости от номера периода ускорения при трех значениях тока для обычного варианта RFQ, а на **рис. 2** – для оптимизированного варианта RFQ.

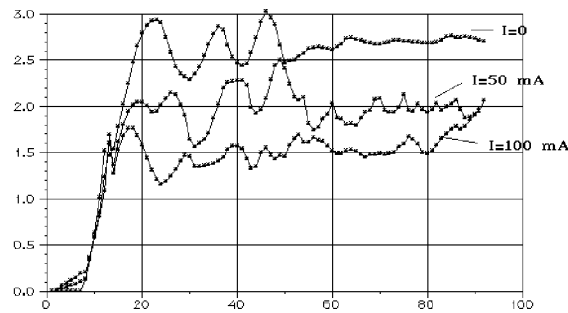


Рис. 1. Среднеквадратичный продольный эмиттанс для неоптимизированного варианта RFQ.

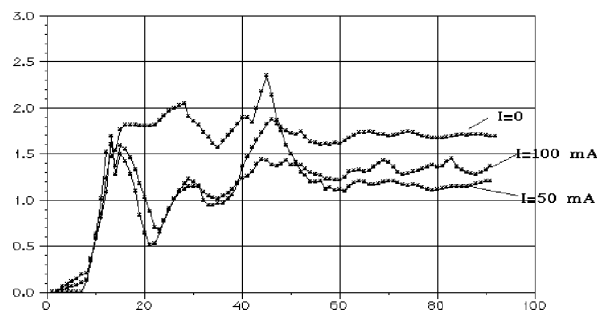


Рис. 2. Среднеквадратичный продольный эмиттанс для оптимизированного варианта RFQ.

В приложении рассмотрены вопросы динамики частиц в ускорителях с пространственно периодической высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Рассмотрен механизм формирования эффективности ускорения на оси многоэлектродного зазора. Получено правило векторного сложения эффективностей отдельных зазоров. Получены основные соотношения по устойчивости поперечного движения. Эти результаты являются новыми для систем с фокусировкой ускоряющими полями. Они помещены в приложение, поскольку не затрагивают вопросов пространственного заряда непосредственно. Однако именно благодаря развитию техники ускорителей вопросы самосогласованной динамики ионов представляют не только абстрактно теоретический, но и вполне практический интерес.

В заключении подводится итог проведенных исследований. Изложенный в диссертации научный материал должен послужить дополнительной теоретической базой для понимания физических процессов, происходящих в интенсивных пучках ионов, и может быть использован для численных оценок по динамике пучка при создании линейных ускорителей. Отмечен ряд важных физических особенностей в полученных результатах и некоторые возможности для дальнейшего исследования.

Полученные основные результаты, вошедшие в диссертацию, можно сформулировать следующим образом.

1. Построенные решения кинетического уравнения Власова в 4-мерном и 6-мерном фазовых пространствах являются точными. На основе этих решений, как показано в диссертации, можно делать соответствующие оценки физических процессов в пучках. Подчеркнем еще одно возможное применение полученных результатов. В настоящее время существует большое количество компьютерных программ для динамики частиц, и полученные решения являются хорошим тестовым материалом для данных программ, особенно в конфигурационном 3-мерном пространстве.
2. Разработанный метод решения самосогласованной стационарной задачи динамики для продольно однородных пучков с нелинейным полем пространственного заряда позволяет находить предельно большие токи и предельно малые эмиттансы пучка. Нелинейность поля существенным образом влияет на предельные токи. Что же касается проблемы предельно малых эмиттансов, то в случае равномерного распределения заряда ее не существует вовсе, т.к. в гладком приближении предельный ток соответствует нулевому эмиттансу пучка. Совершенно иначе дело обстоит при учете нелинейности. Сочетание линейного фокусирующего поля и нелинейного поля

пространственного заряда образует такой потенциал, в котором и в случае предельного тока для частиц с ненулевым радиусом нет состояния безразличного равновесия. Таким образом, поперечные колебания должны происходить и в предельном случае, а для того чтобы пучок при этом оставался согласованным (в данном случае стационарным), необходимо заполнение частицами соответствующей области фазового пространства. Величина этой области получена в диссертации.

3. Получено самосогласованное решение для продольного движения. Это решение важно не только тем, что дает возможность оценить влияние кулоновского поля на продольное движение. Интересным представляется и результат о плотности пространственного продольного распределения заряда, существенно влияющий и на поперечное движение.
4. С помощью полученных распределений в диссертации исследован ряд конкретных явлений в ускорителях. Получены значения фаз выхода пучка из ускорителя, минимизирующих рост эмиттанса во время вывода пучка. Исследован начальный этап формирования сгустков в RFQ и получено значение тока, при котором наблюдается удвоение частоты малых продольных колебаний за счет возникновения кулоновского “барьера” в центре сгустка. В дальнейшем эта задача исследована для RFQ при моделировании пучка. При этом подтверждено наличие данного эффекта, носящего негативный для пучка характер. Предложены меры по изменению геометрии RFQ, минимизирующему воздействию на пучок данного эффекта.
5. Исследован процесс воздействия возможной продольной рассогласованности пучка на поперечное движение. Получены зоны параметрической неустойчивости и инкременты нарастания амплитуды колебаний.
6. Для одного распределения фазовой плотности в 4-мерном фазовом пространстве построена теория возмущений. Выявлены неустойчивости, характерные для вырожденных распределений, и получен спектр частот поперечных колебаний, при которых возникают данные неустойчивости. Спектр получен для частот, учитывающих кулоновский сдвиг частоты, и из него можно получить резонансные значения токов или плотностей заряда.
7. При изучении нелинейных нестационарных процессов численно исследована модель роста эмиттанса пучка за счет перераспределения энергии по степеням свободы. Переход энергии осуществляется благодаря нелинейной связи двух колебательных систем (продольного и поперечного движения), а необратимость роста ореола пучка возникает благодаря процессу перемешивания фаз в нелинейной колебательной системе.
8. С помощью численного моделирования исследован процесс формирования сгустков в RFQ при различных значениях входных токов. Расчеты показывают, что при применении предложенного в диссертации изменения геометрии RFQ происходит существенное снижение продольного эмиттанса пучка на выходе ускорителя.

Система интегродифференциальных самосогласованных уравнений Власова-Пуассона является фундаментальной при изучении динамики пучков в линейных ускорителях ионов. Основу диссертации представляют новые методы решения и сами решения этой системы, а также ряд приложений представленных решений в моделях пучков.

Основные результаты опубликованы в работах:

- [1] Буданов Ю.А. Распределение фазовой плотности в шестимерном фазовом пространстве для интенсивных пучков ионов. // ЖТФ, 1984, т. 54, №6, с. 1068-1075.
- [2] Буданов Ю.А. К теории ускорения и фокусировки высокочастотными квадрупольями. // ЖТФ, 1991, т. 61, в. 7, с. 162-170.
- [3] Барсуков А.Б., Буданов Ю.А. О возможности использования квадрупольной высокочастотной фокусировки в линейных ускорителях протонов на энергии выше 100 МэВ. // ЖТФ, 1992, т. 62, в. 9, с. 136-140.
- [4] Буданов Ю.А., Козлов А.В., Мальцев А.П. Моделирование динамики частиц в линейном ускорителе ионов с использованием гауссовской параметризации распределения заряда в пучке. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Техника физического эксперимента, 1985, в. 3/24, с. 48-50.
- [5] Буданов Ю.А., Мальцев А.П., Чумаков К.П. Методика выбора параметров пучка и ВЧ-согласователя на входе НЧУ-инжектора в бустер ИФВЭ с учетом сил пространственного заряда. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Техника физического эксперимента, 1986, в. 1/27, с. 38-40.
- [6] Барсуков А.Б. Буданов Ю.А., Мальцев А.П. и др. Оптимизированный вариант ускоряющей структуры с квадрупольной высокочастотной фокусировкой. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент), 1990, в. 10/18, с. 7-10.
- [7] Буданов Ю.А. Продольное кулоновское ограничение тока при изменяющейся синхронной фазе. - Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985, т. 2, с. 215-217.
- [8] Буданов Ю.А., Швецов В.И. О решениях уравнения Власова для равномерно заряженного эллипсоидального сгустка. - Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987, т. 1, с. 446-447.
- [9] Буданов Ю.А. О распределении фазовой плотности в пучке с нелинейным полем пространственного заряда. – Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987, т. 1, с. 444-445.

- [10] Буданов Ю.А., Швецов В.И. О возмущении плотности заряда в равномерно заряженном пучке. – Препринт ИФВЭ 88-133, Серпухов, 1988.
- [11] Буданов Ю.А. Об устойчивости распределения заряда в продольно однородном пучке. – Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1988, т. 1, с. 499-500.
- [12] Буданов Ю.А., Жеребцов А.В., Мальцев А.П., Тепляков В.А. Расчетные физические параметры линейного ускорителя для промышленных целей. – Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990, с. 124-128.
- [13] Буданов Ю.А. Рост эмиттанса пучка и связь степеней свободы по пространственному заряду. – Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т. 3, с. 243-248.
- [14] Буданов Ю.А. Об условии равномерного распределения в RFQ. – Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996, т. 2, с. 5-7.
- [15] Буданов Ю.А., Жеребцов А.В., Тепляков В.А. О возможности увеличения тока заряженных частиц в RFQ. – Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996, т. 2, с. 8-11.
- [16] Буданов Ю.А. Распределение фазовой плотности и теоретические предельные характеристики по поперечному движению в RFQ. – Труды XVI Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998, т. 2, с. 113-116.
- [17] Буданов Ю.А. Нестационарная трехмерная динамика заряженных сгустков эллипсоидов. – Труды XVII Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000, с. 130-132.
- [18] Буданов Ю.А. Параметрические резонансы и частота некогерентных колебаний в сильноточном пучке линейного ускорителя ионов. – Препринт ИФВЭ 82-105, Серпухов, 1982.
- [19] Буданов Ю.А. Об одной нелинейности в параметрической связи колебаний частиц в линейных ускорителях ионов. – Препринт ИФВЭ 82-179, Серпухов, 1982.
- [20] Буданов Ю.А., Мальцев А.П. Моделирование продольного движения сильноточного пучка в начальной части ускорителя с ВЧ-квадрупольной фокусировкой. – Препринт ИФВЭ 83-9, Серпухов, 1983.

- [21] Буданов Ю.А. О кулоновском ограничении тока по продольному движению в линейных ускорителях ионов. – Препринт ИФВЭ 85-104, Серпухов, 1985.
- [22] Буданов Ю.А., Жеребцов А.В., Козлов А.В., Мальцев А.П. Воздействие торцевых электрических полей резонатора на аксептанс фокусирующего канала НЧУ. – Препринт ИФВЭ 85-178, Серпухов, 1985.
- [23] Барсуков А.Б., Буданов Ю.А., Суренский А.В. и др. Выбор параметров ускоряющей структуры на Н-волне с квадрупольной ВЧ-фокусировкой. Ч. II. Расчет параметров по аналитическим моделям. – Препринт ИФВЭ 90-5, Протвино, 1990.
- [24] Барсуков А.Б., Буданов Ю.А., Суренский А.В. Выбор параметров ускоряющей структуры на Н-волне с квадрупольной ВЧ-фокусировкой. Ч. III. Расчет параметров канала по численным методам. – Препринт ИФВЭ 90-6, Протвино, 1990.
- [25] Budanov Yu., Zherebtsov A. The Dynamics of the Longitudinal Beam Emittance in the RFQ. – Proceeding of the International Workshop, BDO, 1994, St. Petersburg, Russia, p. 45-54.

Рукопись поступила 9 января 2004 г.

Ю.А. Буданов

Самосогласованные распределения фазовой плотности и физические модели пучков в линейных ускорителях ионов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 13.01.2004. Формат 60х84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 2,125. Уч.-изд.л. 1,7. Тираж 100. Заказ 179. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2004–2, И Ф В Э, 2004
