



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

96–81
На правах рукописи

Мальцев Анатолий Павлович

**ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ИОНОВ
С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ
ФОКУСИРОВКОЙ
(ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ УСКОРИТЕЛЕЙ,
ДИНАМИКА ЧАСТИЦ)**

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 1996

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук В.В.Кушин, доктор физико-математических наук профессор Н.М.Гаврилов, доктор физико-математических наук Ю.А.Свистунов.

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

Защита диссертации состоится “_____” _____ 1996 г. в
_____ часов на заседании специализированного Совета Д034.02.01 при Ин-
ституте физики высоких энергий (142284, Протвино Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета Д034.02.01 Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1996

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Ускорители заряженных ионов, в частности линейные ускорители (ЛУ), наряду с традиционным применением в ядерной физике широко используются в настоящее время для различных применений причем, потребности в пучках ускоренных ионов быстро растут. На первый план среди требований к промышленным ЛУ выступают потребительские качества, такие как: минимальные стоимость, вес и габариты, минимальные требования к помещению, экономичность, надежность, радиационная чистота, удобство в обслуживании, стабильные и качественные параметры пучка.

Одним из направлений в разработке ускорителей, удовлетворяющих этим требованиям, являются линейные ускорители ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (ВЧКФ). В ИФВЭ (г. Протвино) на протяжении ряда лет велась разработка линейного ускорителя подобного типа. Составная часть этого ускорителя — начальная секция с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) — получила широкое признание во всем мире. Доказана на практике работоспособность ВЧКФ и в основной части линейных ускорителей ионов, в диапазоне десятков МэВ.

Диссертация посвящена актуальной задаче — разработке теории ускорителей с ВЧКФ и методик расчета их параметров, расчету конкретных ускорителей и исследованию динамики ускоряемых частиц, поиску путей совершенствования ускорителей с ВЧКФ.

Состояние вопроса (исторический очерк)

Идею использования ВЧК фокусировки в линейных ускорителях ионов впервые высказал В.В. Владимирский в 1956 г. Он предложил создавать ВЧ квадрупольную компоненту поля в ускоряющих зазорах с помощью штырей (рогов) на торцах соседних трубок дрейфа (рис. 1а).

Работоспособный вариант ВЧКФ был предложен в 1964-1967 гг. в работах В.А. Теплякова с соавторами. В этом варианте в зазор между трубками дрей-

фа вводится промежуточный электрод под промежуточным потенциалом; к торцам промежуточного электрода и трубок дрейфа крепятся рога, создающие квадрупольную компоненту поля (рис. 1б). Введение промежуточного электрода позволяет повысить темп ускорения при заданном градиенте фокусирующей компоненты и обеспечить наиболее благоприятную фокусировку для всех частиц сгустка ускоряемых ионов. Необходимое распределение напряжения по ускоряющим промежуткам обеспечивается в резонаторах с продольным магнитным полем (в Н-резонаторах, рис.3а,б), которые имеют малые габариты и высокое шунтовое сопротивление в области малых и средних энергий.

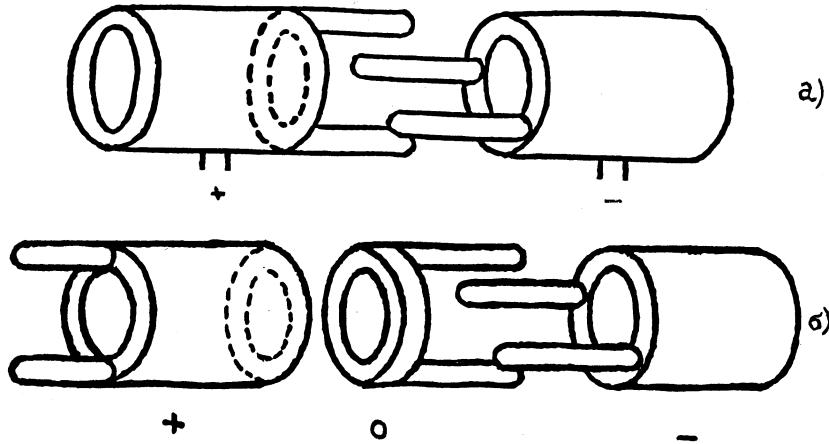


Рис. 1. Вариант Владимира (а); двойной зазор (б).

Экспериментальная отработка ВЧКФ была начата в ИФВЭ в 1968 г. работами по созданию модели линейного резонансного ускорителя протонов с ВЧКФ на 4 МэВ. Для инжекции в этот ускоритель первоначально использовался резервный форинжектор линейного ускорителя И-100, а затем начальная часть ускорителя (НЧУ) с ПОКФ, предложенная в 1969 г. И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым. Формы электродов канала с ПОКФ показаны на рис. 2, на рис.3 в,г даны поперечные сечения резонаторов.

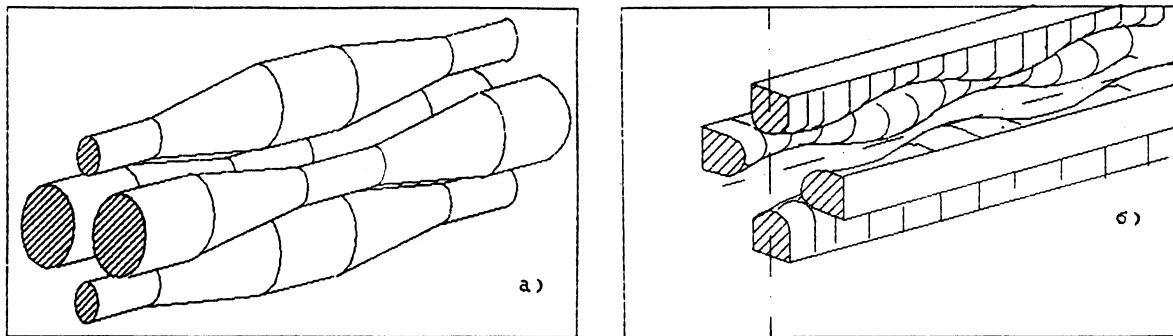
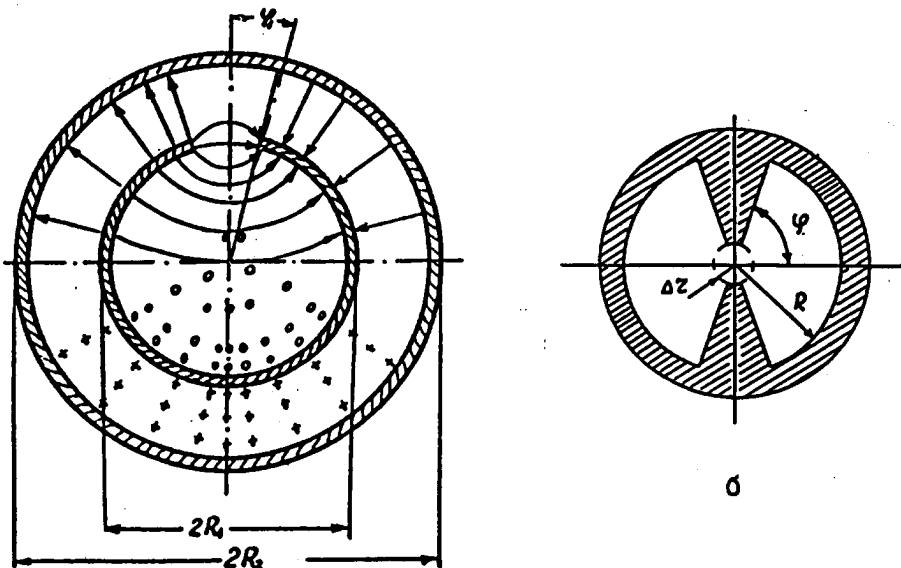
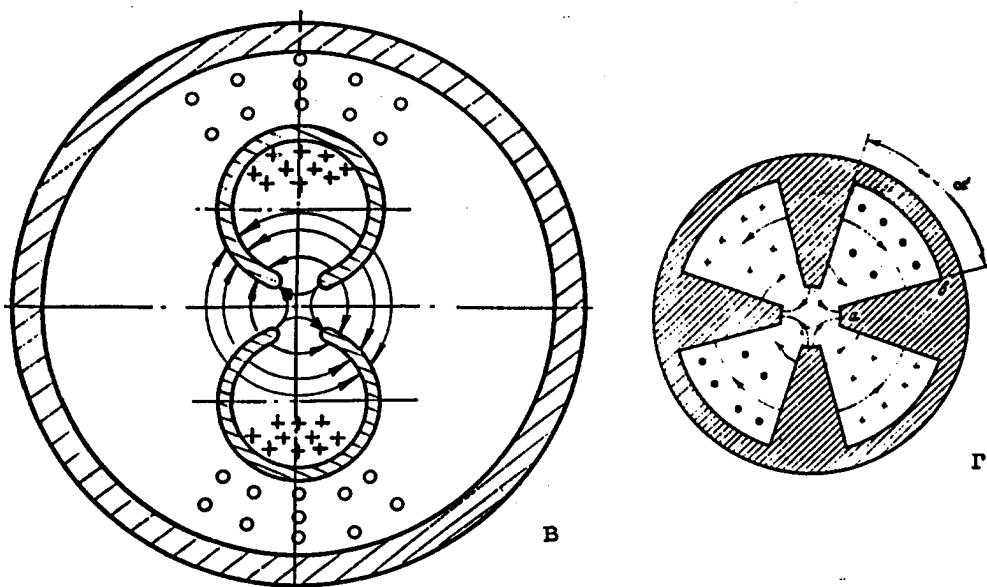


Рис. 2. Ускоряющие электроды НЧУ: а) цилиндрические; б) лопастные.



а



в

г

Рис. 3. Схемы поперечных сечений резонаторов: а) Н-резонатор, б) двухкамерный резонатор, в) двойной Н-резонатор (НЧУ), г) четырехкамерный резонатор (НЧУ).

Еще в 1969 г. на 7-й Международной конференции по ускорителям в докладе И.М.Капчинского, А.П.Мальцева и В.А.Теплякова был представлен полномасштабный проект ускорителя с ВЧКФ, в котором использовались идеи как пространственно-однородной, так и пространственно-периодической ВЧК-фокусировок. Но в то время специалисты по ускорителям высказывали сомнения в работоспособности ускорителя с ВЧКФ. Требовалась практическая проверка теоретических и конструктивных принципов, положенных в основу ускорителя, на полноразмерных моделях. Запуск модели на 4 МэВ состоялся в 1971 г., первая НЧУ с ПОКФ была запущена в 1972 г. Эксперименты на моделях были успешными.

Эти эксперименты стимулировали разработку (1972-1973 гг.) проекта линейного ускорителя протонов с ВЧКФ на энергию 30 МэВ (УРАЛ-30) для использования в качестве инжектора в бустер протонного синхротрона ИФВЭ (рис. 4). Запуск НЧУ (2 МэВ) и первой секции основной части ускорителя (С1 ОЧУ на 16 МэВ) состоялся в 1975 г. Физический пуск ускорителя в целом был произведен в 1977 г. В 1980 г. ускоритель был смонтирован в здании бустера, и началась его опытная эксплуатация. На основе полученной информации в 1982 г. была проведена модернизация и доводка ряда его систем. С 1983 г. инжектор в бустер сдан в эксплуатацию в составе ускорительного комплекса ИФВЭ.

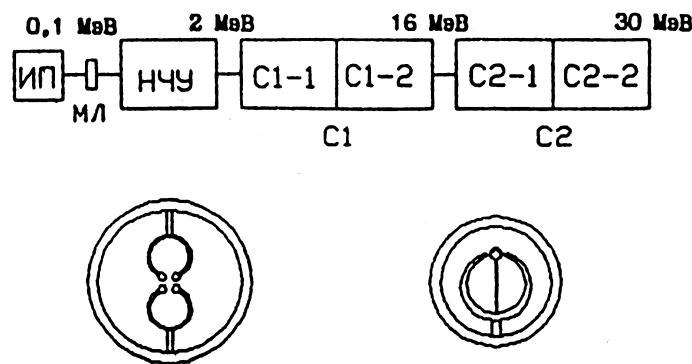


Рис. 4. Блок-схема инжектора в бустер.

Опыт двенадцатилетней работы линейного ускорителя с ВЧКФ в жестких эксплуатационных условиях показал, что при соответствующем качественном исполнении его систем он не уступает, в принципе, ускорителю Альвареца ни по надежности, ни по физическим параметрам.

Длительное время (с 1968 по 1977 гг.) работы по ВЧК-фокусировке, проводимые в ИФВЭ, были уникальными. Настоящий взрыв интереса к ускорителям с ПОКФ во всем мире произошел в 1978-1979 гг., чему немало способствовали публикации сотрудников Лос-Аламосской Национальной лаборатории (США), которые велись с большим размахом. В настоящее время во многих научных центрах мира проектируется, сооружается и действует большое число (которое сейчас уже трудно точно назвать) ускорителей с пространственно-однородной ВЧК-фокусировкой, предназначенных для самых различных применений, опубликованы сотни работ.

Цель диссертационной работы

Автор принимал участие в разработке линейного ускорителя нового типа с высокочастотной квадрупольной фокусировкой, начиная с появления первых идей. Целью работ, составивших предмет данной диссертации, было:

- разработка методик расчета параметров ускорителя с ВЧК-фокусировкой;
- выбор и расчет физических параметров конкретных ускорителей с ВЧКФ;
- исследование особенностей динамики частиц в ускорителе с ВЧКФ аналитически, методом численного моделирования и путем анализа экспериментальных данных;
- разработка методик расчета трехмерных электростатических полей в областях со сложной геометрией ускоряющих электродов;
- разработка программ численного моделирования динамики частиц с учетом различных факторов, влияющих на динамику, например таких, как пространственный заряд пучка, aberrации фокусирующего канала, конструктивные и электрические погрешности, паразитные компоненты поля в резонаторе и другие;
- поиск путей совершенствования характеристик ускорителя с ВЧК фокусировкой.

Метод исследований

В работе проводятся теоретические исследования, включающие в себя аналитические расчеты и численное моделирование, а также анализ экспериментальных результатов.

Научная новизна и практическая ценность

Научная новизна результатов данной диссертации обусловлена тем, что ускоритель с ВЧК фокусировкой разрабатывался в ИФВЭ впервые в мире. Были разработаны специальные методы расчета его параметров. Изучены особенности динамики частиц. Накоплен опыт длительной эксплуатации действующих ускорителей с ВЧКФ.

Результаты диссертационной работы внедрены на действующем ускорителе с ВЧК-фокусировкой — инжекторе в бустер протонного синхротрона ИФВЭ У-70 и на ряде других ускорителей с ВЧКФ, созданных в ИФВЭ.

Апробация работы и публикации

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались и обсуждались на международных конференциях по ускорителям заряженных частиц (Кембридж, США, 1967 г.; Ереван, СССР, 1969 г.; Новосибирск, СССР, 1986 г.; Рим, Италия, 1988 г.), всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1977 г.; Протвино, 1982 г.; ИТЭФ, Москва, 1990 г.), всесоюзных семинарах по линейным ускорителям (Харьков, 1979 и 1985 гг.).

По теме диссертации опубликовано 43 работы и 5 научных отчетов, приравненных к публикациям и имеющих номер госрегистрации.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 244 страницах (210 страниц машинописного текста, 107 рисунков, 7 таблиц). Состоит из оглавления, 4 глав, заключения, списка литературных источников из 182 наименований на 21 страницах и приложения на 13 страницах.

На защиту выносятся:

1. Разработка методик расчета параметров ускорителя с ВЧКФ.
2. Выбор и расчет физических параметров конкретных линейных ускорителей ионов с ВЧКФ, в том числе действующего инжектора в бустер протонного синхротрона У-70.
3. Исследование особенностей динамики частиц в ускорителе с ВЧК-фокусировкой.
4. Предложение и реализация мер по совершенствованию параметров ускорителя с ВЧКФ.
5. Решение частных задач динамики частиц, таких как:
 - разработка методик расчета трехмерных электростатических полей в областях со сложной геометрией электродов;
 - разработка пакета программ для численного моделирования динамики частиц;
 - исследование вопросов статического и динамического согласования пучка с каналом ускорителя;
 - исследование влияния на динамику частиц различных факторов: паразитных компонент поля в резонаторе, конструктивных и электрических погрешностей канала, aberrаций канала, пространственного заряда пучка.
6. Сравнительный анализ параметров линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой и линейных ускорителей других типов с точки зрения требований к ускорителям при их промышленном применении и демонстрация высоких потребительских качеств ускорителя с ВЧКФ на примере ряда конкретных проектов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе “Развитие методов расчета физических параметров линейных ускорителей ионов с ВЧК-фокусировкой” обсуждаются методы расчета параметров ВЧК-фокусировки, которые использовались на различных этапах развития работ по данной тематике.

В первом разделе вводятся определения основных физических параметров ускоряюще-фокусирующего канала с ВЧК-фокусировкой. Линейный ускоритель с ВЧКФ относится к классу резонансных линейных ускорителей ионов с автофазировкой частиц в процессе ускорения и жесткой квадрупольной фокусировкой. Поэтому для него справедливы все принципы и понятия, присущие этому классу ускорителей с некоторыми специфическими уточнениями. Для расчета параметров

канала с ВЧКФ используются специальные методы, что связано не только со сложной структурой ускоряюще-фокусирующего поля в канале, но и с тем, что это поле зависит от времени.

В том же разделе обсуждаются способы расчета электрического поля в ускоряюще-фокусирующем канале. Используются особенности применяемых ускоряющих структур. Максимум магнитного поля в Н-резонаторах (рис. 3) находится вдали от ускоряющего канала — в резонирующих камерах. Электрическое поле сосредоточено в области разреза камер там, где расположены ускоряющие электроды. На краях разреза возбуждается разность потенциалов электрического поля. Ускоряющие и фокусирующие компоненты поля формируются электродами, подключенными к краям разреза. Малость геометрических размеров электродов ($\ll \lambda/4$, λ — длина волны) и отмеченные выше особенности резонаторов позволяют электродинамическую задачу расчета ВЧ-поля в канале свести к квазиэлектростатической. Компоненты поля записываются в виде производных скалярного потенциала:

$$E_v = -\delta u / \delta v, \quad v = x, y, z, \quad (1)$$

$$u = U \cos \omega t \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \cos(2n\theta) I_{2n}(l_m r) [a_{2n,m} \sin(m\kappa z) + b_{2n,m} \cos(m\kappa z)].$$

Для определения коэффициентов этого ряда нужны граничные условия на образующих апертурного цилиндра. Нахождение этих условий представляет собой самостоятельную задачу, которая на разных этапах разработки ВЧКФ решалась разными способами.

Во втором разделе первой главы рассматривается графоаналитический метод расчета параметров ВЧКФ, который использовался при создании модельных ускорителей. Уравнения поперечного движения частиц интегрируются здесь в приближении тонких линз, т.е. в предположении, что координаты x, y мало меняются на участках интегрирования, равных периоду ускорения или его части (в НЧУ — $1/2$ периода). Матрицы участков перемножаются и выводятся выражения для параметров μ , ν_{min} , ν_{max} через жесткость фокусировки ζ и фактор дефокусировки η . Например, для структуры ФД в ОЧУ

$$\cos \mu = 1 + 2\eta + 0,5(\eta^2 - \zeta^2), \quad (2)$$

$$\eta = \tau \sin \phi, \quad \zeta = \tau \sigma, \quad \sigma = \sigma_s \sin \phi + \sigma_c \cos \phi, \quad \tau \sim \vartheta U. \quad (3)$$

Здесь ϑ — эффективность; ϕ — фаза; U — напряжение; μ — набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки, ν_{min} , ν_{max} — мгновенные частоты колебаний. Коэффициент σ носит название “квадрупольность”. В координатах (η, ζ) строятся диаграммы устойчивости с параметрами $\mu = const$, $\nu_{min} = const$, $\nu_{max} = const$ (рис. 5). Выводятся выражения для эффективности и квадрупольности через гармоники поля (1). Коэффициенты гармоник можно рассчитать аналитически, положив $E_z = const$ в зазорах на образующих апертурного цилиндра в плоскостях симметрии канала и $E_z = 0$ вне зазоров. Для одиночного ВЧ квадруполя (одиночного зазора типа рис.1а) получаем

$$\vartheta = \vartheta_0 \cos \psi, \quad \sigma_s = 0, \quad \sigma_c \sim \operatorname{tg} \psi / (R_a / \beta_s \lambda)^2. \quad (4)$$

Здесь $\psi = \pi l_p / (\beta_s \lambda)$; l_p — длина рога; ϑ_0 — эффективность при $l_p = 0$; R_a — расстояние до рогов от оси канала (радиус апертуры).

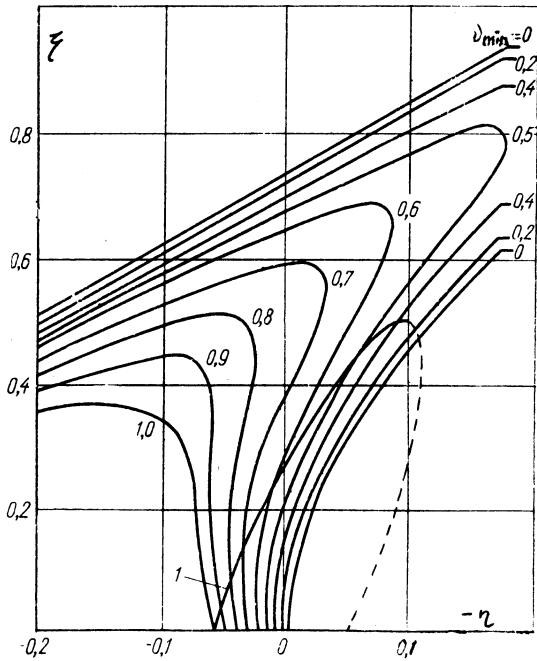


Рис. 5. Диаграмма устойчивости для системы ФФДД.

Эллипс состояний нужным образом и минимизировать различие по μ и ν в области рабочих фаз (рис.5).

Но главное достоинство двойного зазора в том, что здесь развязаны между собой функции ускорения и фокусировки, что позволяет оптимизировать параметры канала и ускорителя в целом. В п. 1.2.4 обсуждаемого раздела показано, что наилучшим сочетанием параметров обладает двойной зазор, у которого в первой половине зазора нет рогов. Для оптимизированного варианта двойного зазора была построена расчетная диаграмма, которая позволяет быстро выбирать коэффициенты квадрупольности σ_s и σ_c при заданном ϑ , обеспечивающие нужные μ , ν_{min} и ν_{max} .

Длина ВЧ квадруполя в ОЧУ составляет обычно около $0,3\beta_s\lambda$, причем, квадруполь приходится на фазы с минимальной скоростью изменения ВЧ поля. Это позволяет построить матрицы периода фокусировки в более точном приближении толстых линз (различие в μ , получаемых по формулам и на ЭВМ не превышает 2%).

Первые образцы НЧУ с ПОКФ рассчитывались с использованием идеализированного распределения потенциала в рабочей области:

$$u(r, \theta, z, t) = U[-(2/\pi)I_0(k_1 r)\vartheta \sin k_1 z + r^2/(2R_0^2) \cos 2\theta] \cos \omega t. \quad (6)$$

Здесь $k_1 = 2\pi/(\beta_s \lambda)$, R_0 — “средний радиус канала”. Форма электродов, удовлетворяющих (6), имеет гиперболический профиль в поперечном сечении и синусоидальный в продольном. Были построены расчетные диаграммы, позволяющие быстро выбирать параметры фокусировки.

В действительности, электроды НЧУ всегда отличаются от идеализированных, и распределение (6) кроме основных гармоник должно содержать некий спектр азимутальных и продольных гармоник. В ИФВЭ использовались два вида ускоряющих электродов НЧУ (рис.2): в виде тел вращения с конусными переходами и в виде лопастей с постоянным радиусом кривизны поперечного сечения. Для обоих вариантов были разработаны методы расчета на ЭВМ электрического поля в рабочей области.

В третьем разделе первой главы идет речь о методе расчета параметров ЛУ с ВЧКФ по измерениям поля на электролитической ванне. (Метод моделирования полей с помощью электролитической ванны во время проектирования инжектора в бустер (1972 г.) был единственным доступным точным методом). Применялась так называемая глубинная ванна. Исследуемые электроды погружались в электролит так, чтобы их плоскости симметрии совпадали с его поверхностью. На электроды подавалось напряжение. Зондом прослеживалось распределение потенциала. Измерить таким способом поля для всех размеров и форм электродов ускорителя практически немыслимо. Задачу удалось решить, выбрав и зафиксировав те размеры электродов, от которых зависят некие стандартные граничные условия на образующих апертурного цилиндра, необходимые для определения коэффициентов ряда (1). Такая методика, эффективная в ОЧУ, для НЧУ не применялась, так как в канале НЧУ на апертурном цилиндре нет образующих, удовлетворяющих вышенназванным условиям.

В четвертом разделе первой главы описываются методы расчета на ЭВМ электрических полей в каналах с ВЧКФ. Из возможных методов расчета (сеточные методы, методы граничных интегральных уравнений, методы Монте-Карло и др.) наиболее подходящим для имеющихся в наличии ЭВМ оказался метод Монте-Карло в сочетании с методом собственных функций. Этот метод имеет ряд достоинств: простота программной реализации, малая чувствительность к размерности и объему области, возможность находить решение задачи в нужных точках, не решая ее во всей области. Последнее обстоятельство, существенно снижающее требования к ресурсам ЭВМ, послужило основным критерием для выбора метода.

Распределение потенциала записывается в виде ряда (1), граничные условия для которого рассчитываются каким-либо из методов Монте-Карло. Использовался метод "блужданий по сферам". Из точки P_0 строится случайная траектория $Q_0 \rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow \dots (Q_0 \equiv P_0)$, которая в конце блуждания попадает на границу Γ (в ε -окрестность). Точки Q_n — центры сфер с радиусами, равными минимальным расстояниям до Γ . Следующая Q_{n+1} выбирается на сфере путем случайного выбора направления. Потенциал в точке P_0

$$u(P_0) \simeq \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N u(\gamma_s), \quad (7)$$

где γ_s — случайная точка выхода на Γ в конце блуждания. При $N \rightarrow \infty$ ряд (7) сходится по вероятности к точному решению.

Можно существенно ускорить сходимость (7) и уменьшить дисперсию, если использовать следующий прием. Массив исследуемых точек $z_i, i = 1 \dots m$ покрывается последовательностью сфер $S_k, k = 1 \dots n$, частично перекрывающих друг друга. Для точек $\vec{\rho}$ внутри сферы S_k потенциал определяется из одной серии блужданий:

$$\begin{aligned} u(\vec{\rho}) &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K(\vec{R}_j, \vec{\rho}) u_j, \\ K(\vec{R}, \vec{\rho}) &= R(R^2 - \rho^2)/|\vec{R}_j - \vec{\rho}|^3, \end{aligned} \quad (8)$$

где u_j — случайная реализация потенциала, \vec{R}_j — радиус-вектор случайной точки на первом шаге j -го блуждания. Ядро $K(R, \vec{\rho})$ рассчитывается на первом шаге. Производится серия блужданий для сфер S_k . Методом линейного программирования оптимизируется число сфер, их расположение и число блужданий для каждой сферы так, чтобы уменьшить общее количество блужданий и получить заданную точность расчета.

Метод Монте-Карло достаточно эффективен в ОЧУ. Для НЧУ он также применим, но требует много счетного времени. Для НЧУ были разработаны более быстрые методы расчетов на основе спивки решений в частичных областях.

Сеточные методы и метод граничных интегральных уравнений при решении трехмерных задач со сложной геометрией границ нуждаются в больших ресурсах ЭВМ. Применение их для расчетов каналов с ВЧКФ стало возможным только в последнее время, хотя для решения отдельных задач по тематике ускорителя с ВЧКФ они используются в ИФВЭ уже давно.

Во второй главе “Расчет, исследование, наладка и модернизация линейных ускорителей с ВЧКФ” обсуждаются проблемы, которые решались на разных этапах создания и запуска ускорителя с ВЧКФ. Опыт, полученный в ИФВЭ при наладке ускорителей с ВЧКФ, во многих отношениях уникален.

Разработка ускорителя с ВЧКФ началась с создания модели ускорителя на 4 МэВ (второй и третий разделы главы). Модель строилась на технической базе И-100. Поэтому основные параметры модели (длина волны, энергия инжекции, аксептанс и др.) были близки к соответствующим величинам И-100. Первый запуск ускорителя с входным пучком от резервного форинжектора И-100 состоялся в 1970 г. В 1971-1972 гг. резервный форинжектор был заменен на НЧУ с ПОКФ. Главный результат, полученный на модели, заключался в доказательстве работоспособности идеи ВЧК-фокусировки. Была разработана технология изготовления элементов ускоряющей системы и ускоряюще-фокусирующего канала, отработана методика сборки и настройки ускорителя, получены исходные данные для рабочего проектирования полномасштабного ускорителя с ВЧКФ.

Четвертый раздел второй главы посвящен проекту УРАЛ-30, инжектору в бустер У-70. Обсуждается логика выбора схемы ускорителя (рис.4) и особенности схемы. Отметим некоторые из них.

Параметры УРАЛ-30 выбирались, исходя из требований бустера с учетом модельных экспериментов, особенностей ускоряющей системы, технологических возможностей и стоимости ускорителя.

Энергия перехода между НЧУ и ОЧУ (2 МэВ) — результат компромисса: ускорять в НЧУ дальше невыгодно, а делать НЧУ на меньшую энергию, значит затруднить размещение ВЧ квадрупольей и зазоров на первых периодах ОЧУ и ухудшить параметры ОЧУ.

Секции ОЧУ разбиты на подсекции с одинаковым приростом энергии и шунтовым сопротивлением согласно требованиям системы быстрой стабилизации параметров ВЧ поля (системы автокомпенсации).

В секции до 16 МэВ использован несимметричный оптимизированный двойной зазор (типа рис. 1б), дальше — симметричный двойной зазор с естественной балансированной емкостной нагрузки. Напряжение на обоих половинах двойного зазора одинаково и постоянно вдоль секций.

В ОЧУ принята структура фокусировки ФФДД (в НЧУ — структура ФД).

В НЧУ (в первом варианте) использованы технологически простые электроды в виде модулированных цилиндров (рис. 2а). Формирование сгустка проводилось в “квазистационарном” режиме с постоянной частотой малых продольных колебаний и сохраняющейся длиной сгустка. В ныне действующей НЧУ использован более свободный режим формирования, нацеленный на получение минимального продольного эмиттанса; цилиндрические электроды заменены на лопастные (рис.2б).

Результаты пуско-наладочных экспериментов на макетной стадии разработки УРАЛ-30 описаны в разделе 5 второй главы. Секции ускорителя по мере их готовности монтировались и испытывались на временных стендах во временных помещениях. После сборки ускорителя в здании бустера началась его опытная эксплуатация. Главной целью макетных испытаний и опытной эксплуатации было выявление слабых мест в системах и отработка приемов работы с ускорителем нового типа. В 1982 г. на основе полученной информации была проведена модернизация ряда систем (6-й раздел), в частности повышена электропрочность ускоряющей системы. В диссертации обсуждаются приемы, использованные при модернизации ускоряюще-фокусирующего канала в условиях жестко фиксированной геометрии существующей ускоряющей системы.

С 1983 г. УРАЛ-30 начал регулярно работать на бустер в составе ускорительного комплекса ИФВЭ. Итоги двенадцатилетней работы УРАЛ-30 таковы: в среднем число простоев бустера по вине инжектора составляло не более 2% (что соответствует нормам надежности линейных инжекторов), параметры пучка удовлетворяли требованиям бустера.

В связи с модернизацией протонного синхротрона У-70 был разработан проект нового инжектора в бустер (УРАЛ-60). Проект УРАЛ-60 обсуждается в разделе 7 второй главы. В этом проекте принят ряд новых принципиальных и технических решений, существенно улучшающих параметры ускорителя. В ОЧУ будут использован экономичный двухкамерный резонатор вместо Н-резонатора (рис. 3б). Принят более высокий темп ускорения (2 МэВ/м). Фиксировано напряжение на ВЧ квадруполе, напряжение на аксиально-симметричной половине двойного зазора растет пропорционально β_s . Структура фокусировки сделана однородной (всюду ФД).

Оптимизируется эффективное шунтовое сопротивление резонатора. Секции ускорителя более точно согласованы по динамике частиц.

Проектирование, создание и совершенствование линейных ускорителей с ВЧКФ постоянно сопровождались исследованием конкретных вопросов динамики частиц. Третья глава диссертации “Исследование динамики частиц в ЛУ с ВЧК фокусировкой” посвящена их обсуждению.

При разработке ускорителя с ПОКФ возникла задача согласования стационарного фазового портрета пучка из ионной пушки с зависящим от фазы ВЧ- поля аксептансом ускорителя. В настоящее время существует несколько способов такого согласования. Первым по времени (1975 г.) был предложенный в ИФВЭ согласователь на входе канала НЧУ в виде отрезка прямолинейной немодулированной четырехпроводной линии со специально подобранными размерами (радиусом канала и длиной). Подробное изложение теории согласователя и исследование его работы дано в разделах 2-4 третьей главы. Этот согласователь имеет ряд достоинств, но у него обнаружился серьезный недостаток — чувствительность к электрическим полям в торцевой области резонатора — и в ныне действующей НЧУ на инжекторе в бустер он заменен на согласователь типа “раструб”.

Раздел 5 посвящен изучению влияния aberrаций канала с ВЧК-фокусировкой на рост эмиттанса пучка. Показано, что в канале с ВЧКФ влияние aberrаций на пучок имеет особенности. Вследствие зависимости фокусирующих сил от фазы ВЧ-поля “нелинейные хвосты” на фазовых портретах (рис.6) на различных периодах фокусировки закручиваются то в одну, то в другую сторону. Усредненная скорость накопления нелинейных искажений в канале с ВЧКФ меньше, чем в статическом канале с такими же параметрами фокусировки и спектральным составом азимутальных гармоник.

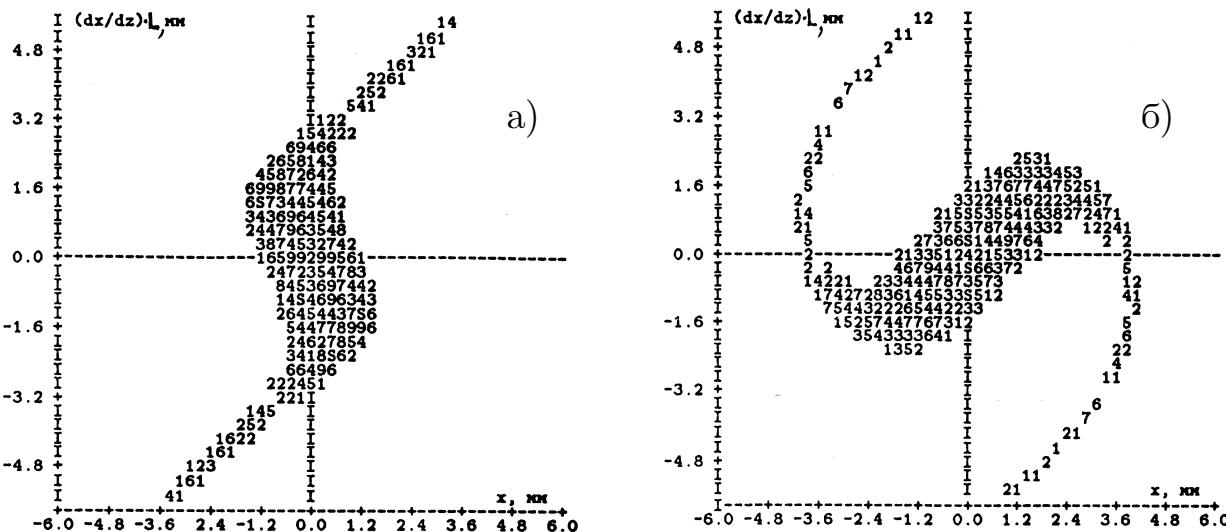


Рис. 6. Фазовый портрет частиц сечения $\varphi_{ex} = +30^\circ$ в процессе ускорения; $a_6 \neq 0, I_o(k_1 r) \neq 1$.

В шестом разделе третьей главы описаны алгоритмы и программы, которые использовались при численном моделировании сильноточной динамики в ЛУ с ВЧКФ на ЭВМ с ограниченными ресурсами. Успех моделирования обеспечивался за счет удачных модельных представлений о распределении электрического заряда в сгустках пучка. Например, в НЧУ использовалось большое различие между частотой продольных колебаний и частотой изменения формы поперечного сечения пучка. Продольные колебания “воспринимают” поперечную форму в среднем как аксиально-симметричную. Это позволяет снизить размерность задачи и свести ее к однопараметрической модели. С ее помощью изучалось поведение фазовых траекторий на продольной фазовой плоскости НЧУ (рис.7). При большой плотности заряда некоторые траектории закручиваются в локальные спирали.

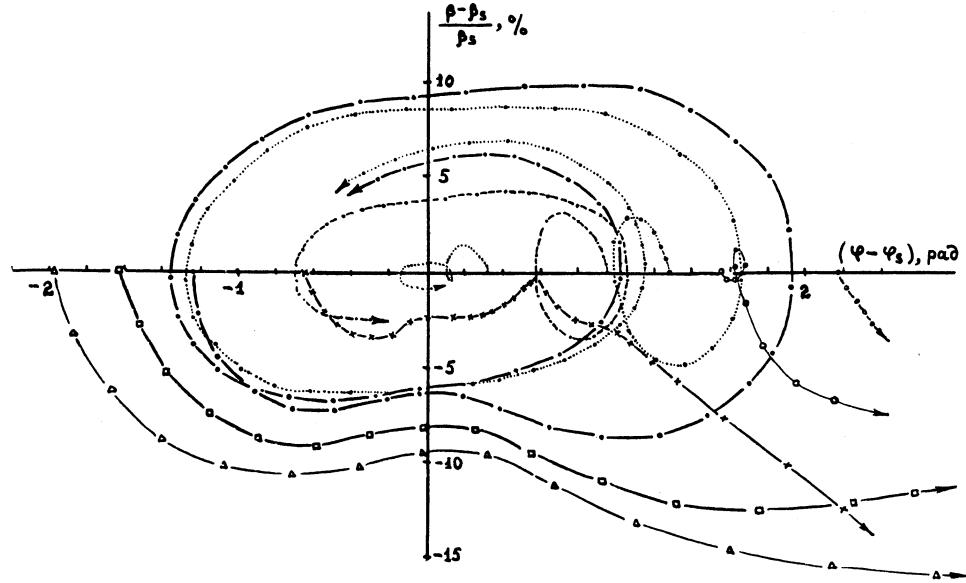


Рис. 7. Фазовые траектории частиц.

Эффективной моделью явились также гауссовская параметризация поперечного распределения заряда в пучке:

$$\rho_i(x, y) \sim \exp \left[-\frac{x^2}{2(\sigma_x^i)^2} - \frac{y^2}{2(\sigma_y^i)^2} \right], \quad (9)$$

где $(\sigma_{x,y}^i)^2$ — эмпирические дисперсии. Были разработаны также программы для решения задач с произвольным распределением заряда.

Много внимания при разработке ускорителей с ВЧКФ уделялось проблеме допусков на погрешности конструктивных и электрических параметров ускоряющих каналов (раздел 7 третьей главы). Подход к проблеме допусков претерпел эволюцию от классических “одночастичных” оценок к исследованию ансамбля частиц в канале с погрешностями, причем как аналитическими, так и численными методами, подробно обсуждаемыми в данном разделе.

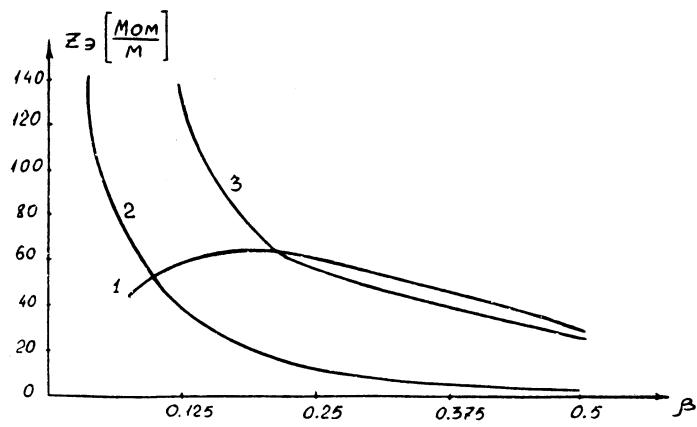


Рис. 8. Эффективное шунтовое сопротивление.

1 — ускоритель Альварепа (с трубками нейтального ускорителя ионов — ускордрейфа); 2 — Н-резонатор (инжектор в бустер ИФВЭ); 3 — оптимизированный вариант Н-структуры.

В четвертой главе “Вопросы разработки ЛУ с ВЧКФ для промышленных применений” дается сравнительный анализ параметров линейных ускорителей с ВЧКФ и ЛУ других типов с точки зрения требований к ускорителям промышленного назначения. При надлежащем техническом исполнении систем ускоритель с ВЧКФ ни по надежности, ни по физическим параметрам не уступает наи-

более распространенному типу ли-
рителю Альварепа, а по габари-
стам, стоимости и экономичности в
области малых и средних энергий
(рис.8) заметно его превосходит.

Сравнение ЛУ с ВЧКФ и ускорителей с другими видами ВЧ-фокусировки показывает, что ускоритель с ВЧКФ имеет более высокие величины жесткости фокусировки, предельного тока в канале и яркости пучка. В тех случаях, когда необходимы плотные интенсивные пучки с высокой яркостью, преимущества ВЧКФ неоспоримы. В диссертации приведен пример — проекты, в которых ЛУ с ВЧКФ используются как инжекторы в мощные изохронные циклотроны. По совокупности своих качеств ЛУ с ВЧКФ представляет несомненный интерес для многих практических применений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты диссертационной работы можно обобщить в виде следующих пунктов:

1. Разработаны и реализованы на практике методы расчета параметров ускорителя с ВЧК фокусировкой.
2. Проведен выбор и расчет физических параметров конкретных линейных ускорителей ионов с ВЧКФ, в частности ускорителя на 30 МэВ, инжектора в бустер У-70.
3. Исследованы особенности динамики частиц в ускорителях с ВЧК фокусировкой методом численного моделирования и путем анализа экспериментальных данных, полученных на действующих ускорителях.
4. Предложены и реализованы меры по совершенствованию ускорителей с ВЧКФ во время их наладки и модернизации и при разработке новых проектов.

5. Решены следующие частные задачи динамики частиц:

- разработка методов расчета электрических полей в трехмерных областях между ускоряющими электродами со сложной геометрией;
- разработка алгоритмов и программ для численного моделирования динамики частиц;
- исследование вопросов согласования пучка;
- изучение влияния на динамику частиц возмущающих факторов (параметры компоненты поля, конструктивные и электрические погрешности канала, aberrации, пространственный заряд пучка).

6. Проведен сравнительный анализ параметров линейного ускорителя с ВЧКФ и ЛУ других типов с точки зрения требований к ускорителям промышленного назначения и показаны высокие потребительские качества ЛУ с ВЧКФ на примере ряда конкретных проектов.

По теме диссертации автором опубликованы **следующие работы:**

1. А.П. Мальцев, Э.А. Зотова, В.А. Тепляков. Экспериментальное изучение фокусировки ускоряющим полем. // ПТЭ, 1964, №4, с. 20.
2. А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. Расчет параметров зазора для фокусировки ускоряющим полем. // ПТЭ, 1965, №4, с. 29.
3. А.П. Мальцев, Э.А. Зотова, В.А. Тепляков. Фокусировка ускоряющим полем и фазовые колебания. // ПТЭ, 1965, №7, с.17.
4. А.П. Мальцев, С.М. Ермаков, В.А. Тепляков. Оптимальный вариант фокусировки ускоряющим полем. // АЭ, 1967, т. 23, вып. 3, с. 195.
5. В.А. Тепляков, А.П. Мальцев, С.М. Ермаков, А.В. Зотов, Б.К. Шембель. Ускоряющая система линейного ускорителя ионов. – Бюллетень изобретений, 1967, №19, а.с. №202362 от 04.03.1966 г.
6. V.A. Teplyakov, A.P. Mal'tsev, S.M. Ermakov, V.B. Stepanov, B.K. Shembel. Selffocusing linac. — In: Proceed. of the 6 Intern. Conf. on High Energy Accel., Cambridge, USA, 1967, p. A-50.
7. В.А. Тепляков, А.П. Мальцев, С.М. Ермаков, А.В. Зотов, В.А. Юрченко. Линейный ускоритель протонов с фокусировкой ускоряющим полем. – Препринт ИФВЭ 63-35 К, Серпухов, 1968.
8. А.П. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Расчетные параметры модели линейного ускорителя с фокусировкой ускоряющим полем. – Препринт ИФВЭ 69-2, Серпухов, 1969.
9. И.М. Кағчинский, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. О проекте линейного ускорителя протонов с пониженной энергией инжекции и высокой интенсивностью пучка. В кн.: Труды 7 Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Изд. Академии Наук Армянской ССР, Ереван, 1970, т.1, с. 153.

10. А.П. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Расчетные параметры начальной части ускорителя с ВЧ-квадрупольной фокусировкой. – Препринт ИФВЭ 71-116, Серпухов, 1971.
11. Е.А. Коноплев, А.П. Мальцев, В.Б. Степанов. Численное моделирование динамики частиц в начальной части ускорителя с ВЧ квадрупольной фокусировкой. – Препринт ИФВЭ 72-24, Серпухов, 1972.
12. С.А. Ильевский, И.М. Капчинский, Г.Ф. Кузнецов, А.П. Мальцев, К.Г. Мирзоев, В.В. Нижегородцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков, М.А. Холodenко, И.М. Шалашов. Пуск секции линейного ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой. // АЭ, 1973, т. 34, вып. 1, с. 56; препринт ИФВЭ 72-17, Серпухов, 1972.
13. Н.И. Голосай, Г.Н. Дерновой, С.А. Ильевский, В.В. Клоков, Н.Н. Куторга, И.Г. Мальцев, А.П. Мальцев, В.С. Севостьянов, И.М. Шалашов. Экспериментальное исследование начальной части ускорителя с ВЧ квадрупольной фокусировкой. // АЭ, 1975, т. 39, вып. 2, с. 123.
14. Б.М. Горшков, С.А. Ильевский, Г.М. Коломенский, С.П. Кузнецов, Н.Н. Куторга, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, К.Г. Мирзоев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков, И.М. Шалашов. Пуск линейного ускорителя протонов УРАЛ-15 с квадрупольной ВЧ фокусировкой. // ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 11, с. 2328.
15. А.А. Егоров, В.А. Зенин, С.А. Ильевский, С.П. Кузнецов, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, В.В. Нижегородцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Запуск линейного ускорителя протонов УРАЛ-30. // ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 8, с. 1643; препринт ИФВЭ 79-151, Серпухов, 1979.
16. В.А. Зенин, С.А. Ильевский, Н.Н. Куторга, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, В.В. Нижегородцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Линейный ускоритель протонов – инжектор в бустер ИФВЭ. // Труды 8 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982. – Дубна, 1983, т.2, с. 77.
17. В.А. Зенин, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, В.В. Нижегородцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Опыт работы линейного ускорителя с ВЧК фокусировкой. // Труды 13 Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Новосибирск, "Наука", 1987, т. 1, с. 312.
18. Г.Н. Дерновой, Е.А. Коноплев, А.П. Мальцев, А.В. Жеребцов. Расчет параметров ускорителя с ВЧ квадрупольной фокусировкой по измерениям поля на электролитической ванне. – Препринт ИФВЭ 75-1, Серпухов, 1975.
19. А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев. Расчет трехмерных электростатических полей в линейных ускорителях ионов методом собственных функций в сочетании с методом Монте-Карло. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, Харьков, 1979, вып. 2(4), с. 68.
20. А.П. Мальцев, В.И. Швецов. О расчете электрических полей методом собственных функций в сочетании с методом Монте-Карло. – Препринт ИФВЭ 86-164, Серпухов, 1986.

21. В.Б. Степанов, А.П. Мальцев, И.А. Журавлев, В.А. Тепляков, В.С. Севостьянов. Юстировка ускоряющих зазоров в ускорителе с квадрупольной ВЧ фокусировкой. // ПТЭ, 1972, №6, с.20.
22. А.П. Мальцев, Е.А. Коноплев, А.С. Пашеньков, А.В. Жеребцов. Зависимость аксептанса линейного ускорителя ионов от фазы ускоряющего ВЧ поля и рост эмиттанса ускоренного пучка. // ЖТФ, 1980, т. 50, вып. 7, с. 1527.
23. D.A. Demichovsky, A.P. Mal'tsev, E.A. Myae, V.I. Stolpovsky, V.A. Teplyakov, E.F. Troyanov, V.A. Zenin, A.V. Zherebtsov. 30 MeV RFQ linac parameters. In: Proceed. of the European Part. Accel. Conf., Roma, June, 7 ... 11, 1988, vol. 1, p. 605.
24. Ю.А. Буданов, А.П. Мальцев. Моделирование продольного движения сильно-точного пучка в начальной части ускорителя с ВЧ квадрупольной фокусировкой. – Препринт ИФВЭ 83-9, Серпухов, 1983.
25. Г.Н. Дерновой, А.П. Мальцев. Высокочастотный согласователь ускорителя с четырехпроводной линией. – Бюлл. изобрет. №3, 1978, с. 225, а.с. №574115 (приоритет 29.12.1975 г.).
26. Г.Н. Дерновой, А.П. Мальцев. Высокочастотное согласование пучка на входе линейного ускорителя ионов с пространственно-однородной фокусировкой. // ЖТФ, т. 52, вып. 6, 1982, с. 1209; – Препринт ИФВЭ 80-48, Серпухов, 1980.
27. Ю.А. Буданов, А.П. Мальцев, К.П. Чумаков. Методика выбора параметров пучка и ВЧ согласователя на входе НЧУ инжектора в бустер ИФВЭ с учетом сил пространственного заряда.// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып. 1(27), М., 1986, с. 38.
28. Ю.А. Буданов, А.В. Жеребцов, А.В. Козлов, А.П. Мальцев. Воздействие торцевых электрических полей резонатора на аксептанс фокусирующего канала НЧУ. – Препринт ИФВЭ 85-178, Серпухов, 1985.
29. Ю.А. Буданов, А.В. Козлов, А.П. Мальцев. Моделирование динамики частиц в линейном ускорителе ионов с использованием гауссовской параметризации распределения заряда в пучке. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента. Вып. 3(24), М., 1985, с. 48.
30. А.П. Мальцев, Г.А. Шулаев. Модификация метода теории возмущений в приложении к теории допусков в линейных ускорителях ионов. // ЖТФ, 1982, т. 52, вып.8, с. 1604; Препринт ИФВЭ 81-21, Серпухов, 1981.
31. А.П. Мальцев. Допуски в линейных ускорителях ионов с квадрупольной фокусировкой ускоряющим полем. // АЭ, 1966, т. 21, вып. 4, с. 295.
32. А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. Расчетные физические параметры ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя с ВЧК фокусировкой – инжектора в бустер протонного синхротрона ИВФЭ. – Препринт ИФВЭ 90-29, Протвино, 1990.
33. А.Б. Барсуков, Ю.А. Буданов, А.П. Мальцев, А.В. Суренский. Выбор параметров ускоряющей структуры на Н-волне с квадрупольной ВЧ-фокусировкой. Часть II. Расчет параметров канала по аналитическим моделям. – Препринт ИФВЭ 90-5, Протвино, 1990.

34. А.А. Боровиков, О.В. Ершов, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, В.В. Нижегородцев, В.В. Поповкин, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Разработка линейного ускорителя для промышленных целей. В сб.: Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990, Дубна, 1992, т. 2, с. 120.
35. Ю.А. Буданов, А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. Расчетные физические параметры линейного ускорителя для промышленных целей. В сб.: Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990. – Дубна, 1992, т. 2, с. 124.
36. А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев, В.В. Нижегородцев, С.А. Стрекаловских. Получение протонного пучка с малым эмиттанном в ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. – В сб.: Труды 12-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва. – 1990, Дубна, 1992, т. 2, с. 61.
37. A.A. Borovikov, O.V. Ershov, A.P. Mal'tsev, I.G. Mal'tsev, V.V. Nezegorodsev, V.V. Popovkin, V.B. Stepanov, V.A. Teplyakov. Small size Ion Linacs for Industry, Medicine and Research. In: Abstracts for the 12 Intern. Conf. on the Application of Accelerators in Reseach and Industry, Denton, TX, USA, 1992, p. 144.
38. Ю.А. Буданов, А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. Расчетные параметры дейtronного ускорителя для прикладных целей./ Доклад на 13 Совещании по ускорителям заряженных частиц. – Аннотации докладов, Дубна, 1992, с. 152.
39. Ю.М. Адо, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга, А.П. Мальцев, Ю.А. Стависский, В.А. Тепляков, У.Г. Уфимцев. Мощный нейтронный генератор на основе циклического ускорителя. В сб.: Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М.: Наука, 1977, т. 2, с. 317.
40. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга, А.П. Мальцев, А.А. Наумов, В.А. Тепляков. Суперциклон – перспектива дальнейшего развития мезонных фабрик циклического типа. В сб.: Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М.: Наука, 1977, т. 1, с. 123.
41. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, В.В. Калинченко, В.В. Кольга, А.П. Мальцев, Л.М. Онищенко, В.А. Тепляков. Дейtronный циклотронный комплекс на базе сверхпроводящих секторных магнитов. В сб.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям низких и средних энергий. – Киев: “Наукова думка”, 1982, с. 182; препринт ОИЯИ Р 9-81-734, Дубна, 1981.
42. Ю.А. Буданов, А.В. Козлов, А.П. Мальцев. О проекте дейtronного линейного ускорителя на 15 МэВ с ВЧК-фокусировкой — инжектора в сверхпроводящий циклотронный комплекс. (Расчетные физические параметры ускоряюще-фокусирующего канала). – Препринт ИФВЭ 90-126, Протвино, 1990.

43. В.А. Зенин, А.П. Мальцев, И.Г. Мальцев, В.В. Нижегородцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Линейный протонный ускоритель с ВЧК-фокусировкой на 30 МэВ. – Препринт ИФВЭ 93-147, Протвино, 1993.

Рукопись поступила 15 октября 1996 г.

А.Н.Малыцев.

Линейные ускорители ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой
(теория и расчет ускорителей, динамика частиц).

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 16.10.96. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 2,3. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 100. Заказ 802. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 96–81, И Ф В Э, 1996
