

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Линейные ускорители ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой

Ю.А. Буданов, В.П. Голубков, И.А. Грушичев,
А.П. Мальцев, А.А. Тимофеев, Н.А. Чёрный

Высокочастотная квадрупольная фокусировка (ВЧКФ) совершила в своё время революцию в технике линейных ускорителей ионов. Дается краткий исторический очерк её развития. Обсуждаются решения проблем, возникавших в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) при разработке и создании линейных ускорителей с ВЧКФ. Пространственно-однородная ВЧКФ (ПОКФ, или RFQ) используется сейчас в начале практически всех линейных ускорителей ионов. Ускоритель с пространственно-периодической ВЧКФ (ППКФ, или RFQ DTL) успешно работает в составе ускорительного комплекса ИФВЭ. ППКФ имеет ряд выгодных достоинств как при ускорении протонов, так и для применения в линейных ускорителях тяжёлых ионов.

Ключевые слова: линейный ускоритель ионов, высокочастотная квадрупольная фокусировка, технология изготовления и настройки

PACS number: 29.20. – c

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.01.039854>

Содержание

1. Введение (1094).
 2. Краткий исторический очерк (1095).
 3. Немного об ускорителях с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, созданных в Институте физики высоких энергий (1095).
 4. Методы расчёта параметров пространственно-периодической квадрупольной фокусировки (1097).
 5. Ускоряющие системы (1099).
5.1. Н-резонатор. 5.2. SH-резонатор и 2K-резонатор. 5.3. Расчётные программы. 5.4. Экономичность ускорителя. 5.5. Технологические решения.
 6. Система высокочастотного питания (1104).
6.1. Система автоматической компенсации. 6.2. Система высокочастотного питания УРАЛ-30М.
 7. Наладка и эксплуатация ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (1105).
 8. Заключение (1105).
- Список литературы (1106).

Ю.А. Буданов^(а), В.П. Голубков^(б), И.А. Грушичев^(с),
А.П. Мальцев^(д), А.А. Тимофеев^(е), Н.А. Чёрный^(ф)
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Институт физики высоких энергий,
пл. Науки 1, 142281 г. Протвино, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: ^(а) Yury.Budanov@ihep.ru, ^(б) kernen2011@yandex.ru,
^(с) Igor.Grushichev@ihep.ru, ^(д) Anatoliy.Maltsev@ihep.ru,
^(е) Alexander.Timofeev@ihep.ru, ^(ф) jird@yandex.ru

Статья поступила 15 ноября 2024 г.,
после доработки 24 января 2025 г.

1. Введение

До появления высокочастотной квадрупольной фокусировки (ВЧКФ) наиболее трудным местом при ускорении частиц в линейных резонансных ускорителях ионов был вход в ускоритель.

Здесь наиболее низкая скорость частиц и наибольшие сложности с размещением фокусирующих магнитных линз в трубках дрейфа. Приходилось использовать высокое напряжение на ионных источниках и увеличивать длину волны ВЧ поля в резонаторах.

Пучок из ионного источника необходимо сгруппировать в сгустки, чтобы захватить их в режим ускорения. Делалось это с помощью специальных устройств. При этом процент частиц, захваченных в режим ускорения, был около 60 %.

Разновидность ВЧКФ — пространственно-однородная квадрупольная фокусировка (ПОКФ, или RFQ по иностранной терминологии) — решила эти проблемы. Удалось существенно снизить энергию инжекции, уменьшить длину волны и повысить коэффициент захвата до 100 %.

Высокочастотная квадрупольная фокусировка имеет две разновидности: упомянутая выше ПОКФ и пространственно-периодическая квадрупольная фокусировка (ППКФ, или RFQ DTL). Колыбелью обоих видов фокусировки был ИФВЭ (ниже будет кратко описана история развития ВЧКФ).

ПОКФ в настоящее время широко известна и не нуждается в особом представлении. Она применяется практически во всех линейных ускорителях ионов в диапазоне от протонов вплоть до урана.

ППКФ успешно используется в протонном линейном ускорителе с ВЧКФ УРАЛ-30, который с 1985 г. по сей день работает в качестве инжектора в ускорительный комплекс ИФВЭ.

Технология изготовления ускорителей с ПОКФ хорошо отработана. Ускорители с ППКФ также претерпели свою эволюцию, но публикации о технологии изготовления таких ускорителей разбросаны по препринтам, докладам и журналам и не систематизированы. До сих пор эта технология кажется экзотикой.

В ИФВЭ в 2010 г. по заказу ОИЯИ (г. Дубна) был разработан проект линейного ускорителя тяжёлых ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (ЛУТИ с ВЧКФ), который рассматривался как один из вариантов для использования в качестве инжектора для коллайдера NICA/MPD. В данном проекте предлагалось применить ПОКФ в начальной части ускорителя и ППКФ в основной его части. Проектные параметры этого ускорителя были опубликованы [1]. Публикация вызвала повышенный интерес среди специалистов по ускорителям и среди потребителей ускоренных ионов.

Дело в том, что из-за низкой скорости ионов эффективность магнитной фокусировки в ЛУТИ невелика. Здесь лучше работает электрическая фокусировка (ВЧКФ относится к этому типу). ПОКФ в настоящее время используется в начальной части ЛУТИ. А вот в основной части по-прежнему применяются магнитные линзы. Несмотря на повышенный интерес, никто до сих пор не решился использовать ППКФ в основной части ЛУТИ из-за недостатка информации о технологии изготовления такого ускорителя.

Назрела необходимость систематизации и обзора публикаций о расчёте, конструировании, изготовлении и настройке ускорителей такого типа.

2. Краткий исторический очерк

Идея фокусировать частицы с помощью высокочастотных квадрупольных имеет давнюю историю. Впервые её высказал В.В. Владимирский в 1956 г. [2]. Он предложил создавать квадрупольную компоненту ВЧ поля в ускоряющих зазорах ускорителя Альвареса с помощью рогов на торцах трубок дрейфа. Но такой вариант ускорителя оказался малоэффективным.

Другой вариант формирования квадрупольной компоненты поля в ускоряющем зазоре был предложен в 1960 г. Г.М. Анисимовым и В.А. Тепляковым [3], а также независимо П. Лапостолем и Ф. Фером [4]. Здесь квадрупольное поле создаётся в зазорах между трубками дрейфа с прямоугольными взаимно перпендикулярными апертурными отверстиями.

Этот вариант фокусировки был проработан более детально: были предложены методы расчёта параметров фокусировки [5, 6], а также проведены успешные эксперименты по ускорению частиц в модельных ускорителях [7, 8]. Однако такая фокусировка принципиально слабая и может быть использована только для слаботочных ускорителей.

Более перспективным оказался предложенный В.А. Тепляковым в 1964 г. вариант высокочастотной квадрупольной фокусировки с использованием рогов в так называемом "двойном" зазоре [9]. Здесь в зазор между трубками дрейфа (между "основными", или, иначе, "бортовыми", электродами) помещён "промежуточный" электрод под промежуточным потенциалом. В этом варианте оказалось возможным путём подбора оптимальных параметров двойного зазора достичь высокого темпа ускорения при допустимой напряжённости электрического поля на рогах [10]. Ускоряющее напряжение между электродами предлагалось созда-

вать в резонаторе с продольным магнитным полем (в Н-резонаторе [11], см. раздел 4). При одинаковой длине волны диаметр Н-резонатора в 3–4 раза меньше диаметра резонатора Альвареса. На такой ускоритель в 1967 г. было получено авторское свидетельство [12].

Практическая реализация ускорителя с ППКФ была начата в ИФВЭ в 1968 г. с сооружения модели ускорителя на энергию 4 МэВ [13]. Инжекция в этот ускоритель осуществлялась с помощью резервного форинжектора линейного ускорителя ИФВЭ И-100. Запуск модели состоялся в 1971 г. [14].

Рождение идеи RFQ приходится как раз на период создания ускорителя на 4 МэВ (1969 г.). Основные положения теории были опубликованы И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым в знаменитых статьях [15, 16]. Детальная разработка теории была изложена в препринтах [17, 18]. Тогда же был предложен проект линейного протонного ускорителя с ВЧКФ на энергию 30 МэВ в составе начальной части ускорителя с ПОКФ и основной части ускорителя с ППКФ [19]. В 1969 г. В.В. Владимирский, И.М. Капчинский и В.А. Тепляков получили авторское свидетельство на изобретение ПОКФ [20].

Запуск ускорителя с ПОКФ как самостоятельной установки состоялся в 1972 г. [21]. Несмотря на то что все идеи были опубликованы, разработка ускорителя с ПОКФ велась в ИФВЭ в одиночку на протяжении 7 лет. И лишь в 1976–1977 г. к практической реализации идеи ПОКФ приступили в ИТЭФ (СССР) [22] и в Лос-Аламосе (США) [23]. После этого ускоритель с RFQ приобрёл большую популярность. В 1988 г. за изобретение RFQ И.М. Капчинскому и В.А. Теплякову была присуждена Ленинская премия и премия Американского физического общества.

В 1973 г. был разработан проект ускорителя с ВЧКФ (УРАЛ-30) в качестве инжектора в бустер протонного синхротрона У-70 [24]. УРАЛ-30 был изготовлен полностью в мастерских ИФВЭ, что говорит о его технологичности.

Первая часть ускорителя (до 16 МэВ) была запущена в 1975 г. [25], физический пуск всего ускорителя состоялся в 1977 г. [26]. Несколько лет ускоритель использовался как макет для изучения особенностей ускорителя нового типа и для выявления и устранения слабых мест в его системах.

На основе полученных данных канал ускорителя был пересчитан на более низкую напряжённость поля. После завершения строительства здания бустера УРАЛ-30 был в нём смонтирован и сдан в эксплуатацию для наладки бустера (1983 г.). С 1985 г. и по сей день УРАЛ-30 работает в ускорительном комплексе ИФВЭ в качестве инжектора в бустер. Расчётные параметры УРАЛ-30 приведены в [27], а экспериментальные в [28–31].

В настоящее время для замены физически устаревшего ускорителя УРАЛ-30 в ИФВЭ изготовлен новый ускоритель с ВЧКФ — УРАЛ-30М [32]. Кроме того, в ИФВЭ для исследовательских целей и по заказам сторонних организаций было создано ещё несколько линейных ускорителей с ВЧКФ.

3. Немного об ускорителях с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, созданных в Институте физики высоких энергий

Применение ПОКФ на входе линейных ускорителей ионов давно стало рутиной. Все основные идеи, используемые при формировании сгустков частиц в ускорите-

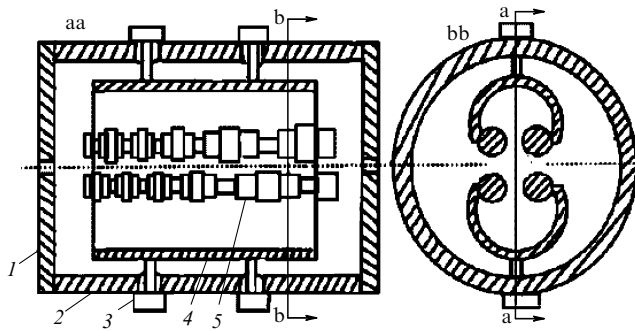


Рис. 1. Схема 2Н-резонатора: 1 — фланец, 2 — контейнер, 3 — узел крепления резонатора, 4 — резонатор, 5 — ускоряющий электрод.

лях с ПОКФ, которые сейчас считаются классическими, были впервые испробованы в ИФВЭ. К ним относятся: фокусировка и ускорение частиц в канале модулированной четырёхпроводной линии, адиабатическая группировка частиц, затем ускорение с постоянной равновесной фазой и, наконец, высокочастотное согласование пучка на входе в канал. Результаты численных и натурных экспериментов, проводимых при разработке ПОКФ, публиковались в виде препринтов, докладов и статей, упомянутых выше.

В качестве ускоряющей системы для RFQ в мире чаще всего используется четырёхкамерный резонатор (4К-резонатор). Этот тип резонатора был предложен в ИФВЭ [15], но в ускорителях с ПОКФ, созданных в ИФВЭ, предпочтение было отдано 2Н-резонатору [17, 36]. Схема одной из первых конструкций 2Н-резонатора показана на рис. 1.

Преимуществом 2Н-резонатора является тот факт, что в нём ближайшая паразитная мода колебаний далеко отстоит по частоте от рабочей моды. Это обеспечивает его технологичность и простоту настройки.

Первые 2Н-резонаторы изготавливались из стали. Рабочие поверхности покрывались гальванической медью толщиной 100 мкм. В теле резонаторов сверлились каналы охлаждения водой с ингибитором коррозии.

Впоследствии вместо стали для контейнеров и резонаторов ВЧКФ стал применяться алюминиевый сплав АМг-6, устойчивый к коррозии, более лёгкий, имеющий высокую теплопроводность и хорошие технологические свойства. Для изготовления резонаторов и контейнеров были использованы готовые, имеющие близкие к нужным размерам диаметры, толстостенные трубы из АМг-6. Для их охлаждения была разработана технология косо встречного сверления каналов в теле резонатора (контейнера) с помощью шнекового сверла с длиной рабочей части ~ 400 мм и закрытия наружных отверстий методом заварки трением (рис. 2).

Технология изготовления ускоряющих электродов ускорителя с ПОКФ постоянно совершенствовалась. Самые первые ускоряющие электроды изготавливались на токарных станках. Они имели вид тел вращения с диаметрами, модулированными вдоль ступенчатым образом (см. рис. 1), либо с конусными переходами (рис. 3а). Затем стали делать электроды в виде лопастей (рис. 3б) на станках с программным управлением [37, 38].

Материалом для изготовления электродов во всех случаях служила бескислородная медь марки МОБ. Для исследовательских целей в ИФВЭ было создано несколько ускорителей с ПОКФ.

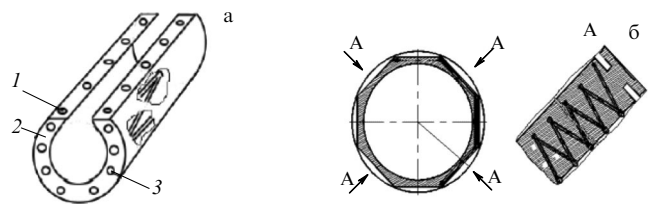


Рис. 2. (а) Эскиз резонатора ПОКФ с каналами охлаждения: 1 — отверстия для крепления электродов, 2 — торец резонатора, 3 — заваренные места выхода каналов; (б) расположение каналов охлаждения в теле контейнера.

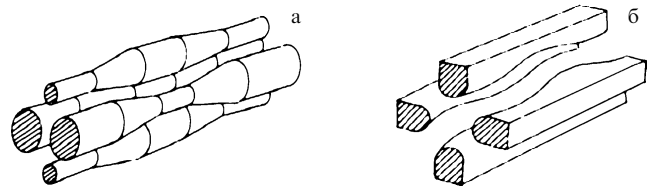


Рис. 3. Ускоряющие электроды ПОКФ: (а) с конусными переходами, (б) в виде лопастей.

Динамика протонного пучка изучалась на НЧУ2-Э ($W_{in} = 0,1$ МэВ, $W_{out} = 2$ МэВ, $F = 148,5$ МГц, $I_{max} = 250$ мА, $L \cong 4$ м, скважность 1000).

Конструктивные решения для создания ускорителя с ВЧКФ с малой скважностью отрабатывались на установке ЛУСИ (скважность 100, $F = 148,5$ МГц, $W_{in} = 0,1$ МэВ, $W_{out} = 10$ МэВ, $I_{max} = 100$ мА). Составной частью ЛУСИ был ускоритель с ПОКФ ($W_{out} = 2$ МэВ).

Был создан транспортабельный ускоритель с ПОКФ — ДУ (демонстрационный ускоритель) на частоте 151 МГц с выходной энергией 1 МэВ (протоны). Этот ускоритель был автономен по ВЧ питанию, вакууму и охлаждению. ВЧ питание было организовано по принципу автогенератора. Требовалось только подключение к электросети и водопроводу.

В обсуждаемых в данной статье ускорителях с ВЧКФ секции с ПОКФ являются составными частями. Основные параметры этих секций приведены в таблице.

Параметр и единица измерений	УРАЛ-30	УРАЛ-30М	NICA
Сорт ускоряемых ионов	H^+	H^+	Au_{197}^{31+}
Отношение заряда к массе	1	1	0,157
Энергия инжекции W_{in} , кэВ/у	100	100	32,5
Выходная энергия W_{out} , кэВ/у	1980	1770	407,1
Проектный ток I , мА	100	100	5–10
Ширина спектра энергий, %	3	8,8	7,6
Фазовая ширина сгустка, град	45	28	99
Нормализованный эмиттанс пучка ϵ , мрад см	0,18	0,14	0,08
Напряжение в резонаторе U , кВ	150	140	96
Максимальная напряжённость поля на электродах E_{max} , кВ см $^{-1}$	225	250	207
Длина секции L , мм	4052	2461	6915
Средний радиус канала R_0 , мм	8,82	7,59	6,4

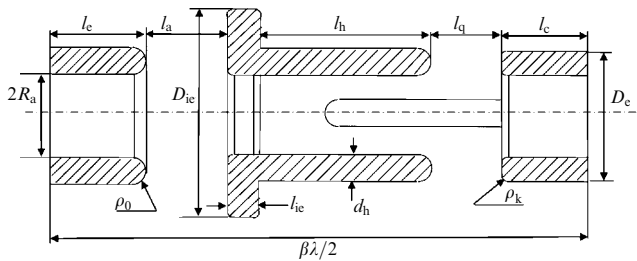


Рис. 4. Схема периода ускорения в регулярной части канала: $2R_a$ — диаметр апертуры, D_{ie} — внешний диаметр промежуточного электрода, D_e — внешний диаметр бортового электрода, d_h — диаметр рога, ρ_0 — радиус выходного торца бортового электрода, ρ_k — радиус кромок электродов, $\beta\lambda/2$ — длина периода ускорения, l_e — половина длины бортового электрода, l_a — длина аксиально-симметричного зазора, l_{ie} — длина промежуточного электрода, l_h — длина рога, l_q — длина зазора между торцом рога и торцом соседнего электрода.

4. Методы расчёта параметров пространственно-периодической квадрупольной фокусировки

По мере развития высокочастотной квадрупольной фокусировки совершенствовались методы расчёта её параметров. В докомпьютерную эру, когда родилась идея ВЧКФ, доступны были лишь аналитические методы.

Задача расчёта параметров ВЧКФ была не из простых. На периоде ускорения (в двойном зазоре, рис. 4) параметры фокусировки и ускорения зависят от многих факторов: от радиуса апертуры, от длин зазоров, рогов и электродов, от деления напряжения по половинам двойного зазора, а также от диаметров рогов и радиусов скруглений у кромок электродов.

Для расчёта параметров фокусировки нужно иметь граничные условия на образующих апертуры. А взять их было неоткуда. Исходя из предположения, что на границе апертуры на азимутах, соответствующих осям рогов, продольная компонента электрического поля допускает аппроксимацию квадратной волной, задачу выбора оптимального варианта двойного зазора удалось решить в самом общем виде [10]. Были построены расчётные формулы и диаграммы, по которым была рассчитана модель ускорителя на 4 МэВ [13].

Впоследствии была разработана методика определения граничных условий в двойном зазоре с помощью измерений на электролитической ванне [39]. (Ускоритель УРАЛ-30 сначала был рассчитан по этой методике.) Измерения на электролитической ванне позволяли получить точные данные о граничных условиях на границе апертуры, но были трудоёмкими и неоперативными при выборе вариантов канала. Поэтому были предприняты усилия по разработке программы расчёта граничных условий на компьютере.

Был разработан достаточно эффективный способ расчёта граничных условий методом собственных функций в сочетании с методом Монте-Карло [40]. Для определения потенциала в отдельных точках здесь не требуется решать задачу во всей области, что существенно экономит затраты оперативной памяти, малый объём которой был тогда главным ограничителем на компьютерах. Канал УРАЛ-30 пересчитывался уже таким методом, а УРАЛ-30М с самого начала был рассчитан с его

помощью. Этот метод использовался в ИФВЭ довольно длительное время для решения многих задач.

Обсудим процедуру расчёта параметров фокусировки и ускорения в канале с ППКФ. Высокочастотное поле внутри апертуры канала в электростатическом приближении записывается в виде ряда Фурье – Бесселя:

$$U(r, \theta, z) = \sum_{n=0, m=1}^{\infty} \cos(2n\theta) I_{2n}(mkr) \times \\ \times [a_{2n,m} \sin(mkz) + b_{2n,m} \cos(mkz)]. \quad (1)$$

Здесь (r, θ, z) — координаты точек в цилиндрической системе, $k = 2\pi/\beta\lambda$, $I_{2n}(mkr)$ — модифицированные функции Бесселя, β — относительная скорость, λ — длина волны, напряжение на периоде ускорения $\beta\lambda/2$ принято равным единице. Значения потенциалов на электродах периода $\beta\lambda/2$ продолжают дальше в соответствии с последовательностью переключения основных (бортовых) электродов с одного борта резонатора на другой.

Основными азимутальными гармониками поля являются ускоряющая аксиально-симметричная ($n = 0$) и фокусирующая квадрупольная ($n = 1$) гармоники. Высшие азимутальные гармоники минимизируются путём подбора диаметра рога. (Например, наиболее существенная с точки зрения нелинейности поля гармоника $n = 3$ равна нулю, если угол, под которым виден с оси канала диаметр рога, равен 60° [41].)

При наличии граничных условий $U(R_a, 0, z)$ и $U(R_a, \pi/2, z)$ ускоряющая и фокусирующая гармоники поля вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{pmatrix} a_{0,m} \\ b_{0,m} \end{pmatrix} = \frac{1}{\beta\lambda I_0(mkR_a)} \int_0^{\beta\lambda} \left[U(R_a, 0, z) + U\left(R_a, \frac{\pi}{2}, z\right) \right] \times \\ \times \begin{pmatrix} \sin(mkz) \\ \cos(mkz) \end{pmatrix} dz, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_{2,m} \\ b_{2,m} \end{pmatrix} = \frac{1}{\beta\lambda I_2(mkR_a)} \int_0^{\beta\lambda} \left[U(R_a, 0, z) + U\left(R_a, \frac{\pi}{2}, z\right) \right] \times \\ \times \begin{pmatrix} \sin(mkz) \\ \cos(mkz) \end{pmatrix} dz. \quad (3)$$

После расчёта гармоник рассчитываются зависимость от z напряжённости электрического поля на оси канала

$$E_z(0, 0, z) = - \sum_{m=1}^{\infty} (mk) [a_{0,m} \cos(mkz) - b_{0,m} \sin(mkz)] \quad (4)$$

и эффективность ускорения

$$\vartheta = \frac{1}{U} \int_0^{\beta\lambda/2} E_z(0, 0, z) \cos(kz) dz. \quad (5)$$

Положение электрического центра периода ускорения определяется из условия:

$$\int_0^{\beta\lambda/2} E_z(0, 0, z) \sin(kz) dz = 0. \quad (6)$$

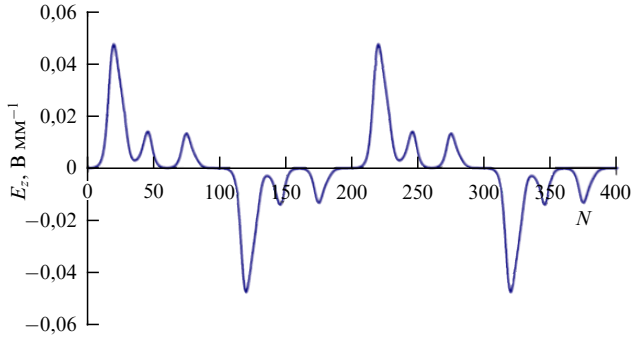


Рис. 5. Распределение продольной ускоряющей компоненты электрического поля на оси канала на периоде фокусировки.

Поперечные колебания частиц в ускорителе описываются следующим уравнением:

$$d^2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} / dt^2 = \frac{e}{2m_0\gamma^3} \left(-\frac{\partial E_z}{\partial z} \pm \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} \right) \right) \times \cos(kz + \varphi) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Здесь $\varphi = \omega t$, ω — угловая частота ВЧ поля, t — время, m_0 — масса покоя частицы, e — заряд частицы, $\gamma = 1/[1 - \beta^2]^{1/2}$. Имеющиеся гармоники позволяют рассчитывать градиенты компонент напряжённости поля:

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = \sum_{m=1}^{\infty} (mk)^2 [a_{0,m} \sin(mkz) + b_{0,m} \cos(mkz)], \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} = - \sum_{m=1}^{\infty} 0,5(mk)^2 [a_{2,m} \sin(mkz) + b_{2,m} \cos(mkz)]. \quad (9)$$

Практика показала, что для удовлетворительного расчёта компонент поля достаточно 128 гармоник. На рисунках 5 и 6 показан пример распределения по z ускоряющей компоненты поля и градиента фокусирующих компонент на одном из периодов фокусировки типа ФФДД. Здесь $E_z \equiv -\partial U/\partial z$, $G \equiv \partial E_x/\partial x - \partial E_y/\partial y$, N — номер точки разбиения периода.

Основными физическими параметрами, определяющими поперечное движение, являются набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки μ и мгновенные частоты колебаний: минимальная частота $\nu_{\min}$ и максимальная частота $\nu_{\max}$. От величины минимальной частоты зависит акцептанс канала:

$$A = \nu_{\min} R_a^2 \frac{\gamma}{N_f \lambda}. \quad (10)$$

Здесь N_f — число периодов $\beta\lambda$ на периоде фокусировки.

Отношением частот $\nu_{\min}/\nu_{\max}$ задаётся отношение полюсей пучка:

$$\frac{x_{\min}}{x_{\max}} = \sqrt{\frac{\nu_{\min}}{\nu_{\max}}}. \quad (11)$$

Для расчёта μ , $\nu_{\min}$ и $\nu_{\max}$ используется матричный метод. Период фокусировки ($2\beta\lambda$) разбивается на достаточно большое число промежутков (обычно 400), так чтобы каждый такой промежуток можно было считать

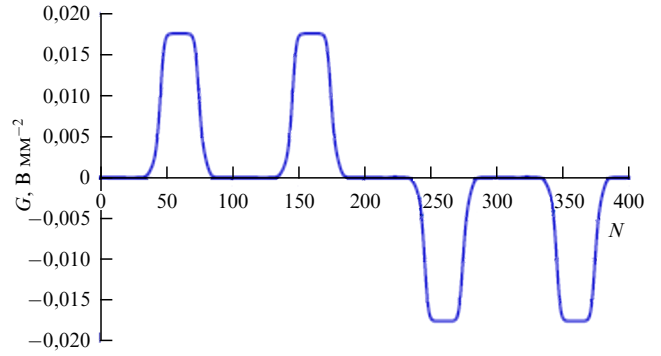


Рис. 6. Распределение градиента поперечных фокусирующих компонент напряжённости электрического поля на периоде фокусировки.

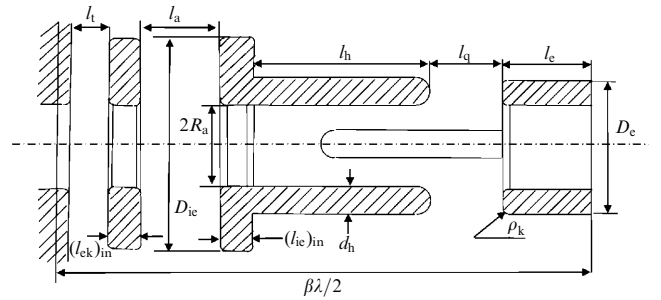


Рис. 7. Входной период ускорения: $(l_{ie})_{in}$ — длина входного промежуточного электрода, $(l_{ek})_{in}$ — длина экранного электрода, l_t — длина торцевого дрейфа.

тонкой линзой с матрицей в виде произведения матриц преломляющей плоскости и участка дрейфа:

$$\begin{bmatrix} x \\ dx/dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ dx/dz \end{bmatrix}_0. \quad (12)$$

Здесь l — длина дрейфа, $a = -e(E_{zz} \pm G) \cos(kz + \varphi) / (2m_0 c^2 \beta^2 \gamma^3)$, $E_{zz} \equiv \partial E_z / \partial z$.

Перемножив матрицы периода фокусировки, находим:

$$\cos \mu = 0,5(M_{11} + M_{22}), \quad \nu_{\min} = \sqrt{\frac{M_{21}}{M_{12}}}, \quad (13)$$

где M_{ik} — матричные элементы результирующей матрицы.

Чтобы найти $\nu_{\max}$, нужно просто поменять знак градиента G . Выражение (13) для $\nu_{\min}$ и $\nu_{\max}$ справедливо при условии, что начало периода фокусировки ($z = 0$) находится в точке экстремума огибающей (при ФФДД-фокусировке она находится посередине двух одинаково фокусирующих периодов ускорения).

Входной и выходной периоды канала отличаются по своей структуре от периодов регулярной части (рис. 7 и 8).

Во входном периоде между торцевой стенкой резонатора и промежуточным электродом устанавливается экранирующий электрод под нулевым потенциалом (под потенциалом торцевого фланца). В выходном периоде роль экранирующего электрода играет бортовой электрод, отсоединённый от борта и присоединённый к резонатору в точке под нулевым потенциалом. Расчёт входного и выходного периодов аналогичен описанной процедуре, но для нахождения граничных условий в

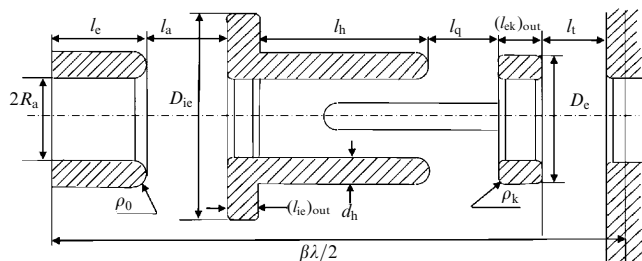


Рис. 8. Выходной период ускорения: $(l_{ie})_{out}$ — длина выходного промежуточного электрода, $(l_{ek})_{out}$ — длина экранного электрода, l_t — длина торцевого дрейфа.

программу нужно внести соответствующие поправки с учётом указанных выше особенностей этих периодов.

Процедура расчёта геометрии канала с ППКФ коротко описана в [1]. При выборе физических параметров линейного ускорителя приходится учитывать много различных (порой противоречивых) требований и ограничений. В случае ВЧКФ одно из важнейших ограничений связано с выбором максимально допустимой напряжённости поля на поверхности ускоряющих электродов.

Многолетний практический опыт ИФВЭ показывает, что в ускорителе с пространственно-периодической ВЧКФ фокусировкой максимальная напряжённость поля на ускоряющих электродах E_{max} может достигать $2,9E_K$ [41], где E_K — критерий Килпатрика [42]. При этом работа ускорителя остаётся устойчивой, процент простоев, связанных с пробоями в резонаторе, не превышает 0,02 %. Причём благодаря малой запасённой энергии в резонаторах искрения между электродами не приводят к повреждениям их поверхностей, а очищают от загрязнений, т.е. происходит тренировка.

От выбора параметров канала ускорения и фокусировки зависят как эксплуатационные характеристики ускорителя, так и качество пучка ускоренных частиц. Формирование сгустка не заканчивается в RFQ. Оно ещё какое-то время продолжается в основной части ускорителя и влияет на качество пучка, в частности, на величину его эмиттанса.

В ЛУТИ с магнитной фокусировкой дефокусировка частиц ускоряющим ВЧ полем зависит от фазы поля, а фокусировка магнитными линзами от фазы не зависит, что приводит к фазовой зависимости частот колебаний v_{min} , v_{max} , μ и к связанному с этим росту эмиттанса пучка. В ЛУТИ с ВЧКФ фокусировка зависит от фазы и путём подбора геометрии двойного зазора можно существенно ослабить такую зависимость и уменьшить рост эмиттанса. В качестве примера на рис. 9 приведены зависимости

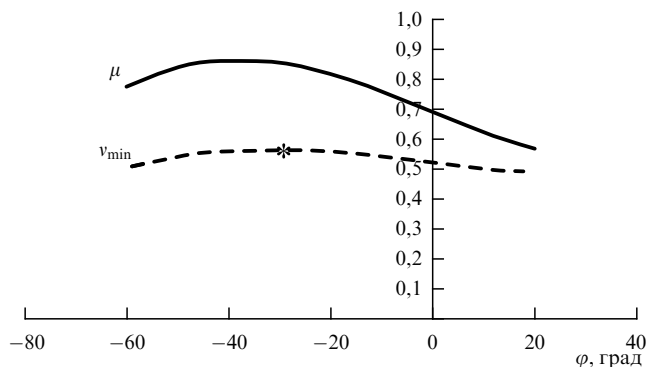


Рис. 9. Зависимости $v_{min}(\phi)$ и $\mu(\phi)$ от фазы в первой секции ЛУТИ с ВЧКФ.

сти v_{min} и μ от фазы ϕ в основной части ЛУТИ одного из проектов, разработанных в ИФВЭ.

Звёздочкой на рисунке обозначено значение v_{min} для равновесной фазы $\phi_s = -30^\circ$. Нетрудно видеть, что в интервале рабочих фаз ($\Delta\phi \approx 80^\circ$) здесь обеспечена минимальная зависимость частот от фазы.

В данной обзорной статье нет возможности детально обсудить эту важную проблему, здесь нужна обстоятельная статья.

5. Ускоряющие системы

В ИФВЭ для ППКФ в качестве ускоряющих систем применялись резонаторы с продольным магнитным полем, показанные на рис. 10.

Первым по времени разработки среди них был Н-резонатор.

5.1. Н-резонатор

Н-резонатор состоит из двух труб, вставленных одна в другую. Труба большего диаметра и большей длины закрыта с торцов днищами и служит контейнером. Внутренняя труба днищ не касается. Вдоль образующей этой трубы прорезана щель, на которой возникает разность потенциалов электрической компоненты поля при возбуждении в резонаторе электромагнитных колебаний с продольным магнитным полем.

Коротко остановимся на проблемах, возникших при разработке Н-резонатора, и на способах их решения. Похожие проблемы, возникавшие при разработке других резонаторов, решались с учётом полученного опыта.

Первой проблемой была оценка радиотехнических параметров Н-резонатора на основе его геометрических

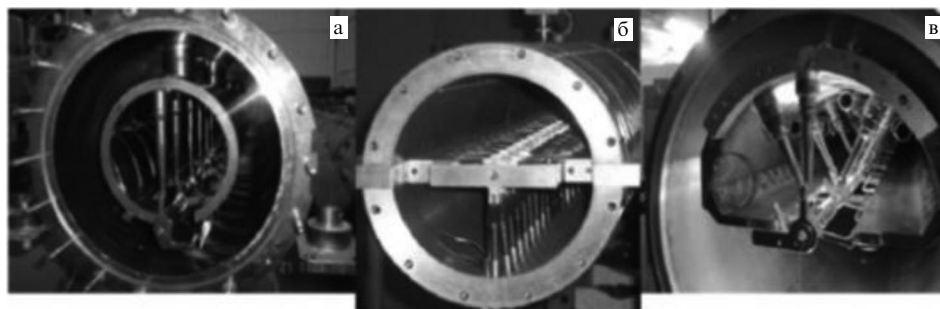


Рис. 10. Поперечные сечения резонаторов с продольным магнитным полем: (а) Н-резонатор, (б) 2К-резонатор, (в) SH-резонатор.

размеров. В [11] была сделана попытка оценить основные его параметры (частоту основного типа колебаний и потери ВЧ-мощности) путём сшивки решений уравнений Максвелла в разных областях Н-резонатора.

Но для аналитических оценок геометрия Н-резонатора слишком сложна: резонатор имеет торцевые области, а внутри щели устанавливаются ускоряющие электроды. Поэтому аналитические методы, несмотря на многочисленные попытки, оказались недостаточно точными, а компьютеры тогда были маломощными, и в результате при разработке ускорителей с ППКФ основным способом изучения резонаторов стали эксперименты на макетах [43, 44].

Был разработан макет Н-резонатора, позволяющий проводить такие эксперименты. Влияние торцевых областей на резонансную частоту и распределение поля вдоль экспериментального отсека резонатора было устранено установкой в торцевых областях "экранирующих" витков. Полученный отсек моделировал бесконечно длинный Н-резонатор по частоте и распределению поля. В нём изучалось, как зависит ёмкостная нагрузка резонатора от геометрических размеров электродов, и уточнялся диаметр резонатора для выбранной рабочей частоты.

В Н-резонаторе промежуточные электроды устанавливаются во внутренней трубе вдоль образующей, диаметрально противоположной щели. При равных ёмкостях обеих половин зазора ток в ножке промежуточного электрода равен нулю, а добротность резонатора максимальна. Но равенство этих ёмкостей ещё нужно как-то обеспечить.

В модели ускорителя на 4 МэВ равенство ёмкостей достигалось подбором внешних диаметров электродов. Недостатки этого метода очевидны, и впоследствии были испробованы другие методы ёмкостной балансировки. В УРАЛ-30 была применена балансировка с помощью "чашки" на промежуточном электроде (рис. 11а), надвигаемой снаружи на бортовой электрод. Но такой вариант неудобен при монтаже электродов. Кроме того, внутри чашки возможно возбуждение вторично-резонансного разряда. Поэтому при окончательном монтаже УРАЛ-30 чашка была заменена на удалённые от оси балансировочные рога (рис. 11б).

В Н-резонаторе даже при точной балансировке указанных ёмкостей возможно возбуждение паразитного резонанса ("резонанса ножки"), приводящего к перекосу напряжений в зазорах. Чтобы исключить такую возможность, в ножки промежуточных электродов вставлялись сопротивления ~ 100 Ом. Первые варианты таких сопротивлений были из мастики марки МОУ. Эти сопротивления быстро перегорали и были заменены на проволочные сопротивления, навитые из тугоплавкой проволоки (нихром) на керамическую вставку. Однако в таких сопротивлениях возникали межвитковые пробой при пробоях в зазорах между электродами. Кроме того, наличие проволочного сопротивления в максимуме магнитного поля резонатора ведёт к увеличению потерь ВЧ мощности.

В усовершенствованной конструкции промежуточной ноги это сопротивление защищено от переменного магнитного поля резонатора металлическим экраном (рис. 12).

Основание ноги 1 соединяется с корпусом 2 через керамическую втулку 3, внутри которой находится проволочное сопротивление 4, закреплённое прижимным винтом и шайбами 5 и 6. Щель шириной ~ 1 мм между экра-

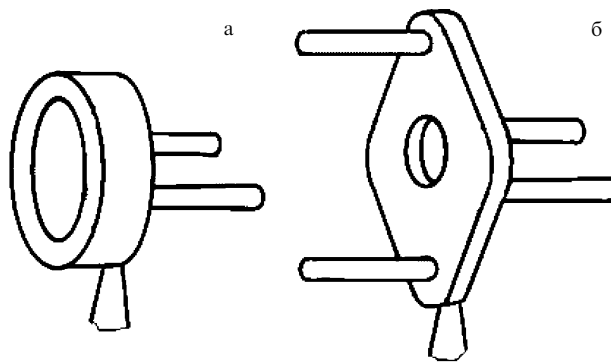


Рис. 11. Промежуточный электрод с чашкой (а) и с балансировочными рогами (б).

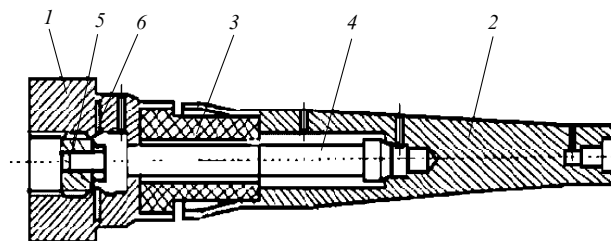


Рис. 12. Эскиз ноги промежуточного электрода с экранированным сопротивлением: 1 — основание ноги, 2 — корпус ноги, 3 — керамическая втулка, 4 — проволочное сопротивление, 5 — поджимной винт, 6 — контактная цапга.

ном и основанием ноги играет роль разрядника, который шунтирует сопротивление при возникновении пробоя.

Введение сопротивления в ногу промежуточного электрода — не единственный способ избежать резонанса ноги. В работе [45] рассматривается конструкция ноги с ёмкостным характером реактивности, при котором частота резонанса ноги всегда выше частоты рабочего колебания. Такая нога допускает водяное охлаждение и может представлять интерес для ускорителей с ВЧКФ, работающих в режиме малой скважности.

Следующей важной проблемой является настройка распределения поля вдоль резонатора. Осуществляется она с помощью дополнительных ёмкостных элементов, устанавливаемых на бортах резонатора, либо с помощью индуктивных элементов в области магнитного поля, а также подбором размеров торцевых областей. Одновременно настраивается частота резонатора, которая должна с нужной точностью совпасть с частотой ВЧ генератора. Для тонкой настройки частоты была разработана система автоматической подстройки частоты, содержащая поворотные кольца, расположенные в магнитном поле, блок обработки сигнала ошибки и исполнительные механизмы (рис. 13).

Существенным недостатком Н-резонатора является падение темпа ускорения по мере роста скорости частиц. Связано это с тем, что напряжение на щели внутренней трубы постоянно вдоль резонатора. Падение темпа ускорения можно замедлить, если увеличивать от начала к концу резонатора напряжение на аксиально-симметричной половине двойного зазора, сохраняя напряжение на квадрупольной половине.

Чтобы изменять соотношение напряжений на половинах двойного зазора, нужно изменять соотношение их ёмкостей и устанавливать ножки промежуточных элект-

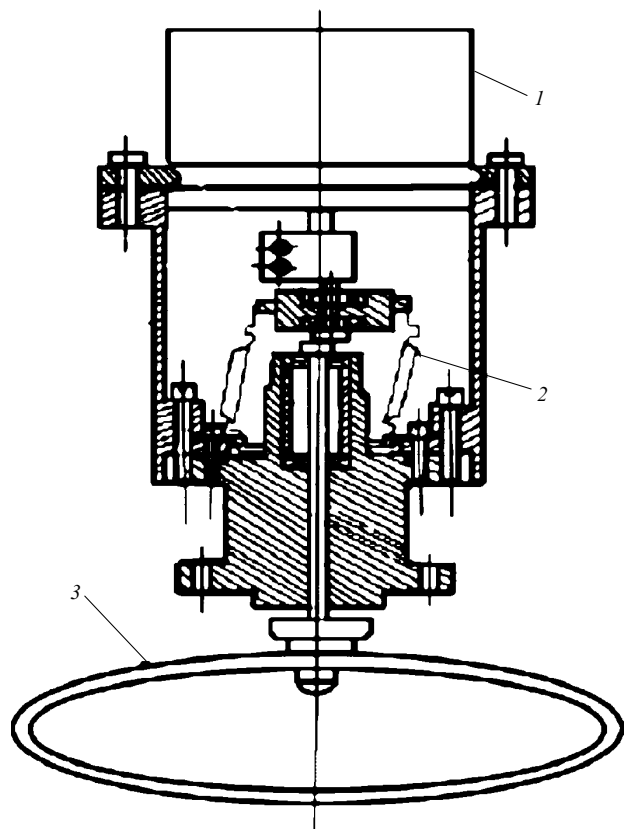


Рис. 13. Узел подстройки частоты: 1 — шаговый двигатель, 2 — сильфон, 3 — кольцо.

родов под соответствующими углами относительно вертикальной плоскости. В Н-резонаторе этого сделать нельзя, так как нельзя обеспечить ортогональность магнитных силовых линий к ножкам промежуточных электродов. Данный недостаток устранён в SH-резонаторе [46] и 2К-резонаторе [47].

5.2. SH-резонатор и 2К-резонатор

У таких резонаторов форма поперечного сечения секторная (рис. 10б, в), причём вершина сектора находится на оси ускоряющего канала, и условие ортогональности выполняется автоматически. В них меньше потери ВЧ мощности и выше шунтовое сопротивление (в 2К-резонаторе оно выше, чем в SH-резонаторе). Кроме того, в 2К-резонаторе элементы настройки перенесены на борта резонатора (рис. 14б), что существенно упрощает настройку ёмкостей периода ускорения.

При изменяющемся напряжении на ускоряющем зазоре главной проблемой является определение угла установки ноги промежуточного электрода в соответствии с заданным делением напряжения в двойном зазоре. Для определения этого угла была разработана специальная методика.

Период ускорения структуры с ППКФ представляет собой ёмкостный делитель напряжения между бортовыми электродами (рис. 15).

При отсутствии тока по ноге промежуточного электрода выполняется соотношение:

$$\frac{U_a}{U_q} = \frac{C_q}{C_a} = \frac{\int_0^{S_a} \mu H_a dS}{\int_0^{S_q} \mu H_q dS}, \quad (14)$$

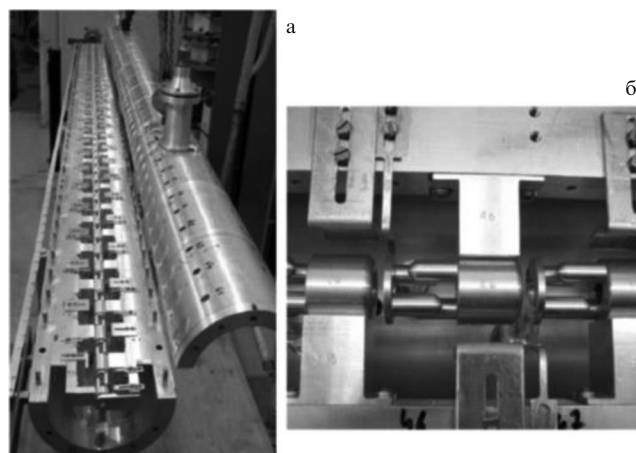


Рис. 14. (а) Ускоряющая структура и (б) период ускорения с элементами настройки.

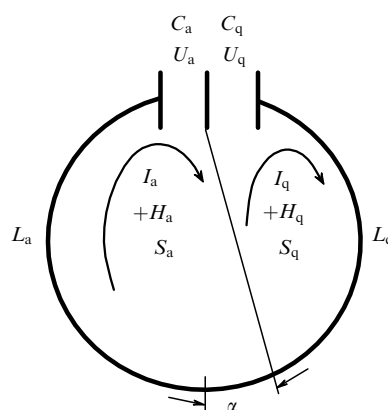


Рис. 15. Схема ёмкостного делителя, образованного электродами периода ускорения. Индекс а соответствует аксиально-симметричному зазору, индекс q — квадрупольному зазору.

из которого следует, что коэффициент деления напряжений U_a/U_q определяется соотношением ёмкостей зазоров C_a/C_q , площадей S_a и S_q (т.е. положением ноги промежуточного электрода) и магнитными полями H_a и H_q .

Рассчитать ёмкости C_a и C_q довольно сложно, оценки оказалось проще делать с помощью усреднённых магнитных полей H_a и H_q . А точный расчёт угла установки ноги крепления (α на рис. 15) был сделан с помощью 3D расчётной программы HFSS.

Использовалась следующая последовательность действий [48]. Выделялся отрезок резонатора, соответствующий периоду ускорения, ограниченный "магнитными стенками" с граничными условиями $E_r \neq 0$, $E_n = 0$, $H_r = 0$, $H_n \neq 0$ (рис. 16).

Затем вдоль линии, совпадающей с осью фокусирующего рога, интегрировалось распределение продольной компоненты поля E_z и получались искомые U_a , U_q и зависимости U_a/U_q от угла α . Полученные зависимости проверялись и уточнялись на макете периода ускорения. Для этого конец ножки отсоединялся от стенки резонатора и измерялось напряжение в получившемся зазоре. Нулевое напряжение означало, что баланс ёмкостей получен.

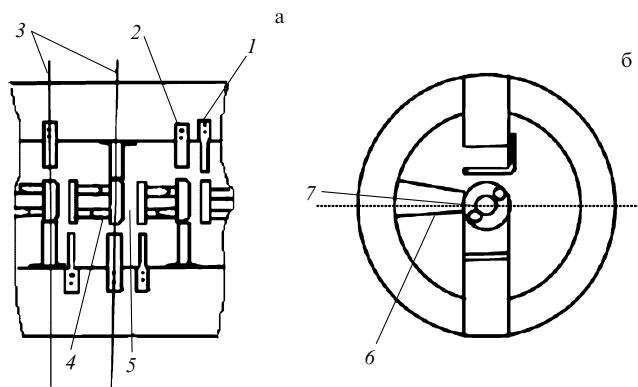


Рис. 16. Период ускорения с элементами настройки: (а) вид сверху на канал ускорения, (б) вид вдоль оси канала, 1 — подстройка коэффициента деления, 2 — подстройка частоты, 3 — магнитные стенки, 4 — фокусирующий зазор, 5 — ускоряющий зазор, 6 — ножка, 7 — угол установки ножки α .

5.3. Расчётные программы

Более или менее работоспособные программы для расчёта на компьютере электродинамических характеристик резонаторов для ускорителей с ВЧКФ появились в ИФВЭ не сразу. Поэтому приходилось использовать различные модельные представления об электромагнитных полях в резонаторах.

Один из способов решения проблемы — сшивка решений в частичных областях резонатора (где нет ускоряющих электродов) с граничными условиями, принятыми исходя из предположения, что ускоряющий канал представляет собой электростатическую комплексную нагрузку для эквивалентных схем этих областей [43, 44, 51].

Компьютерные расчёты электродинамических параметров резонаторов начались с использования 2D программ SUPERFISH [49] и PRUD0 [50, 52]. Они позволили определить численными методами такие важные характеристики резонаторов на Н-волне, как геометрические размеры поперечного сечения, собственную частоту рабочего колебания, добротность, эффективное шунтовое сопротивление, диссипативные потери мощности, и получить представление о поперечной топографии электромагнитного поля.

Уже первые, ещё ограниченные по своим возможностям, 3D программы (MWS, HFSS) стали давать значительно больше информации об электродинамических параметрах резонаторов, нежели 2D программы. Так, программа HFSS [48] не только облегчила настройку двойного зазора в 2К-резонаторе, но и позволила получить распределение напряжённости поля в ускоряющем канале и определить величину максимальной напряжённости поля на ускоряющих электродах (рис. 17).

Современные компьютеры несопоставимо мощнее существовавших в те времена, и они могут применяться не только для расчётов и наладки отдельных периодов ускорения. Их можно использовать для расчёта и оптимизации всего ускорителя целиком с точки зрения качества пучка, технологичности и стоимости, а также надёжности и экономичности.

5.4. Экономичность ускорителя

Экономичность ускорителя напрямую зависит от эффективного шунтового сопротивления Z_{eff} его ускоряющей

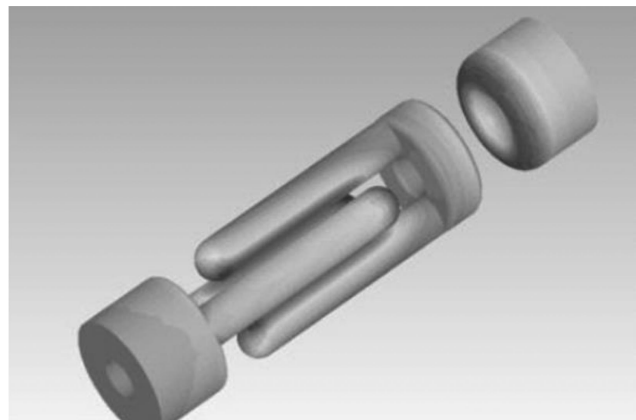


Рис. 17. Распределение напряжённости поля на поверхности электродов (показанное через интенсивность раскраски электродов).

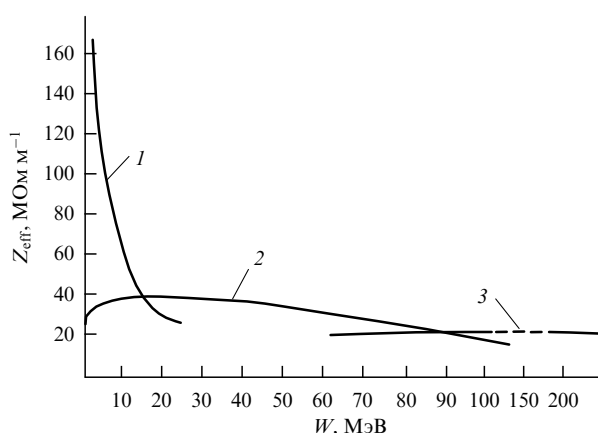


Рис. 18. Зависимость эффективного шунтового сопротивления от энергии для различных структур: 1 — ППКФ, 2 — ускоритель Альвареца, 3 — связанные ячейки.

системы. Оценки зависимости Z_{eff} от энергии частиц, сделанные на основе имевшихся тогда данных, показали, что протонный ускоритель с ППКФ превосходит по экономичности ускоритель Альвареца вплоть до $W_p \approx 18$ МэВ (рис. 18).

В работах [53, 54] сделаны попытки спрогнозировать, каким может быть эффективное шунтовое сопротивление 2К-резонатора, если провести его оптимизацию по данному параметру. Согласно таким оценкам, оно может превышать шунтовое сопротивление резонатора Альвареца вплоть до $W_p \sim (30-40)$ МэВ. Это означает, что в интересном для практических применений диапазоне энергий можно построить ЛУТИ с ВЧКФ более экономичный, нежели традиционный ЛУТИ.

5.5. Технологические решения

• **Материалы для резонаторов.** В качестве основного материала для изготовления первых ускоряющих систем с ППКФ была принята сталь. Сталь подвержена коррозии, поэтому в каналах охлаждения резонаторов применялась вода с ингибиторами коррозии. В то время (1970-е годы) это было наиболее простым решением. Созданный с помощью такой технологии УРАЛ-30 работает в ускорительном комплексе ИФВЭ уже 40 лет. В УРАЛ-30М, который должен заменить УРАЛ-30, вместо стали использован сплав АМг-6,

имеющий ряд ценных качеств, таких как высокая коррозионная стойкость, хорошая обрабатываемость резанием, малое газоотделение, хорошая свариваемость, стабильность размеров со временем, достаточная прочность, малый удельный вес и, наконец, хорошая адгезия при нанесении гальванической меди (~ 100 мкм).

• **Изготовление ускоряющих электродов.** Материалом для изготовления ускоряющих электродов служит бескислородная медь марки МОБ (она лучше прочих марок с точки зрения электрической прочности ускоряющих зазоров). Фокусирующие рога приваривались к электродам с помощью электронно-лучевой сварки в вакууме. Проводились опыты с приваркой рогов к корпусу электрода методом диффузионной сварки. Применялась запрессовка длинных рогов в корпус электродов. Место соединения проваривалось с помощью лазера для улучшения электрического контакта. Но при рихтовании рогов сварные швы разрушались, и от лазерной сварки отказались. Применялась также технология изготовления цельных электродов на станках со специальной оснасткой и программным управлением. Эта технология обеспечивает наилучшее качество электродов.

• **Юстировка электродов.** Основная часть ускорителя (ОЧУ) УРАЛ-30 (и УРАЛ-30М) состоит из четырёх секций. Внутренняя труба каждой секции разбивается на отрезки (резонаторы) длиной ~ 600 – 900 мм, удобные для монтажа электродов открытым способом с последующей установкой резонаторов в контейнере.

В фокусирующем канале не должно быть юстировочных устройств, сопоставимых по размерам с электродами. Поэтому для монтажа электродов УРАЛ-30 был создан специальный стенд [55].

Резонатор на стенде устанавливается так, чтобы ось ускорителя совпала с осью микротелескопа, которая параллельна базовой направляющей и компарированной рулетке. Электрод надевается на апертурную мишень и закрепляется в держателе на базовой направляющей. Точность установки лучше 20 мкм, так что юстируется только продольная координата. С помощью двух пентапризм изображение торца электрода и рулетки передаётся в микротелескоп. Установив электрод, закрепляют на резонаторе кронштейн или стержень промежуточного электрода так, чтобы ножка электрода вошла внутрь полости кронштейна (стержня), не касаясь стенок. Полость нагревается до $\sim 100^\circ$ и в неё заливается малоусадочный припой (сплав Вуда). Затем резонаторы монтируются в контейнере.

Этот способ монтажа электродов выдержал испытание временем. Тем не менее с появлением в ИФВЭ точных станков с программным управлением от него отказались. Был освоен способ монтажа электродов непосредственно на станке. Посадочное место для ножки электрода обрабатывается с нужной точностью под контролем с помощью микротелескопа (рис. 19).

На рисунке 19 микротелескоп виден на задней стенке. Электрический контакт между ножкой и резонатором обеспечивается с помощью индиевой прокладки. В сравнении со старым способом монтажа повысилась надёжность крепления электродов, а точность установки сохранилась. Таким способом смонтированы электроды УРАЛ-30М.

• **Допуски на точность параметров канала с ВЧКФ.** Фокусирующий канал с ВЧКФ и канал с магнитными



Рис. 19. Монтаж ускоряющих электродов непосредственно на станке.

квадрупольными линзами, имеющие одинаковые параметры фокусировки и ускорения, должны иметь примерно одинаковые допуски на точность своих параметров.

Проблема допусков в ускорителях с ВЧКФ детально изучалась в ряде работ [13, 56–59]. В них использовались как аналитические методы исследования, так и численное моделирование динамики частиц. Определялись последствия конкретных ошибок изготовления элементов фокусирующего канала и погрешностей его настройки.

В ускорителях с ВЧКФ, созданных в ИФВЭ, принята следующая система допусков: среднеквадратичные погрешности продольных размеров элементов канала $\leq 0,06\%$ (в долях $\beta\lambda$), отклонения поперечных размеров от штатных значений ≤ 50 мкм, погрешность азимутального положения рогов $\leq 30'$, допуск на отклонение градиента фокусирующей компоненты поля от номинала $\leq 1\%$, допуск на уровень ВЧ поля в секции $\leq 1\%$.

• **Термостабилизация резонаторов.** Для того чтобы в процессе работы ускорителя сохранялась принятая система допусков, резонаторы ускорителя должны быть термостабилизированы. Эта проблема изучалась как теоретически, так и путём испытания различных вариантов охлаждения резонаторов на специальном стенде [60, 61].

Теоретически проблема решалась методом конечных элементов в три этапа. Сначала рассчитывалось распределение диссипативных потерь ВЧ мощности с помощью программы SUPERFISH [49]. Затем, на основе полученных тепловых потоков с учётом граничных условий теплообмена, решалась задача теплопроводности, результаты решения которой служили исходными данными для задачи термоупругости. Этот метод расчёта лежит в основе пакета программ HAST, разработанного в ИФВЭ [60].

На основе расчётов и экспериментов был определён оптимальный режим термостабилизации УРАЛ-30М: температура воды в системе охлаждения равна $(21 \pm 0,25)^\circ\text{C}$, расход воды через один канал равен $(0,015 \pm 0,005)$ л с $^{-1}$, а суммарный расход воды в ускорителе составляет $(45$ – $65)$ л мин $^{-1}$. При этом смещения элементов ускорителя укладываются в интервал ~ 15 мкм.

• **Вакуум.** Использование сплава АМг-6 вакуумной плавки в качестве материала для резонаторов и контей-

неров, вакуумплотное гальваническое меднение токопроводящих поверхностей, индиевые уплотнения — всё это позволило получать вакуум в ускоряющей системе с ВЧКФ не хуже 10^{-8} Торр с помощью относительно небольшого числа вакуумных насосов типа НМД-0.16. Кроме того, большую пользу приносили дополнительные геттерные насосы, сохранявшие форвакуум в ускорителе во время остановок.

6. Система высокочастотного питания

Особенностью ускоряющих систем, используемых для ускорителей с ППКФ, являются их малые габариты: при одинаковой длине волны диаметры резонаторов на Н-волне в 3–4 раза меньше диаметра резонатора Альвареса, и, как следствие, при одинаковой напряжённости поля в них на порядок меньше величина запасённой энергии. Из-за малой запасённой энергии при включении пучка ускоряемых частиц в резонаторе ускорителя с ППКФ происходит быстрая "подсадка" поля. Вопросу компенсации подсадки поля в ускорителях с ВЧКФ было уделено особое внимание.

6.1. Система автоматической компенсации

В ИФВЭ была предложена оригинальная система автоматической компенсации (АК) мощности, идущей на ускорение частиц [62–69] (рис. 20). В ней в качестве сигнала обратной связи используется отражённая от резонатора волна напряжения для управления возбуждением оконечного усилителя (ОУ).

Система обеспечивает распределённый ввод мощности многими петлями связи на высоком уровне мощности. Мощность от ОУ подаётся в два отсека резонатора через двойной Т-мост. Отсеки резонатора имеют равные коэффициенты отражения и фазы ВЧ поля, сдвинутые на $\pi/2$. В секциях предусмотрены одинаковые приросты энергии частиц и одинаковые шунтовые сопротивления, регулируемые с помощью балластной нагрузки. При

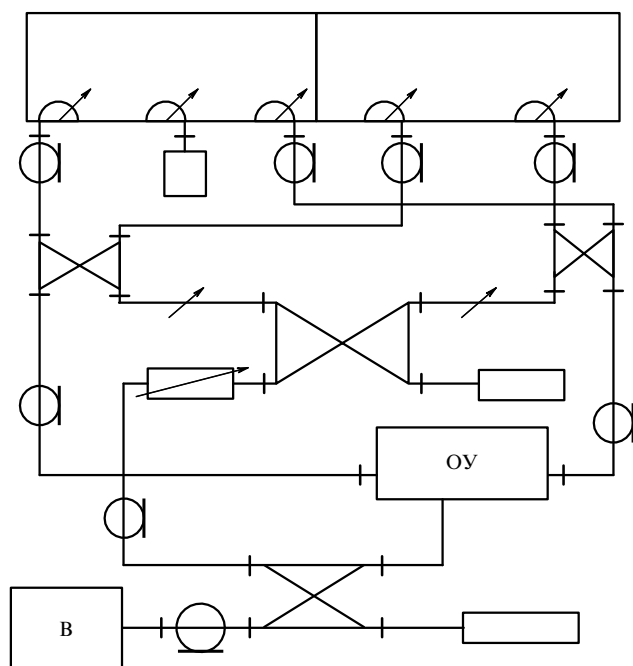


Рис. 20. Принципиальная схема системы АК.

одинаковых изменениях нагрузки пучком в отсеках отражённая от них мощность выделяется в развязанных плечах первого Т-моста и в балластной нагрузке. Часть мощности через второй Т-мост в нужной фазе складывается с мощностью возбудителя В и подаётся как сигнал регулирования в ОУ.

Система АК исполняет функцию ферритового Y-циркулятора, вводящего в систему активные потери при рассогласовании генератора и резонатора. В те времена ещё не были разработаны циркуляторы мегаваттного уровня мощности, так что система АК, сделанная по доступной технологии, получилась недостаточно надёжной, и от неё со временем отказались. Однако на современной элементной базе система АК имеет перспективы для развития: она построена на пассивных элементах и обеспечивает высокое быстродействие с полной компенсацией возмущений амплитуды и фазы ВЧ поля независимо от коэффициента усиления ОУ.

6.2. Система высокочастотного питания УРАЛ-30М

На УРАЛ-30М принята классическая схема ВЧ питания с разветвлением на низком уровне мощности. Для получения заданной стабильности амплитуды и фазы ВЧ поля $\sim (\pm 1 \%)$ была разработана система авторегулирования амплитуды и фазы.

Система ВЧ питания УРАЛ-30М состоит из пяти идентичных каналов ВЧ питания секций. Один из каналов показан на рис. 21.

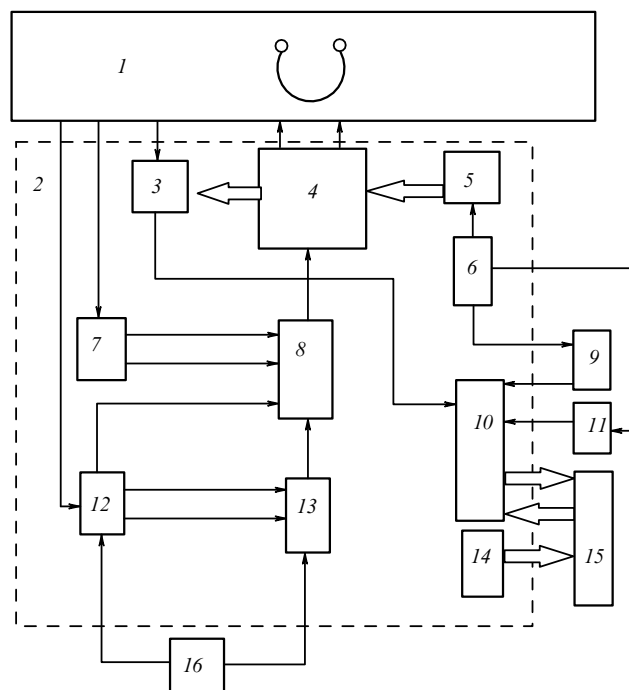


Рис. 21. Упрощённая структурная схема канала системы ВЧ питания: 1 — секция ускорителя, 2 — канал системы ВЧ питания, 3 — блок защиты от пробоев, 4 — канал усиления ВЧ мощности, 5 — модулятор анодных напряжений, 6 — блоки источников вторичного электропитания, 7 — система стабилизации амплитуды, 8 — модуль аттенуатора-фазовращателя, 9 — вакуумная система секций ускорителя, 10 — блоки цепей управления, блокировки и сигнализации, 11 — система водяного охлаждения, 12 — система стабилизации фазы, 13 — модуль электронного фазовращателя, 14 — система измерений, 15 — автоматизированная система измерений и управления ускорителем, 16 — задающее устройство.

Такие системы, как задающее устройство и система первичного электропитания, являются общими для всех пяти каналов. Между секциями установлены датчики тока пучка.

Амплитуда ускоряющего поля в резонаторе ускорителя стабилизируется относительно опорного напряжения регулированием выходной мощности канала усиления за счёт изменения возбуждения на его входе при постоянном анодном напряжении. Система стабилизации амплитуды содержит три канала регулирования: по отклонению от опорного напряжения, по возмущению поля пучком (сигнал поступает с датчика тока пучка) и по программе, реализуемой с помощью сигнала, синхронизованного с таймером ускорителя.

Элементы системы автоматического регулирования (САР) фазы идентичны соответствующим элементам САР амплитуды по построению, функциям и предъявляемым к ним требованиям.

В основу разработки модуляторов анодного напряжения ламповых ВЧ каскадов положен модульный принцип, который имеет то преимущество, что позволяет набором единичных модулей реализовать параметры, необходимые для конкретных условий работы аппаратуры. К тому же он позволяет обойтись без регулируемых источников питания, что значительно упрощает аппаратуру.

В каждом канале усиления мощности предусмотрен блок защиты от пробоев. Случайные пробои межэлектродных зазоров возникают в статистически пренебрежимом проценте от общего количества импульсов. Как правило, они не следуют более чем в двух импульсах подряд и не являются признаком предаварийной ситуации. Напротив, пробои, следующие в непрерывной серии импульсов, являются признаком возникающей аварии. Поэтому при возникновении серии пробоев блок защиты от пробоев быстро выключает модулятор анодных напряжений соответствующего ВЧ канала. Оператор получает возможность разобраться в причинах возникновения предаварийной ситуации.

7. Наладка и эксплуатация ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой

Об особенностях наладки и эксплуатации ускорителя с ППКФ можно судить исходя из опыта запуска и эксплуатации УРАЛ-30.

УРАЛ-30 состоит из начальной части ускорителя (НЧУ) с ПОКФ и двух секций основной части ускорителя с ППКФ, каждая из которых разбита на две подсекции с одинаковым приростом энергии ускоряемых частиц (обязательное условие для реализации системы АК), т.е. фактически ускоритель состоит из пяти секций с индивидуальной настройкой.

Одной из задач при запуске линейного ускорителя является определение пороговых и номинальных уровней ВЧ полей в секциях ускорителя. Высокочастотное поле в ускорителе с ВЧК-фокусировкой одновременно ускоряет и фокусирует частицы, поэтому при исследовании первых секций последующие секции приходится отключать. Но это приводит к потере значительной доли пучка на пути до измерительных устройств и затрудняет взаимную настройку секций. Тем не менее возможно определение пороговых уровней во всех секциях, благодаря

тому что фокусировка пучка ВЧ полем начинается раньше, чем резонансное ускорение.

В НЧУ порог определялся по следующей методике [70]. Все секции, кроме НЧУ, полностью отключались. Пучок с энергией НЧУ на выходе канала ускорителя отклонялся с помощью магнитного анализатора (МА) на цилиндр Фарадея (ЦФ), покрытый люминофором. По размеру пятна на люминофоре оценивалась ширина спектра энергий. Снималась зависимость ширины спектра и его положения на люминофоре от уровня поля в НЧУ. Порог определялся по моменту смещения и исчезновения спектра.

При определении порога в первой подсекции первой секции ОЧУ (C_{1-1}) все последующие секции отключались, а в НЧУ и в C_{1-1} устанавливались уровни ВЧ поля, близкие к расчётным номинальным значениям. Магнитный анализатор настраивался на энергию C_{1-1} . По максимуму тока на МА подбирались оптимальная разность фаз ВЧ поля между C_{1-1} и НЧУ и фиксировалось положение центра спектра на ЦФ. Затем снималась зависимость смещения центра спектра от уровня ВЧ поля в C_{1-1} . Порог оценивался по исчезновению свечения люминофора.

Пороговые уровни ВЧ поля в остальных секциях ОЧУ определялись так же, как в C_{1-1} . Номинальные уровни устанавливались исходя из значений пороговых уровней и затем уточнялись по ширине спектра на выходе ускорителя (при номинальных уровнях он самый узкий и стабильный).

Полезным для наладки УРАЛ-30 оказался также контроль рентгеновского излучения с поверхности ускоряющих электродов, а также излучения, связанного с потерями частиц [71, 72]. Рентгеновское излучение измерялось быстродействующими сцинтилляционными счётчиками, счётчиками с ФЭУ, а также ионизационными камерами. Контроль нейтронного излучения вёлся с помощью детектора нейтронов на основе гелиевой ионизационной камеры и активационных детекторов из родия и индия.

Эксплуатация УРАЛ-30 включает в себя типичные для любого линейного ускорителя ионов действия: обеспечение заданных режимов ускорителя во время сеансов работы на потребителей пучка и профилактика оборудования ускорителя между сеансами.

8. Заключение

Подведём итоги.

Линейные ускорители ионов с ВЧКФ (в составе ПОКФ и ППКФ), как в протонном варианте в определённом диапазоне энергий, так и при ускорении тяжёлых ионов, могут быть предпочтительными для применения.

Технологии, освоенные в ИФВЭ при создании ускорителей с ВЧКФ, не содержат ничего экзотического. Несомненно, что применение современных технологий позволит решить проблемы ВЧКФ, упомянутые в статье, и проще, и на более высоком качественном уровне.

Технологии, разработанные при создании протонных ускорителей с ВЧКФ, можно применять при создании ЛУТИ с ВЧКФ. Такой ускоритель может оказаться весьма перспективным видом ускорителя для производства ускоренных пучков тяжёлых ионов, необходимых для многих практических применений. Он может быть не

только дешёвым, но и экономичным, что немаловажно для промышленного ускорителя. А в случае использования его в качестве инжектора для кольцевого ускорителя он позволяет обеспечить для инжекции пучок высокого качества.

Как и ПОКФ, ППКФ на практике на протяжении десятилетий доказала свою работоспособность.

Авторы считают своим долгом почтить память безвременно ушедших от нас сотрудников ИФВЭ, внёсших определяющий вклад в разработку и создание линейных ускорителей с ВЧКФ. К ним относятся: О.К. Беляев, В.Б. Степанов, О.В. Ершов, И.Г. Мальцев, Е.В. Мазуров, А.В. Жеребцов. Особенно выдающуюся роль сыграл В.А. Тепляков — родоначальник ВЧК фокусировки и многолетний руководитель нашего коллектива.

Список литературы

- Беляев О К и др. *Письма в ЭЧАЯ* **10** 1292 (2013); Belyaev O K et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **10** 795 (2013)
- Владимирский В В *Приборы и техника эксперимента* (3) 36 (1956)
- Каретников Д В и др. *Линейные ускорители ионов* (М.: Госатомиздат, 1962) с. 71
- Fer F et al., в сб. *Труды Международ. конф. по ускорителям, Дубна, 21–27 августа 1963 г.* (Под ред. А А Коломенского и др.) (М.: Атомиздат, 1964) с. 513
- Мальцев А П, Тепляков В А *Приборы и техника эксперимента* (4) 29 (1965)
- Boussard D, in *Proc. of the 1st Particle Accelerators Conf., 10–12 Mar 1965, Washington, DC, USA; IEEE Trans. Nucl. Sci.* **12** 648 (1965)
- Мальцев А П, Зотова Э А, Тепляков В А *Приборы и техника эксперимента* (4) 20 (1964)
- Тепляков В А и др. *Приборы и техника эксперимента* (4) 26 (1965)
- Тепляков В А *Приборы и техника эксперимента* (6) 24 (1964)
- Мальцев А П, Ермаков С М, Тепляков В А *Атомная энергия* **23** (3) 195 (1967); Mal'tsev A P, Ermakov S M, Teplyakov V A *Atom. Energy* **23** 917 (1967)
- Тепляков В А, Степанов В Б *Радиотехника и электроника* **1** 1965 (1968)
- Тепляков В А и др. *Бюлл. изобрет.* (19) 93 (1967)
- Мальцев А П, Степанов В Б, Тепляков В А, Препринт № 69-2 (Серпухов: ИФВЭ, 1969)
- Ильевский С А и др. *Атомная энергия* **34** (1) 56 (1973); Il'evskii S A et al. *Atom. Energy* **34** 77 (1973)
- Капчинский И М, Тепляков В А *Приборы и техника эксперимента* (2) 19 (1970)
- Капчинский И М, Тепляков В А *Приборы и техника эксперимента* (4) 17 (1970)
- Мальцев А П, Степанов В Б, Тепляков В А, Препринт № 71-116 (Серпухов: ИФВЭ, 1971)
- Капчинский И М, Препринт № 72-29 (Серпухов: ИФВЭ, 1972)
- Капчинский И М, Мальцев А П, Тепляков В А, в сб. *Труды VII Международ. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Ереван–Цахкадзор, 1969 г.* Т. 1 (Под общ. ред. А И Алиханяна) (Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1970) с. 153
- Владимирский В В, Капчинский И М, Тепляков В А *Бюлл. изобрет.* (10) 75 (1970)
- Голосай Н И и др. *Атомная энергия* **39** (2) 123 (1975); Golosai N I et al. *Atom. Energy* **39** 716 (1975)
- Иоффе Б Л и др., в сб. *Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 11–13 октября 1978 г.* Т. 1 (Издания ОИЯИ, Д9-11874) (Дубна: ОИЯИ, 1979) с. 236
- Potter J M et al., in *Proc. of the 8th Particle Accelerators Conf., PAC'79, San Francisco, CA, USA, 12–14 March 1979; IEEE Trans. Nucl. Sci.* **26** 3745 (1979)
- Адо Ю М и др., в сб. *Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 5–7 октября 1976 г.* Т. 1 (М.: Наука, 1977) с. 42
- Горшков Б М и др. *ЖТФ* **47** 2328 (1977); Gorshkov B M et al. *Sov. Phys. Tech. Phys.* **22** 1348 (1977)
- Егоров А А и др. *ЖТФ* **51** 1643 (1981); Egorov A A et al. *Sov. Phys. Tech. Phys.* **26** 942 (1981)
- Жеребцов А В, Мальцев А П, Тепляков В А, Препринт № 90-29 (Протвино: ИФВЭ, 1990)
- Зенин В А и др., в сб. *Труды VIII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 19–21 октября 1982 г.* Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1983) с. 77
- Зенин В А и др., в сб. *Труды XIII Международ. конф. по ускорителям частиц высоких энергий, Новосибирск, 7–11 августа 1987 г.* Т. 1 (Отв. ред. А Н Скринский) (Новосибирск: Наука, 1987) с. 312
- Demikhovsky D A et al., in *Proc. of the 1st European Particle Accelerator Conf., EPAC 1988, Rome, Italy, 7–11 June 1988* Vol. 1 (Ed. S Tazzari) (Singapore: World Scientific, 1989) p. 605
- Зенин В А и др., Препринт № 93-147 (Протвино: ИФВЭ, 1993)
- Belyaev O K et al., in *Proc. of the 20th Russian Conf. on Charged Particle Accelerators, RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, September 10–14, 2006* (Eds M Kuzin, E Shirkova) (Novosibirsk: BINP, 2006) p. 273
- Коноплёв Е А, Мальцев А П, Степанов В Б, Препринт № 72-24 (Серпухов: ИФВЭ, 1972)
- Дерновой Г Н, Мальцев А П *ЖТФ* **52** 1209 (1982)
- Буданов Ю А, Мальцев А П, Препринт № 83-9 (Серпухов: ИФВЭ, 1983)
- Степанов В Б, Тепляков В А *Бюлл. изобрет.* (13) 226 (1970)
- Тимофеев А А, Патент РФ на изобретение 24561130 (2012)
- Протасьев В Б, Тимофеев А А, Препринт № 2009-3 (Протвино: ИФВЭ, 2009)
- Дерновой Г Н и др., Препринт № 75-1 (Серпухов: ИФВЭ, 1975)
- Жеребцов А В, Мальцев А П, Препринт № 80-47 (Серпухов: ИФВЭ, 1980)
- Тепляков В А, Мальцев А П, Степанов В Б, Препринт № 2006-5 (Протвино: ИФВЭ, 2006)
- Kilpatrick W D *Rev. Sci. Instrum.* **28** 824 (1957)
- Степанов В Б, Тепляков В А, Препринт № 74-130 (Серпухов: ИФВЭ, 1974)
- Степанов В Б, Препринт № 74-151 (Серпухов: ИФВЭ, 1974)
- Беляев О К, Препринт № 2011-10 (Протвино: ИФВЭ, 2011)
- Беляев О К, Рябов А Д, Степанов В Б *Приборы и техника эксперимента* (5) 96 (1998)
- Беляев О К и др., Препринт № 92-58 (Протвино: ИФВЭ, 1992)
- Беляев О К, Звонарёв И А *Приборы и техника эксперимента* (3) 13 (2010); Belyaev O K, Zvonarev I A *Instrum. Exp. Tech.* **53** 327 (2010)
- Дайковский А Г, Португалов Ю И, Рябов А Д, Препринт № 80-107 (Серпухов: ИФВЭ, 1980)
- Барсуков А Б и др., Препринт № 82-178 (Серпухов: ИФВЭ, 1982)
- Барсуков А Б, Препринт № 80-163 (Серпухов: ИФВЭ, 1986)
- Абрамов А Г и др., в сб. *Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 19–21 октября 1982 г.* Т. 1 (Дубна: ОИЯИ, 1983) с. 149

53. Беляев О К и др., Препринт № 90-125 (Протвино: ИФВЭ, 1990)
54. Беляев О К, Степанов В Б, Препринт № 87-135 (Протвино: ИФВЭ, 1987)
55. Степанов В Б и др. *Приборы и техника эксперимента* (6) 20 (1972)
56. Мальцев А П *Атомная энергия* **21**(4)295(1966); Mal'tsev A P *Atom. Energy* **21** 963 (1966)
57. Мальцев А П, Шулаев Г А *ЖТФ* **52** 1604 (1982)
58. Шулаев Г А, Препринт № 89-115 (Серпухов: ИФВЭ, 1989)
59. Барсуков А Б, Беляев О К, Игошин В Б, Препринт № 84-16 (Серпухов: ИФВЭ, 1984)
60. Абрамов А Г и др., Препринт № 84-64 (Серпухов: ИФВЭ, 1984)
61. Грушичев И А, Поповкин В В, Препринт № 92-141 (Протвино: ИФВЭ, 1992)
62. Мальцев И Г, Тепляков В А, Препринт № 74-112 (Серпухов: ИФВЭ, 1974)
63. Тепляков В А *Бюлл. изобрет.* (41) 160 (1974)
64. Мальцев И Г, Тепляков В А *Бюлл. изобрет.* (5) 211(1976)
65. Мальцев И Г, Тепляков В А, Препринт № 76-137 (Серпухов: ИФВЭ, 1976)
66. Мазуров Е В, Мальцев И Г, Нагаев В И, Препринт № 77-122 (Серпухов: ИФВЭ, 1977)
67. Мальцев И Г, Препринт № 80-4 (Серпухов: ИФВЭ, 1980)
68. Мазуров Е В, Мальцев И Г, Нагаев В И, Препринт № 81-125 (Серпухов: ИФВЭ, 1981)
69. Мальцев И Г, Тепляков В А, Препринт № 74-112 (Серпухов: ИФВЭ, 1974)
70. Зенин В А, Препринт № 82-160 (Серпухов: ИФВЭ, 1982)
71. Зенин В А, Чиманков М Н, Препринт № 85-103 (Серпухов: ИФВЭ, 1985)
72. Зенин В А и др., Препринт № 85-177 (Серпухов: ИФВЭ, 1985)

Ion linear accelerators with high-frequency quadrupole focusing

Yu.A. Budanov^(a), V.P. Golubkov^(b), I.A. Grushichev^(c), A.P. Maltsev^(d), A.A. Timofeev^(e), N.A. Chernyi^(f)

*National Research Center Kurchatov Institute, Institute for High Energy Physics,
pl. Nauki 1, 142281 Protvino, Moscow region, Russian Federation*

E-mail: ^(a) Yury.Budanov@ihep.ru, ^(b) kernen2011@yandex.ru, ^(c) Igor.Grushichev@ihep.ru,

^(d) Anatoliy.Maltsev@ihep.ru, ^(e) Alexander.Timofeev@ihep.ru, ^(f) jird@yandex.ru

High-frequency quadrupole focusing (HFQF) has revolutionized ion linear accelerator technology. A brief historical essay on HFQF development is presented. Solutions to the problems undertaken at the Institute for High Energy Physics (IHEP) during the design work and fabrication of linear accelerators with HFQF are discussed. Spatially homogeneous quadrupole focusing (SHQF or, in Western terminology, RFQ) is now used in the front ends of almost all ion linear accelerators. A linear accelerator with spatially periodic quadrupole focusing (SPQF or, in Western terminology, RFQ DTL) is successfully operating as part of the IHEP accelerator complex. Spatially periodic quadrupole focusing has a number of advantages, both for proton acceleration and in heavy ion linear accelerators.

Keywords: ion linear accelerators, high frequency quadrupole focusing, fabrication and tuning technology

PACS number: **29.20. – c**

Bibliography — 72 references

Received 15 November 2024, revised 24 January 2025

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **195** (10) 1094 – 1107 (2025)

Physics – Uspekhi **68** (10) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.01.039854>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.01.039854>