



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2006 –5  
ОУ У-70, ОЛУ

В.А. Тепляков, А.П. Мальцев, В.Б. Степанов

**ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ КВАДРУПОЛЬНАЯ ФОКУСИРОВКА**  
*( К ИСТОРИИ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ )*

Протвино 2006

**Аннотация**

Тепляков В.А., Мальцев А.П., Степанов В.Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития): Препринт ИФВЭ 2006-5. – Протвино, 2006. – 34 с., 29 рис., 1 табл., библиогр.: 48.

Дано краткое описание истории возникновения высокочастотной квадрупольной фокусировки и ее развития в ИФВЭ, представленное в докладах, сделанных авторами на семинаре (07.11.2005 г.), посвященном юбилею В.А. Теплякова по случаю его восьмидесятилетия.

**Abstract**

Tepliyakov V.A., Maltsev A.P., Stepanov V.B. Radiofrequency Quadrupole Focusing (About the History of Their Origin and Developing) : IHEP Preprint 2006-5. – Protvino, 2006. – p. 34, figs.: 29, table 1, refs.: 48.

The history of radiofrequency quadrupole focusing origin and development at IHEP, that was briefly reported by authors on Tepliyakov 80th birthday anniversary seminar (07.11.2005), is given.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>В.А. Тепляков "О первом сильноточном ускорителе в СССР и о рождении фокусировки ускоряющим полем"</b>	3
<i>Вместо введения</i>	3
<i>Ускорители в ИХФ АН СССР</i>	3
<i>Ускорители на Урале</i>	4
<i>Инжектор И-100 в ИФВЭ</i>	5
<i>УРАЛ в Протвино</i>	6
<i>RFQ в Лос-Аламосе</i>	7
<i>Литература</i>	8
<b>А.П. Мальцев "Развитие теории динамики частиц в линейном ускорителе с высокочастотной квадрупольной фокусировкой"</b>	9
<i>Методика расчетов</i>	9
<i>Задачи</i>	18
<i>Расчет физических параметров конкретных ускорителей с ВЧКФ</i>	19
<i>Вопросы динамики частиц</i>	20
<i>Формирование пучка в НЧУ</i>	21
<i>Согласование пучка в НЧУ</i>	21
<i>Согласование пучка между секциями</i>	22
<i>Учет сил пространственного заряда</i>	22
<i>а) Продольное движение в НЧУ (модель круглого пучка)</i>	22
<i>б) Гауссовская параметризация распределения заряда</i>	22
<i>в) Метод крупных частиц</i>	22
<i>г) Самосогласованные распределения заряда</i>	23
<i>Допуски на погрешности канала</i>	23
<i>а) Аналитические оценки</i>	23
<i>б) Расчет допусков на компьютере</i>	24
<i>Краткий обзор ускорителей с ВЧКФ, разработанных и созданных в ИФВЭ</i>	24
<i>Литература</i>	25
<b>В.Б. Степанов "Вопросы создания ускоряющих структур с ВЧК-фокусировкой в ИФВЭ"</b>	27
<i>Юстировка ускоряющих электродов в ускорителе с ВЧК-фокусировкой</i>	28
<i>Электрическая прочность. Электронная нагрузка</i>	29
<i>Макеты</i>	31
<i>Первые макеты с ППКФ</i>	32
<i>Первые макеты с ПОКФ</i>	32
<i>Четырехкамерный резонатор</i>	33
<i>Расчетные модели</i>	34

**В.А. Тепляков**

## **О первом сильноточном линейном ускорителе в СССР и о рождении фокусировки ускоряющим полем**

### *Вместо введения*

2004 год был годом юбилеев: 50 лет ЦЕРНу, 40 лет Международному центру теоретической физики в Италии, 10 лет Европейской синхротронной фабрике во Франции. А я, выходит, со своим юбилеем на целый год опоздал.

Я всегда любил изобретать: вначале как радиолюбитель, затем, как специалист-радиотехник, а позже как ускорительщик. Но, к сожалению, мои изобретения опаздывали. В журналах появлялись изобретения, но не мои.

Меня часто "доставал" вопрос: "а почему так не делают за рубежом?" И я недоумевал: "а почему так не делать?"

Мои друзья часто говорили: надо подождать, когда это признают другие. Как правило, это означало: если идея хороша, то она непременно появится где-то...

Последние два года я увлеченно работал над идеей, которую мы с Виктором Борисовичем Степановым реализовали экспериментально, как радиотехники. Это было наше первое экспериментальное исследование Н-резонатора. Теперь же, я стремился показать, что "красиво" эту задачу можно решить аналитически и проще, чем обычно делают, сшивая поля...

Но речь пойдет о другом. Юбилей, как я осознал, нужно отмечать итогами.

### *Ускорители в ИХФ АН СССР*

После демобилизации из действующей армии в 1947 г. я поступил во Всесоюзный заочный политехнический институт и спустя год – на работу в Институт химической физики к академику Н.Н. Семенову, в лабораторию Б.К. Шембеля. Борис Константинович мне объяснил: "В линейном ускорителе заряженные частицы ускоряются высокочастотным электрическим полем. Когда поле ускоряет, ионы летят в зазоре между трубками дрейфа. Когда поле становится тормозящим, ионы дрейфуют внутри трубки. Мы будем разрабатывать такой ускоритель".

Позже я узнал, что Н.Н. Семенову и Б.К. Шембелю Правительством было поручено принять участие в создании самого мощного ускорителя, работающего в непрерывном режиме. Над этой задачей трудились теоретики ХФТИ под руководством А.И. Ахиезера, эта задача была поручена Институту мощной радиотехники в Ленинграде. В Сухумском физико-техническом институте лаборатория М. фон Арденне в отделе Р.А. Демирханова разрабатывала источник протонов. К этой же задаче – создание ускорителя – был подключен и Ленинградский институт Е.Г. Комара, который мы знаем теперь как НИИЭФА.

При изучении цилиндрического резонатора на отдельном "отсеке", мне удалось установить странную зависимость: расстройка резонатора по частоте зависит от параметра  $(2d + h)$ , где  $d$  – диаметр трубки дрейфа,  $h$  – длина отсека. В результате появилась моя первая статья в журнале [1].

Как оказалось, ускорителем мы занимались не случайно. Он был нужен, чтобы создать мощный поток нейтронов. Нейтроны позволяли перерабатывать торий в уран или уран в плутоний. Такой же ускоритель разрабатывался в Ливерморе в США.

Пока мы трудились над проектом ускорителя, геологи разведали достаточно мест, где можно добывать уран. А физики научились из него делать оружейный плутоний.

В 1955 г. Б.К. Шембель готовился поехать на конференцию по ускорителям в Женеву. А я "носился" с идеей: ускоритель не надо делать таким, как в Ливерморе, в виде бака, диаметром 20 м и длиной 26 м. Ускоритель надо делать работающим на двух частотах. Начальная часть ускорителя должна отличаться от основной. Задача начальной части – подготовить пучок ионов к регулярному ускорению в основной части. Начальную часть надо делать на четверть-волновых коаксиальных резонаторах. Еще до начала конференции стало известно, что американцы собираются доложить о проекте ускорителя А-48. Оказывается, мое изобретение опять опоздало. Однако Б.К. Шембелю поручили продолжить разрабатывать наш проект, который, к моему удивлению, все больше начинал походить на американский А-48.

Именно в ускорителе непрерывного режима с мощным пучком особенно важно увеличить коэффициент захвата и снизить энергию инжекции. Группирователь с одним группирующим зазором нужно усовершенствовать, сделать группирователь с несколькими высокочастотными зазорами и, может быть, с ускорением. Это предложение мне кажется напоминающим ситуацию: мальчику, играющему на дудочке, предлагают играть на гармошке. А клавиш-то много. Как сформулировать ему задание?

Вначале я рассмотрел "двухзазорный группирователь". Оказалось, что в первом зазоре тонкий пучок нужно модулировать по скорости, а во втором зазоре в толстом пучке модуляцию снимать. В результате достигается и группировка сгустков и их фокусировка. Так как меня, "нарушающего теорему Ирншоу", в ИХФ не хотели воспринимать, я обратился к Александру Ильичу Ахиезеру. Ахиезер флегматично сказал: "Поскольку он отслеживает движение одной частицы, наверное, он прав". Я тогда в 1951 г. не знал, что опаздываю с открытием жесткой фокусировки.

Необходимость в ускорителе непрерывного режима для производства оружейного плутония отпала. Предложено было (Н.Н. Семеновым) использовать ускоритель для выработки электроэнергии. Б.К. Шембель предложил рассматривать ускоритель как машину, преобразующую электроэнергию сети в энергию заряженных частиц. Энергичные дейтроны дают много нейтронов. Они то и нужны, чтобы поддерживать ядерную реакцию в уране. Теперь нужно было думать об увеличении КПД ускорителя, о его высокой надежности.

Фокусировка ионов магнитными соленоидами очень энергозатратна. От нее нужно отказаться. Нужно отказаться от ртутных вакуумных насосов. Нужны более экономичные генераторные вакуумные приборы. Во всех направлениях хотелось изобретать.

Вскоре появились противники электроядерного метода. Они доказывали, что поднять КПД ускорителя до 20% не удастся. Да и обслуживать его с помощью роботов никто не будет.

### *Ускорители на Урале*

Пришлось наши разработки перенацелить и заняться ускорителем для нужд термоядерного синтеза. В 1958 г. мы из Москвы перебазировались на Урал. Замечательный край, и не такой уж он густонаселенный, каким он казался из Москвы.

Перелистывая недавно нашу книгу «Линейные ускорители ионов» [2], я вдруг обнаружил еще один юбилей. Сорок пять лет назад мы с Геннадием Анисимовым предложили ФУП – фокусировку ускоряющим полем [3]. Идея ФУП заключалась в следующем. С помощью прямоугольных апертурных отверстий трубок дрейфа в ускоряющих зазорах формируется фокусирующая квадрупольная компонента высокочастотного поля. Фокусирующие и дефокусирующие зазоры чередуются, создавая общий фокусирующий эффект.

Принцип законопеременной фокусировки давно известен из оптики: из последовательности фокусирующих и дефокусирующих линз делают телескопы и микроскопы. Давно известны и квадрупольные линзы.

Идея ФУП впервые была реализована в электронной модели протонного ускорителя Анатолием Павловичем Мальцевым [4]. В цилиндрическом резонаторе размещались трубки дрейфа с каналами прямоугольного сечения. Фокусировка осуществлялась краевым эффектом поля: то по вертикали, то по горизонтали. Опубликовать этот вариант фокусировки мы собирались на конференции 1963 г. в Дубне. Но узнали, что Ф. Фер, П. Лапостоль и др. также направили доклад с подобной идеей. Поэтому наш доклад мы не послали. Впрочем, в 1962 г., на год раньше, вышла наша книга [2], в которой идея ФУП была уже опубликована.

В 1963 г. появилась моя статья [5], в которой показано, что фокусировка высокочастотными квадрупольными может быть достаточно эффективной. Дело в том, что если на одном зазоре создаются и квадрупольная и ускоряющая (аксиальная) компоненты поля, то напряжение на квадруполе ограничено опасностью пробоя. Темп ускорения оказывается низким, а фокусировка недостаточной. На периоде ускорения  $\beta\lambda$  нужно иметь не менее четырех промежутков с напряжением, допустимым на одном квадруполе.

Чтобы создать необходимое распределение потенциалов на электродах ускорителя, нам с Виктором Борисовичем Степановым пришлось изобрести новый тип резонатора – Н-резонатор [6]. Он возбуждается на Н-волне, на низшей (критической) частоте. Исследуя такой резонатор, мы понимали его как четвертьволновый или полуволновый резонатор, сильно вытянутый в поперечном направлении, от которого собственная частота не зависит.

Н-резонатор, нагруженный электродами квадрупольной фокусировки, оказался простой и технологичной конструкцией. Его внешний диаметр почти в четыре раза меньше диаметра цилиндрического резонатора. И по потерям мощности он не уступал резонатору Альвареца.

Когда Б.К. Шембель рассказал о рождении у нас ускорителя нового типа одному из руководителей Института, тот посоветовал "не высовываться": пусть другие нас оценят.

Маленький протонный ускоритель с ФУП мы все-таки построили и успешно испытали. Заработал у нас и ускоритель непрерывного режима ПТ-500. В нем протоны с током 150 мА ускорялись от 70 до 500 КэВ. Фокусировка пучка осуществлялась магнитными соленоидами.

В 1966 году идеи термоядерного синтеза стали не в почете. По-видимому, кому-то не хотелось, чтобы на Урале велись работы по линейным ускорителям. Сектор Б.К. Шембеля решено было расформировать. А коллектив был неплохой. ИТЭФ, филиал ИАЭ, ИФВЭ и другие институты получили хорошее пополнение.

Я с уважением вспоминаю моих товарищей, коллег: С.М. Ермакова, А.В. Зотова, В.А. Юрченко и других.

### ***Инжектор И-100 в ИФВЭ***

Мне с сотрудниками лаборатории предстояло заниматься эксплуатацией ускорителя И-100.

Монтаж И-100 активно вели сотрудники Радиотехнического института. Общее руководство от ИФВЭ осуществлял главный инженер Отдела инжектора С.А. Ильевский, а научное руководство – И.М. Капчинский. Это были грамотные и опытные руководители. На мою долю выпала обязанность устранить то, что в проекте было недодумано, что не работало.

Первое, что нужно было переделать, – это избавиться от необходимости каждые два часа выключать ускоритель, чтобы залить жидкий азот в ловушки паромасляных насосов форинжектора. (Иных типов вакуумных насосов с такой скоростью откачки, и не вредных для ускорителя, тогда не было.) Пришлось изобрести импульсный напуск водорода в источник протонов. У нас уже был источник протонов с малым объемом вакуумной камеры. При импульсном напуске водорода один раз в секунду расход водорода резко снизился. Появилась возможность применить на форинжекторе титановые магниторазрядные насосы, которые применялись на резонаторах ускорителя.

При работе с бустером в пакетно-импульсном режиме объем источника пришлось еще уменьшить. Изобретательность и большой труд потребовались от Виталия Васильевича Нижегородцева, чтобы обеспечить работу форинжектора И-100. Ему в этом пригодился уральский опыт.

Выявляя и устраняя причины аварий, простоев и нестабильной работы И-100, нам в основном удалось завершить эти работы к ноябрю 1967 г., к моменту пуска кольцевого ускорителя У-70.

Обеспечив надежную эксплуатацию И-100, мы получили возможность продолжить разработку ускорителя с фокусировкой ускоряющим полем.

### ***УРАЛ в Протвино***

Вначале была проверена работоспособность макета УРАЛ-4 (Ускорителя Резонансного Автофокусирующего Линейного на энергию протонов 4 МэВ). Фокусировка работала при токе ускоренных протонов до 20 мА. С большим током возбуждались резонансы "ножек" промежуточных электродов.

Я уже упоминал, что мне долго не удавалось сообразить: как организовать работу группирователя с несколькими трубками дрейфа, обеспечивающую согласование пучка с требованиями основного канала ускорения. Я пытался что-то сформулировать П.Т. Пашкову, который тогда занимался аналоговой моделирующей машиной. И вдруг (после пятнадцати лет поисков) я сообразил: в Начальной Части Ускорителя (НЧУ) нужно формировать сгустки частиц с постоянной плотностью заряда! К этому времени я уже знал, что это возможно, и знал, как это сделать. Элементарная теория динамики частиц была готова уже на другой день. К созданию более совершенной теории динамики частиц в НЧУ очень активно подключился Илья Михайлович Капчинский. Как теоретик, он умел быстро и напористо работать. Я же еще долго не мог найти нужную технологию изготовления электродов и резонатора. Мне было ясно, что для НЧУ подходит четырехкамерный резонатор (как в магнетроне). Илье Михайловичу эта идея очень понравилась: "как просто!" И он за два вечера в Протвино теоретически описал четырехкамерный резонатор. А мне еще долго было не ясно, как же его сделать?

Мои мысленные мучения завершились конструкцией 2Н-резонатора. Теперь НЧУ стала адиабатическим группирователем с ускорением и фокусировкой пучка однородным по длине высокочастотным полем, имеющим квадрупольную симметрию [7]. Ее уже можно было делать.

Мне повезло, что в нашем коллективе были не только замечательные инженеры и конструкторы, но и настоящие умельцы, которые могли и находили пути, как сделать. В.С. Севостьянов, например сумел заставить стабильно работать изготовленный им орбитрон – вакуумный насос с высокой скоростью откачки водорода и с минимальным потреблением электроэнергии.

В малогабаритном Н-резонаторе (или 2Н-резонаторе) на порядок меньше запасенная энергия, чем в электромагнитном поле И-100. Именно из-за огромной энергии в резонаторе Ливерморского ускорителя при пробоях трескалась медь трубок дрейфа. Из-за малой запасенной энергии в резонаторах УРАЛ-30 при включении пучка протонов возникает быстрая "подсадка" поля. Чтобы демпфировать нестационарные процессы в системе генератор-резонатор пришлось изобрести систему АК – автокомпенсации мощности, идущей на ускорение протонов [8]. АК – это не система стабилизации поля. АК выполняет функции ферритового циркулятора, который вводит в систему активные потери при рассогласовании генератора и резонатора. Но тогда еще не были разработаны циркуляторы мегаваттного уровня мощности. Ивану Григорьевичу Мальцеву с сотрудниками пришлось много потрудиться над созданием мощной системы высокочастотного питания ускорителя УРАЛ-30 с системой АК.

Иван Григорьевич отличался фундаментальным подходом к решаемым задачам, умением преодолевать трудности, которые возникают при создании силовой техники. Я уверен, что разработанный им пятиягаваттный импульсный модулятор для высокочастотных генераторов обеспечит надежную и стабильную работу ускорителя УРАЛ-30М.

Признаюсь, что мне во время разработки НЧУ не понравилось, что Илья Михайлович стал инициировать все новые публикации (с моим участием), хотя в них, на мой взгляд, не было каких-либо новых идей.

Мы были увлечены проектом ускорителя протонов на энергию 30 МэВ. В это время обсуждались идеи создания бустера в ускорительном комплексе ИФВЭ.

Проект ускорителя с высокочастотной квадрупольной фокусировкой на энергию протонов 30 МэВ от имени И.М. Капчинского, А.П. Мальцева и В.А. Теплякова был доложен на VII Международной конференции по ускорителям (Ереван) [9]. Он вызвал заметный интерес. Тем не менее, несмотря на разъяснения Ильи Михайловича и мои, этот проект, по-видимому, мало кто принял всерьез.

При поддержке А.А. Логунова и А.А. Наумова нам удалось изготовить УРАЛ-30, используя только возможности ИФВЭ.

### *RFQ в Лос-Аламосе*

В Лос-Аламосской национальной лаборатории с привлечением многих лабораторий мира разрабатывалась широкая программа линейных ускорителей, в том числе, непрерывного режима. В Чок-Ривере (в Канаде) был создан электростатический ускоритель на 700 КэВ. При токе протонов 20 мА возникали пробой, хотя без пучка при 800 кВ пробоев не было. Нужно было что-то изобретать типа нашего НЧУ. Дж. Манка имел переводы нескольких наших публикаций и показал их в Лос-Аламосе. После 1977 г. идеи фокусировки радиоквадрупольем овладели сотрудниками Лос-Аламоса. Шло переосмысление всех их проектов. Для проверки идей ФУП создавался маленький ускоритель "Proof Of Principal". Через два года я получил телеграмму: "RFQ is alive and well" - "радиочастотный квадруполь здоровствует и хорошо".

Сотрудники Лос-Аламоса на несколько наших статей ответили сотней научных отчетов, статей и докладов на конференциях. Их аббревиатура RFQ – радиочастотный квадруполь – была принята во всем мире.

Почти неограниченное финансирование на протяжении десятков лет и упорный труд с подключением лабораторий в Англии, Германии, Канаде и Японии позволили создать ускорители непрерывного режима.

В Чок-Ривере под руководством Дж. Макмайкла заработала RFQ до энергии порядка одного МэВ, а затем в Лос-Аламосе под руководством С. Шрайбера была запущена LEDA – демонстрационный ускоритель низкой энергии до 6,7 МэВ с током протонов до 100 мА в непрерывном режиме.

Существовавший барьер в начале ускорения в непрерывном режиме преодолен!

А вот использовать высокочастотную квадрупольную фокусировку, как у нас в УРАЛ-30 (RFQ-DTL), еще никто не осмелился! Хотя, на частоте 352 МГц такому ускорителю на энергию 20-30 МэВ конкурентов пока нет.

Линейный ускоритель – это нужно, это интересно. Его еще можно и нужно совершенствовать.

Спасибо, что вы меня выслушали.

## *Литература*

1. В.А. Тепляков, Б.К. Шембель. РЭ, т.1, вып. 4, 1956.
2. Д.В. Каретников и др. Линейные ускорители ионов. – М.: Госатомиздат, 1962.
3. Г.М. Анисимов, В.А. Тепляков. ПТЭ, №1, 1963.
4. А.П. Мальцев и др. ПТЭ, №4, 29 (1965); ПТЭ, №6, 17 (1966).
5. В.А. Тепляков. ПТЭ, №6, 1964.
6. В.А. Тепляков, В.Б. Степанов. РЭ, т. XIII, № 11, 1968.
7. V.A. Teplyakov et all. – Proceed. of the VI Int. Part. Accel. Conf., 1967.
8. И.Г. Мальцев, В.А. Тепляков. Препринт ИФВЭ 74-112, Серпухов, 1974.
9. И.М. Капчинский, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. – Труды VII Международной конференции по ускорителям, Ереван, 1970.

**А.П. Мальцев**

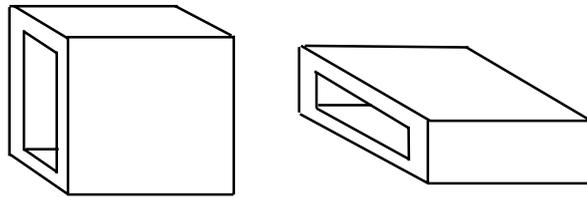
## **Развитие теории динамики частиц в линейном ускорителе с высокочастотной квадрупольной фокусировкой**

### *Методика расчетов*

В выступлениях на семинарах, посвященных юбилеям, предполагается наличие определенной доли личных воспоминаний. Поэтому я тоже начну с личных воспоминаний.

В марте 1960 года после окончания МГУ я был направлен по распределению на Урал (в Челябинск-50) в подразделение Бориса Константиновича Шембея, а конкретно – в отдел Владимира Александровича Теплякова. И вот, уже 45 лет мы работаем вместе.

Когда я впервые появился в отделе, Теплякова на месте не оказалось: он был по делам в Москве. От нечего делать, я стал ходить по отделу и знакомиться с людьми. Попутно я познакомился с теоретиками отдела, в частности, с Геннадием Анисимовым, который рассказал мне о задаче, которую он тогда решал, а именно: он пытался рассчитать фокусировку ускоряющим полем в канале, образованном трубками дрейфа с прямоугольной апертурой [1, 2] (рис. 1).



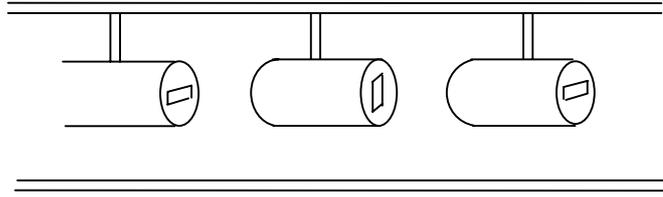
**Рис. 1.** Канал с прямоугольной апертурой.

Я тогда не подозревал, что мне придется заниматься этой же задачей, да и не все понял из рассказанного, однако уяснил, что задача, которую решал Анисимов, далеко не простая.

После приезда Теплякова мне и еще двум сотрудникам отдела было поручено заняться исследованием одного из вариантов коллективного метода ускорения. (Эти методы тогда начали обсуждаться.) Но занимались мы этим делом недолго. Где-то в конце 1960 г. (или в начале 1961 г.) Тепляков предложил мне заняться экспериментальным изучением фокусировки ускоряющим полем на электронной модели протонного ускорителя.

Модель представляла собой резонатор Альвареца, нагруженный трубками дрейфа цилиндрической формы с прямоугольными апертурными отверстиями (рис. 2).

Моделировалась динамика протонов в диапазоне от 4 до 7 МэВ. В области низких энергий (от 50 до 120 кэВ) эксперименты (непосредственно с протонами) велись группой сотрудников под руководством Сергея Ермакова. Использовался коаксиальный полуволновый резонатор с трубками дрейфа в виде спичечных коробков (рис.1).



**Рис. 2.** Канал с прямоугольной апертурой в резонаторе Альвареца.

Результаты экспериментов на электронной модели описаны в двух статьях [3, 4], эксперименты с протонами на низкой энергии описаны в работе [5]. Кроме того, одна теоретическая работа посвящена расчету параметров фокусировки в канале с прямоугольной апертурой [6]. Я немного остановлюсь на этой работе, так как именно здесь я впервые столкнулся с проблемой, которая впоследствии сопровождала нас на протяжении десятилетий.

Речь идет о проблеме определения граничных условий. Поскольку длины зазоров и диаметр апертуры в рассматриваемом ускорителе много меньше длины волны, можно с хорошей точностью пользоваться электростатическим приближением и записывать компоненты поля внутри апертуры в виде производных потенциала, который, используя квазипериодичность канала, можно представить в виде ряда Фурье-Бесселя:

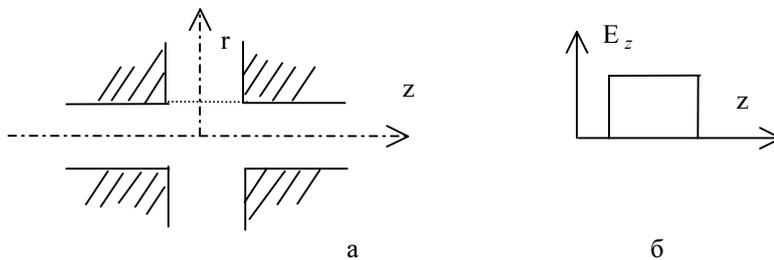
$$E_{x,y,z} = \partial u / \partial (x,y,z),$$

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

$$\kappa = 2\pi / L_\phi, \quad l_m^2 = m^2 \kappa^2 - (2\pi/\lambda)^2.$$

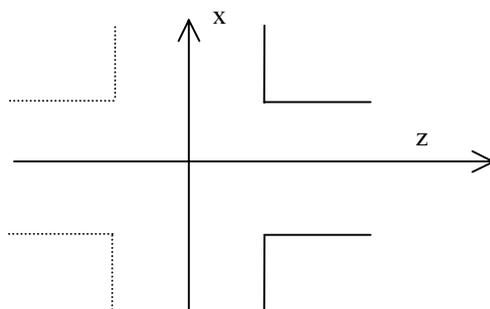
Для определения коэффициентов гармоник нужно иметь граничные условия на границе апертуры. В те времена определение граничных условий доставляло немало трудностей, так как ни о каких расчетах на компьютерах тогда не могло быть и речи.

В ускорителе Альвареца благодаря цилиндрической симметрии эта задача сводится к двумерной. Здесь в неплохом приближении можно пользоваться прямоугольной аппроксимацией зависимости от  $z$  продольной компоненты электрического поля на границе апертуры  $E_z$  ("квадратной волной", рис. 3б).



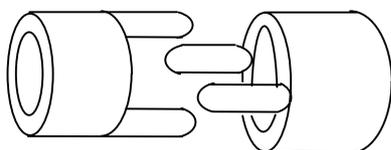
**Рис. 3.** Аппроксимация граничных условий "квадратной волной".

В канале с прямоугольной апертурой такой подход не срабатывает: если с одной стороны границей по  $z$  является металл, то с другой стороны такой границы нет, а есть щель, где распределение поля неизвестно какое. Задачу удалось решить, отступив наружу из апертуры. Зависимость поля от одной из координат исчезла, задача стала двухмерной, и после зеркального отражения поля в область  $z < 0$  (рис. 4) была решена методом конформных преобразований.

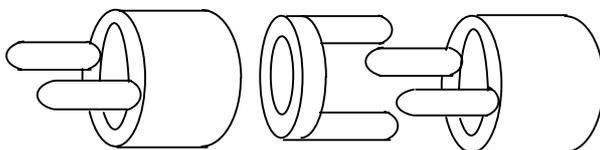


**Рис. 4.** К расчету граничных условий в канале с прямоугольной апертурой.

Расчет параметров фокусировки показал, что фокусировка слабая, коэффициент захвата мал. Когда я рассказал об этом Владимиру Александровичу, он задумчиво произнес: "Да... придется работать". На следующий же день он предложил идею двойного зазора с промежуточным электродом. Первоначально суть идеи сводилась к тому, чтобы разделить фазы ускоряющей и квадрупольной компонент в зазоре с прямоугольной апертурой. Но оценки показали, что для прямоугольной апертуры это мало что дает. Тогда Тепляков предложил отказаться от прямоугольной апертуры и использовать для формирования квадрупольной компоненты идею Владимирского (с помощью рогов на торцах трубок дрейфа, рис. 5), но делать это уже в двойном зазоре [7] (рис. 6).



**Рис. 5.** Зазор с рогами на трубках дрейфа.



**Рис. 6.** Зазор с промежуточным электродом.

А поскольку рога снижают электрическую прочность зазоров, то для получения приемлемого темпа ускорения нужно перейти от  $2\pi$ -моды (как в ускорителе Альвареса) к  $\pi$ -моды (рис. 7), которую легко реализовать в резонаторах с продольным магнитным полем, например, в H-резонаторе [8] (рис. 8).

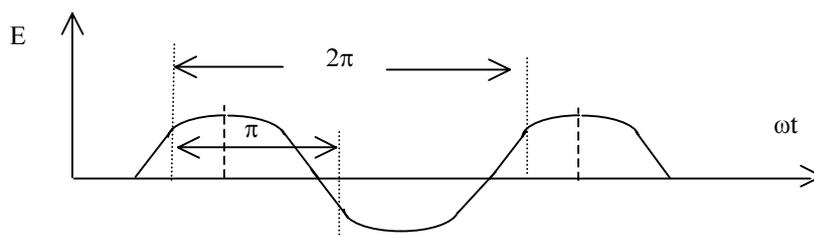


Рис. 7. Условия синхронизма.

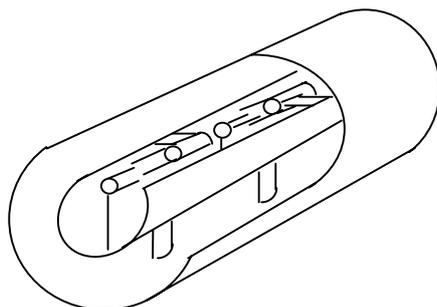


Рис. 8. H-резонатор.

Переключение трубок дрейфа с борта на борт в H-резонаторе дает эффект выпрямления ускоряющей компоненты ВЧ-поля. На ускоритель такого типа было получено авторское свидетельство [9].

Первой теоретической задачей, которую нужно было решить при реализации предложенного варианта фокусировки, был вопрос: а как же организовать двойной зазор? В нем много параметров, и нужна какая-то методика их выбора. На рис. 9 показаны возможные варианты двойного зазора.

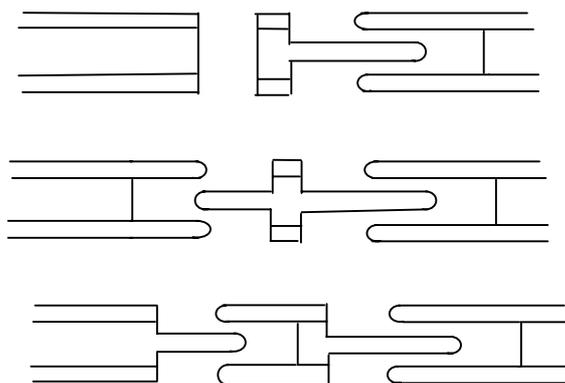


Рис. 9. Варианты двойного зазора.

Параметры фокусировки и ускорения зависят от структуры двойного зазора, от радиуса апертуры, длин зазоров, рогов и электродов, от деления напряжения по зазорам и их фазировки, а также от диаметра рогов и радиусов скруглений у кромок электродов. И опять же, для решения задачи нужно иметь граничные условия. В предположении, 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].

На начальном этапе ускорения наиболее выгодным оказывается несимметричный вариант двойного зазора, когда в первой половине рога отсутствуют. При этом достигается максимальный темп ускорения при минимальной напряженности поля на рогах и появляется возможность повышать от начала к концу резонатора напряжение на периодах ускорения. По мере роста скорости частиц и уменьшения фазовой протяженности сгустка определенные преимущества приобретает симметричный вариант, когда по обе стороны промежуточного электрода укреплены рога одинаковой длины. В этом случае вдвое уменьшается индуктивность отдельного рога, а емкостная балансировка зазоров выполняется автоматически.

Для двойного зазора была разработана техника расчета параметров фокусировки и ускорения. Прирост энергии на периоде ускорения записывается в обычном виде:

$$\Delta W = eU\vartheta \cos\varphi_s,$$

где величина

$$\vartheta = \frac{1}{U} \int_L E_0(z) \cos[\omega t(z)] dz$$

носит название эффективности ускорения ( $E_0(z)$  – ускоряющее поле на оси канала). Выражение для  $\vartheta$  содержит два члена, поскольку ускоряют оба зазора, составляющие двойной зазор. Каждый из них ускоряет в соответствии с собственной эффективностью ускорения, с той долей общего напряжения, которая на него приходится, и фазой в его геометрическом центре:

$$\vartheta = \delta_a \vartheta_a \cos\varphi_a + \delta_q \vartheta_q \cos\varphi_q.$$

Все эти параметры связаны между собой:

$$\delta_a \vartheta_a \sin\varphi_a + \delta_q \vartheta_q \sin\varphi_q = 0.$$

(Эта связь дает определение электрического центра двойного зазора.) Зависимость парциальных эффективностей ускорения от геометрических размеров зазоров дается следующей формулой:

$$\vartheta_{a,q} = \frac{\sin(\pi l_{a,q} / \beta\lambda)}{(\pi l_{a,q} / \beta\lambda) I_0(2\pi R_a / \lambda\gamma)} \cos[\pi (l_h)_{a,q}],$$

где  $l_{a,q}$  – длины зазоров на границе апертуры (в ускоряющей и квадрупольной половинах двойного зазора),  $(l_h)_{a,q}$  – соответствующие длины рогов. Определив эффективность  $\vartheta$ , можно рассчитать характеристики продольного движения, в частности, частоту продольных колебаний:

$$(\Omega/\omega)^2 = (U\vartheta |\sin\varphi_s|) / (2\pi N_a \xi \gamma^3 \beta^2).$$

Расчет параметров продольного движения осложняется тем, что его нужно проводить одновременно с расчетом параметров фокусировки. Траектория частицы в канале с жесткой фокусировкой выглядит в виде модулированной синусоиды (рис. 10).

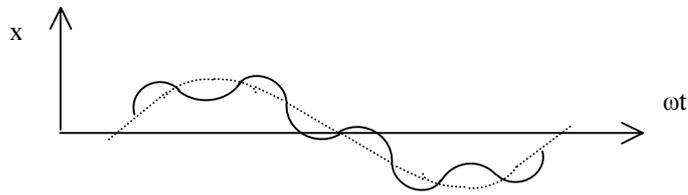


Рис. 10. Траектория частицы.

Ее можно охарактеризовать тремя частотами: частотой медленных колебаний  $\mu$  (набегом фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки) и частотами Флоке-модуляции – минимальной частотой  $\nu_{\min}$  и максимальной частотой  $\nu_{\max}$ :

$$x(\tau) = x_{\max} [1 + q(\tau)] \sin(\mu\tau + B); \quad q(\tau) = q(\tau+1); \quad \mu, \nu_{\min}, \nu_{\max}.$$

Этими частотами определяется акцептанс канала

$$A = \nu_{\min} (R_a)^2 \gamma / N_{\Phi} \lambda,$$

а также отношение полюсей поперечного сечения согласованного пучка в кроссовере. Для расчета названных частот были построены диаграммы типа показанной на рис. 11.

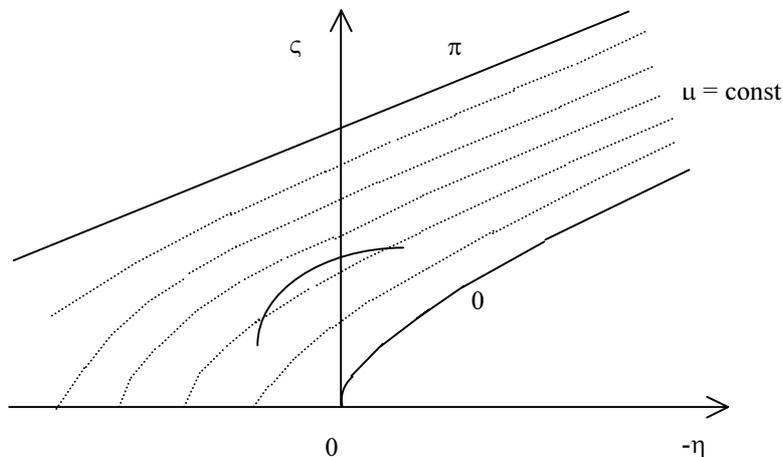


Рис. 11. Диаграмма устойчивости.

Кривая состояния частиц в области рабочих фаз (от  $-\varphi_s$  до  $2\varphi_s$ ) имеет вид дуги эллипса. Подбирая параметры двойного зазора, можно обеспечить минимальную разницу в частотах для всех фаз сгустка. По осям координат на рис. 11 отложены:  $\eta$  – фактор дефокусировки и  $\zeta$  – жесткость фокусировки. Для их расчета были получены формулы, связывающие эти величины с параметрами двойного зазора:

$$\eta = T \sin \varphi, \quad T \approx \Delta W / W, \quad T = (\pi N_a \vartheta U) / (\xi \beta^2 \gamma^3),$$

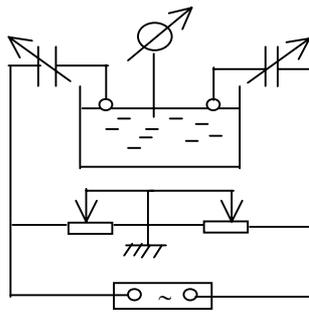
$$\zeta = T(\sigma_c \cos \varphi + \sigma_s \sin \varphi),$$

$$\sigma_s = -(\delta_q \vartheta \sigma_q / \vartheta) \sin \varphi_q, \quad \sigma_c = (\delta_q \vartheta \sigma_q / \vartheta) \cos \varphi_q,$$

$$\sigma_q = \frac{I_0(2\pi R_a / \gamma \beta \lambda)}{2\gamma^2 I_2(2\pi R_a / \gamma \beta \lambda)} \operatorname{tg}(\pi l_h / \beta \lambda).$$

Фактор дефокусировки прямо пропорционален темпу ускорения, а жесткость фокусировки обратно пропорциональна квадрату радиуса апертуры и прямо пропорциональна (в первом приближении) длине рогов. Жесткость фокусировки зависит также от деления напряжения в двойном зазоре и от фазировки зазоров.

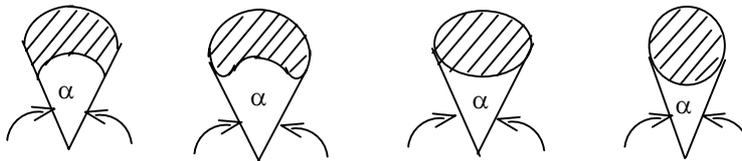
На основе описанной диаграммной техники был рассчитан первый действующий ускоритель с ВЧКФ – модель ускорителя на 4 МэВ – УРАЛ-4 [11]. Расчеты инжектора в бустер УРАЛ-30 [12] велись уже по более совершенной методике [13], в которой для определения граничных условий использовалась электролитическая ванна (рис. 12).



**Рис. 12.** Электролитическая ванна.

В электролит погружены электроды, моделирующие элементы двойного зазора. На электроды от низкочастотного генератора подается электрическое напряжение. С помощью реостата нулевой потенциал перемещается по поверхности электролита. Измерительным прибором отслеживается распределение нулевых эквипотенциалей. Затем измерения обрабатываются.

Сначала нужно было выбрать форму рогов для уменьшения вклада высших азимутальных гармоник (рис. 13).



**Рис. 13.** Формы поперечных сечений рогов.

В конце концов, мы остановились на круглых рогах, как наиболее технологичных и уже опробованных (в УРАЛ-4 рога были круглыми). На состав азимутальных гармоник можно воздействовать величиной азимутального угла  $\alpha$ , под которым виден рог с оси ускорителя (т.е. диаметром рога). Нелинейность поля максимальна вблизи границы апертуры. Если взять интеграл по азимутальной переменной от разности между реальным и идеальным (квадрупольным) распределениями потенциала на границе апертуры, то величина этого интеграла  $\Delta$  как раз и будет характеризовать нелинейность:

$$\Delta = \int_0^{2\pi} \{ [|u(r,\theta)| - |u_0(r,\theta)|]_{r=R_a} \} d\theta/U$$

Оказывается, есть такой угол ( $\alpha = 60^\circ$ ), где величина  $\Delta$  минимальна и поле близко к квадрупольному (рис. 14).

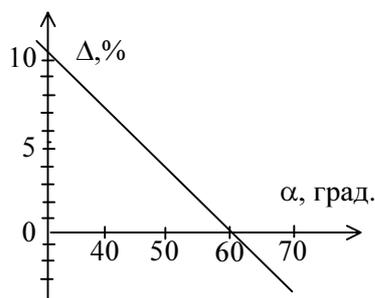


Рис. 14. Нелинейность поля.

Распределение напряженности поля  $E_z(z)$  на границе апертуры в зазоре между рогом и торцом соседнего электрода, как и следовало ожидать, оказалось не прямоугольным (рис. 15).

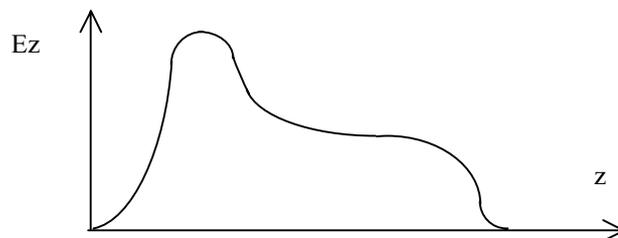
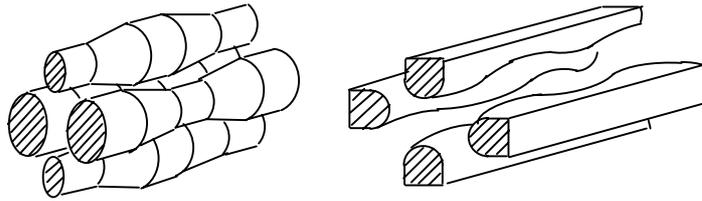


Рис. 15. Напряженность поля на границе апертуры.

Зафиксировав размеры, от которых зависит  $E_z(z)$  на границе апертуры, можно с помощью рядов рассчитывать компоненты поля внутри апертуры. Описанная методика применялась для расчета основной части ускорителя (ОЧУ) с пространственно-периодической квадрупольной высокочастотной фокусировкой.

Для начальной части ускорителя (НЧУ) с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой такая методика не годится: здесь нельзя выделить образующие вдоль граничного цилиндра, на которых можно было бы задавать некие универсальные для всех периодов граничные распределения поля. Поэтому при разработке в ИФВЭ первых НЧУ [14] была применена следующая методика. Первоначально мы использовали электроды цилиндрической формы с конусными переходами (рис. 16).



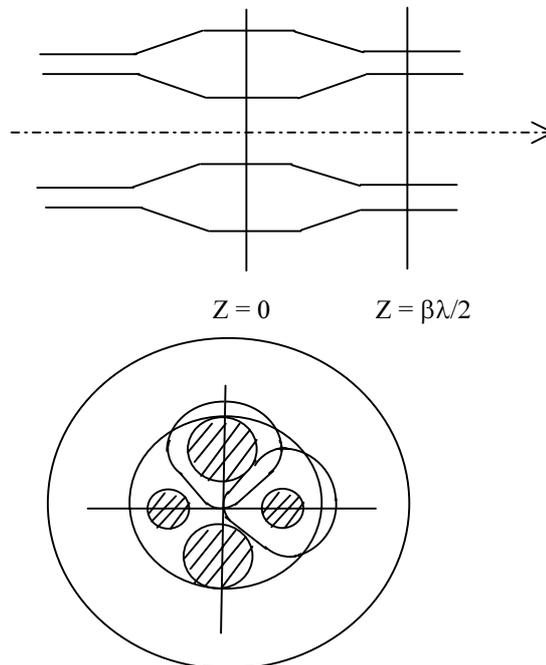
**Рис. 16.** Электроды НЧУ с ПОКФ: цилиндрические и лопастные.

Длины конусных переходов и средний диаметр электродов выбирались таким образом, чтобы минимизировать высшие гармоники поля (и продольные, и поперечные) и приблизить его к идеальной форме:

$$u(r, \theta, z, t) = u \left[ -\frac{2}{\pi} I_0(k_1 r) \vartheta \sin(k_1 z) + \frac{r^2}{2R_0^2} \cos(2\theta) \right] \cos(\omega t).$$

Когда в ИФВЭ появились станки с числовым программным управлением, мы перешли к электродам лопастной формы, для которых требуемое распределение поля получается легче и с более высокой точностью.

К этому времени у нас была разработана методика расчета поля в НЧУ на компьютере путем сшивки решений в частных областях [15, 16]. Электроды окружаются цилиндрами некруговой формы (рис. 17).



**Рис. 17.** Разбиение области решения на подобласти.

Поверхности цилиндров частично касаются электродов с заданными потенциалами, частично проходят в соседних областях. Решения в этих областях используются в качестве граничных условий на поверхности цилиндров. По продольной оси  $z$  накладываются условия периодичности. На внешнем – достаточно далеко расположенном – цилиндре потенциал полагается равным нулю. Решения записываются в виде рядов Фурье-Бесселя. Проинтегрировав граничные условия по азимуту и по  $z$  на периоде ускорения, можно получить замкнутую алгебраическую систему для определения коэффициентов гармоник. Этот метод годится как для круглых, так и для лопастных электродов.

Трудоемкость измерений на ванне вынудила нас искать способы расчета поля в канале ОЧУ на компьютере. Был разработан способ расчета граничных условий на основе одного из методов Монте-Карло – метода блуждания по сферам [17]. Из исследуемой точки строится случайная траектория  $Q_0 \rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow \dots$ , состоящая из отрезков, равных радиусам сфер, касающихся ближайшего электрода (рис. 18).

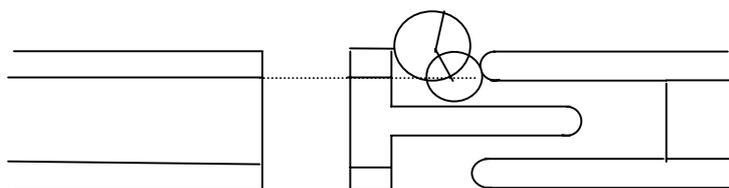


Рис. 18. Блуждание по сферам.

Направление очередного радиус-вектора из центра очередной сферы выбирается с помощью генератора случайных чисел с равномерным распределением. Блуждающая точка (соответствующая центру очередной сферы) рано или поздно заканчивает свое блуждание в  $\varepsilon$ -окрестности границы ( $\varepsilon$ -окрестность – это слой толщиной  $20 \div 30$  мкм, окружающий электроды). Процесс блуждания разыгрывается  $N$  раз. Потенциал в исследуемой точке равен усредненному значению потенциалов в точках выхода:

$$u(Q_0) \cong (1/N) \sum_{s=1}^N u(\gamma_s).$$

При  $N \rightarrow \infty$  решение сходится по вероятности к точному решению уравнения Лапласа. Достоинство метода – при определении потенциала в нужных точках нет необходимости решать задачу во всей области.

Этот метод использовался во время расчета параметров УРАЛ-30 [18] при доводке его до эксплуатационных требований. Метод оказался настолько удачным, что мы им пользуемся уже около 25 лет. В последнее время для расчета поля в канале с ВЧКФ стали доступными сеточные методы. Однако даже сейчас при выборе вариантов канала сеточные методы уступают методу Монте-Карло по оперативности и времени счета.

### Задачи

Я пока говорил, в основном, о развитии методики расчетов. Перейду к задачам, которые решались на протяжении прошедших лет. Во-первых, это конкретные расчеты физических параметров и геометрических размеров ускоряюще-фокусирующих каналов конкретных

ускорителей. (Замечу, что в нижеприведенном списке перечислены не все ускорители, разработкой которых нам пришлось заниматься.) Во-вторых, это вопросы динамики частиц.

### ***Расчет физических параметров конкретных ускорителей с ВЧКФ***

1. Модель ускорителя с ВЧКФ на 4 МэВ (УРАЛ-4).
2. Ускоритель на 5 МэВ (отправлен в Харьков).
3. УРАЛ-30.
4. УРАЛ-7 (отправлен в Сухуми).
5. Расчет ускорителя для инъекции в суперциклотрон (ОИЯИ).
6. УРАЛ-10 (ЛУСИ).
7. НЧУ-2Э.
8. НЧУ-0.7И.
9. ДУ-1 (демонстрационный ускоритель).
10. Проект УРАЛ-60.
11. УРАЛ-16 (отправлен в Сухуми).
12. УРАЛ-30М.
13. Ускоритель с ВЧКФ для SPL (CERN).

По каждому из перечисленных пунктов можно сделать отдельный доклад. Краткую информацию по каждому из них я дам позже, а сейчас остановлюсь чуть подробнее на первых ускорителях с ВЧКФ и на тех задачах, которые пришлось решать при их создании.

Первая в списке – четырехмэвная модель (УРАЛ-4), сооружение которой началось в 1968 г. Запуск ее состоялся в 1971 г. Из-за перегруженности резонатора емкостью трубок дрейфа рабочая частота ускорителя оказалась значительно ниже проектной (132,5 МГц вместо 148,5 МГц). Эксперименты, проведенные на данной установке, описаны в [19]. Измеренные характеристики пучка ускоренных частиц неплохо соответствовали расчетным. В качестве инжектора частиц использовался резервный форинжектор И-100, который просто подавлял своими габаритами новый ускоритель.

Впоследствии (в 1971 ÷ 1972 г.) в конструкцию резонатора были внесены необходимые изменения и рабочая частота приведена в соответствие с проектной. Инжекция в модернизированный ускоритель производилась уже из НЧУ с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [14, 20]. После повышения выходной энергии до 5 МэВ установка была передана в Харьков.

Именно на период разработки и создания УРАЛ-4 приходится рождение пространственно-однородной квадрупольной фокусировки, которая ныне широко известна во всем мире под аббревиатурой RFQ. Я немного остановлюсь на событиях этого времени.

Надо сказать, что Капчинский поначалу всерьез не воспринимал высокочастотную квадрупольную фокусировку. Нет, он ее не отрицал, но сомневался в ее работоспособности. Во всяком случае, когда я попросил его в 1966 г. быть оппонентом на защите моей кандидатской диссертации, то он сначала согласился, и мы с ним обсуждали различные вопросы, однако потом он отказался под благовидным предлогом. Одним из оппонентов у меня на защите был Наумов Алексей Александрович. И, надо отметить, он хорошо уяснил суть проблемы и впоследствии всегда нас активно поддерживал. А сомневающихся было много.

Постепенно отношение Ильи Михайловича к ВЧКФ стало меняться в лучшую сторону. Так, например, он не стал в 1968 г. возражать против развертывания в отделе инжектора работ по ВЧКФ. Как-то однажды Капчинский зашел в нашу комнату, где Степанов на макете отрабатывал Н-резонатор четырехмэвной модели. Контейнер был снят, резонатор нагружен электродами, которые все были на виду. Это был первый по ходу пучка резонатор. Трубки дрейфа превратились в кольца, и весь канал выглядел сплошь составленным из рогов. Капчинский подошел, посмотрел и удивленно спросил: "А где же трубки дрейфа?" А потом

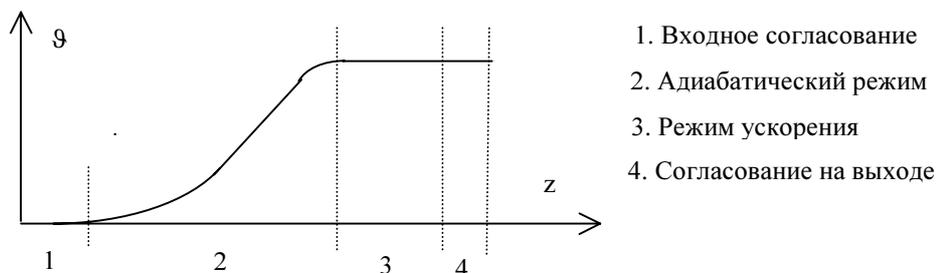
задумчиво: "Выходит, без них вообще можно обойтись..." Я думаю, что именно в этот момент у него возникла идея фокусировки и ускорения в канале четырехпроводной линии. По счастливому стечению обстоятельств у Владимира Александровича в это время появилась идея несжимаемого сгустка. Соединение этих двух основных идей и породило RFQ.

Дальше события развивались стремительно. Основные положения теории были разработаны в течение одного или двух месяцев и опубликованы в знаменитых статьях [21, 22]. Детальная разработка теории изложена сразу в двух препринтах (отдельный препринт издал И.М. Капчинский [23] и отдельно – в соавторстве А.П. Мальцев, В.Б. Степанов и В.А.Тепляков [14]). Одновременно велся расчет параметров полномасштабного ускорителя с ВЧКФ на 30 МэВ в составе: ОЧУ с пространственно-периодической и НЧУ с пространственно-однородной высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Этот проект был доложен на Международной конференции по ускорителям в Цахкадзоре (Армения) в 1969 г. [24]. Столь же стремительно велись работы по созданию действующей модели ускорителя с ПОКФ. Запуск НЧУ с ПОКФ, как самостоятельной установки, состоялся в 1972 г. [20].

Несмотря на то, что все идеи были опубликованы и к нам приезжали специалисты из разных институтов, которые видели наши макеты и действующие ускорители, отношение к ВЧКФ длительное время по-прежнему оставалось скептическим. Разработка ускорителя с ПОКФ велась в ИФВЭ в одиночку на протяжении 8 лет (я уж не говорю об ОЧУ с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой). Никто не решался заняться разработкой ПОКФ. Даже в ИТЭФ практическая реализация этой идеи началась только в 1977 г. Поэтому принципы формирования пучка в RFQ, которые сейчас считаются классическими и выглядят ясными и очевидными, были впервые разработаны и реализованы у нас в ИФВЭ. Здесь я вернусь к вопросам динамики частиц, в частности, к динамике частиц в НЧУ.

### **Вопросы динамики частиц**

#### **Формирование пучка в НЧУ**



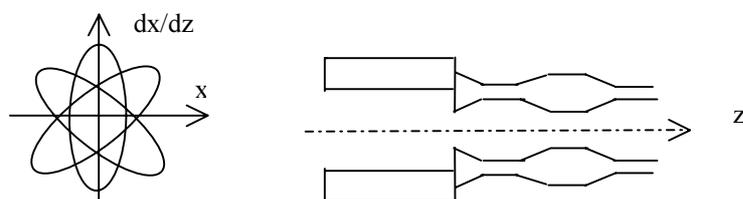
**Рис. 19.** Зависимость эффективности ускорения от  $z$ .

Большой коэффициент захвата в RFQ обусловлен тем, что сгусток формируется в адиабатическом режиме. Начинали мы, естественно, с несжимаемого сгустка. В этом случае фазовая группировка идет исключительно за счет того, что при сохранении пространственной протяженности сгустка его фазовая протяженность уменьшается по мере ускорения и роста  $\beta\lambda$ . В чистом виде реализовать этот режим не удастся: теоретически при этом длина ускорителя стремится к бесконечности. Однако во всех вариантах адиабатического режима главный эффект фазовой группировки сгустка достигается именно за счет его "несжимаемости" по мере роста  $\beta\lambda$ . Фазирующие силы в процессе ускорения нарастают так, чтобы препятствовать расталкивающему действию пространственного заряда. Ограничение по пространственному

заряду наступает не в начале ускорителя а в конце – там, где прекращается адиабатический режим. Синхронная фаза на адиабатическом участке меняется примерно от  $-90^\circ$  до той, которая считается целесообразной для дальнейшего ускорения (порядка  $-30^\circ$ ). Следующий участок RFQ – обычное ускорение с постоянной синхронной фазой.

### *Согласование пучка в НЧУ*

На рис. 19 выделены участки согласования пучка. Это участок согласования стационарного пучка из ионной пушки с акцептансом регулярного канала НЧУ (который зависит от фазы ВЧ-поля) и участок согласования пучка на выходе НЧУ с последующей секцией основной части ускорителя. Для того чтобы согласовать входной пучок, нами был предложен согласователь в виде отрезка четырехпроводной линии со специально подобранными размерами (рис. 20) [25].

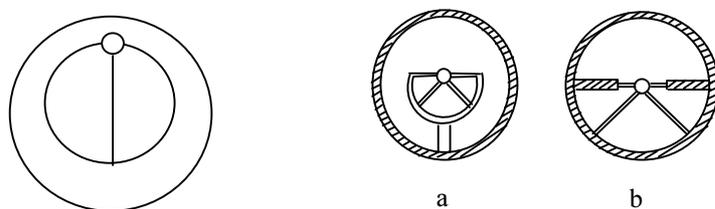


**Рис. 20.** Динамическое согласование входного пучка.

Это был первый согласователь среди различных вариантов согласования на входе RFQ, предложенных в мире. Он всем хорош, но оказался чувствительным к торцевым полям резонатора и был впоследствии заменен на один из вариантов раструба. У раструба электроды на входном конце значительно дальше отодвинуты от оси канала и торцевые поля не мешают процессу согласования. Выходной согласователь – это тоже некий модулированный раструб.

### *Согласование пучка между секциями*

Уж если мы заговорили о согласовании, то следует коснуться вопросов согласования пучка между секциями ускорителя. В первых реализованных у нас Н-резонаторах (в частности, в действующем ускорителе УРАЛ-30) распределение напряжения вдоль резонатора постоянно по длине. Это создает проблемы по продольному согласованию. Темп ускорения падает от начала к концу секции и вследствие этого имеют место скачки частоты продольных колебаний при переходе от секции к секции. При разработке проекта УРАЛ-60 и при реализации части этого проекта УРАЛ-30М были приняты меры, чтобы минимизировать эти скачки. В УРАЛ-30 ножка промежуточного электрода установлена вертикально на линии нулевого потенциала (рис. 21).



Н-резонатор, УРАЛ-30

SH-резонатор (a) и 2К-резонатор (b).

**Рис. 21.** Положение ножки промежуточного электрода.

При этом напряжение между половинами двойного зазора делится пополам. В новых версиях Н-резонатора – в секторном резонаторе (SH-резонатор) и в двухкамерном резонаторе (2К-резонатор) – ножки промежуточных электродов устанавливаются под углом к вертикальной плоскости. Напряжение на квадрупольном зазоре постоянно вдоль секции, а напряжение на ускоряющем зазоре растет от начала к концу секции.

### *Учет сил пространственного заряда*

#### *а) Продольное движение в НЧУ (модель круглого пучка)*

Важной проблемой, которую приходилось решать на протяжении всего времени развития ВЧКФ, была проблема учета сил пространственного заряда. Она была особенно острой, когда компьютерные ресурсы были недостаточны для ее полномасштабного решения. Приходилось изощряться и применять различные модели пучка. Успех определялся тем, насколько удачными оказывались такие модели.

Например в НЧУ наиболее важным было выяснить, как происходит процесс фазовой группировки пучка с учетом сил пространственного заряда. Была разработана модель круглого пучка. Частота продольных колебаний почти на порядок меньше частоты ВЧ-поля (и, значит, частоты изменения формы поперечного сечения пучка). Это позволило свести задачу к однопараметрической одномерной задаче [26]. Продольная компонента кулоновского поля выражается через интеграл по распределению заряда на исследуемом периоде ускорения:

$$E_z \sim (1/R^2) \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho(x) [\text{sign}(z-x) - (z-x)/(R^2 + (z-x)^2)^{1/2}] dx .$$

#### *б) Гауссовская параметризация распределения заряда*

Для основной части ускорителя эффективной оказалась гауссовская параметризация поперечного распределения заряда [27]. Основной вклад в кулоновское поле пучка дает ядро пучка, которое, как показывает практика, имеет нормальное распределение плотности заряда. Поэтому с достаточно высокой достоверностью компоненты поля пространственного заряда можно определять, решая уравнение Пуассона, в котором распределение заряда имеет гауссовское распределение в поперечных сечениях:

$$\Delta(x,y,z) = -\rho(x,y,z), \quad \rho(x,y,z) \sim f(z) \cdot \exp(-x^2/2\sigma_x^2 - y^2/2\sigma_y^2) .$$

При этом удается избежать дробовых эффектов, неизбежных при малом числе модельных частиц.

#### *в) Метод крупных частиц*

В настоящее время мощность компьютеров позволяет избежать дробовых эффектов путем простого увеличения числа частиц (десятки тысяч). Решается уравнение Пуассона

$$\Delta u_c = \rho$$

в декартовой системе с нулевыми значениями кулоновского потенциала на границе (граница задается в виде прямоугольного цилиндра) и условиями периодичности по  $z$ . Применяется метод Фурье:

$$u_c(x,y,z) = \sum_{l,m,n=1}^{\infty} a_{m,n} \sin(m\kappa_l x) \sin(n\kappa_l y) [b_l \sin(l\kappa_l z) + c_l \cos(l\kappa_l z)],$$

$$\rho(x,y,z) = \sum_{l,m,n=1}^{\infty} d_{l,m} \sin(m\kappa_l x) \sin(n\kappa_l y) [e_l \sin(l\kappa_l z) + f_l \cos(l\kappa_l z)],$$

$$\kappa_l = \pi/2R_a, \quad \kappa_l = 2\pi/L_a.$$

## г) Самосогласованные распределения заряда

Обсуждая проблему пространственного заряда, нельзя не упомянуть интересные результаты, полученные при аналитических исследованиях самосогласованных распределений заряда в пучке, которые проводились у нас в отделе на протяжении ряда лет Ю.А. Будановым, например [28, 29].

### Допуски на погрешности канала

#### а) Аналитические оценки

И, наконец, последняя по списку, но далеко не последняя по сложности и по значимости задача – расчет допусков на конструктивные и электрические погрешности канала с ВЧКФ. Даже сейчас, несмотря на возросшую мощность компьютеров, численное моделирование каналов с погрешностями является дорогостоящим и трудоемким, поэтому главный способ оценки допусков, по-прежнему, аналитический (хотя соответствующие расчеты на компьютерах у нас проводились).

В проблеме допусков можно выделить три главные задачи: разработка математической модели канала с погрешностями, расчет влияния погрешностей на динамику частиц (суммирование ошибок), анализ значимости отдельных видов погрешностей.

Различные неточности изготовления и монтажа ускоряющих электродов деформируют высокочастотные квадрупольные линзы. В работе [30] показано, что при малых смещениях элементов канала от штатного положения эти смещения можно представить в виде соответствующих смещений высокочастотных линз.

Просуммировать воздействие погрешностей на частицы можно матричным методом. Для этого строятся матрицы отдельных участков периода фокусировки, с помощью них пересчитываются погрешности на отдельных участках к характерным точкам периода фокусировки (например, к серединам периодов) и затем производится суммирование ошибок уже по периодам фокусировки.

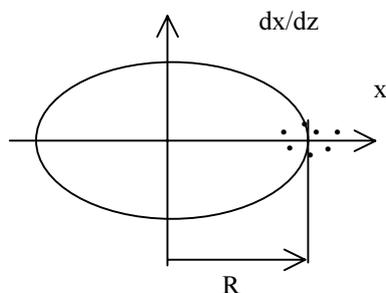
Оценку влияния ошибок канала на характеристики пучка можно производить по-разному в зависимости от задачи. Так, например, прирост среднеквадратичного эмиттанса пучка из-за случайных погрешностей можно оценить по среднеквадратичному приросту амплитуды колебаний отдельной частицы:

$$\langle (\Delta A)^2 \rangle = (N_f / v_{\min}^2) [Q_s \langle s^2 \rangle + Q_{sk} \langle s_k^2 \rangle + Q_\chi \langle \chi^2 \rangle + Q_R \langle (\delta R/R)^2 \rangle + Q_U \langle (\delta U/U)^2 \rangle + Q_{l_h} \langle (\delta l_h / \beta \lambda)^2 \rangle + Q_{l_e} \langle (\delta l_e / \beta \lambda)^2 \rangle + Q_{z_e} \langle (\delta z_e / \beta \lambda)^2 \rangle + Q_q \langle (\delta q)^2 \rangle].$$

Здесь учтены основные виды погрешностей: смещения ВЧ-линз от оси канала  $s$ , смещения концов рогов  $s_k$  (сводятся к наклонам линз), повороты линз вокруг оси ускорителя  $\chi$ , погрешности радиуса апертуры  $\delta R$ , ошибки в длинах рогов  $\delta l_h$ , длинах электродов  $\delta l_e$ ,

продольных координатах электродов  $\delta z_e$ , и наконец, электрические погрешности – ошибки в распределении напряжения по периодам ускорения  $\delta U$  и ошибки в коэффициенте деления напряжения в двойном зазоре  $\delta q$ . Коэффициенты  $Q_i$  перед соответствующими усредненными квадратами конкретных погрешностей имеют весьма громоздкий вид [11].

Другой способ оценки влияния погрешностей – оценка роста ореола пучка. Эту оценку можно сделать по вызванному ошибками среднеквадратичному приросту радиуса пучка [31] (рис. 22).



**Рис. 22.** Случайный разброс точек выхода частиц на границу пучка.

Расчет прироста радиуса пучка в [31] ведется методом теории возмущений. Вместо матриц используются уравнения гладкого приближения. Из сгустка выбираются частицы, которые в конце периода фокусировки должны выйти на границу. Рассчитывается эллипс рассеяния точек выхода, вызванный погрешностями канала.

#### *б) Расчет допусков на компьютере*

В ИФВЭ проводилось исследование на компьютере влияния погрешностей канала НЧУ на характеристики пучка ускоренных частиц. Анализ полученных результатов подтвердил справедливость аналитических оценок влияния погрешностей на пучок. Подобные исследования проводились и для ОЧУ [32]. Был проведен корреляционный анализ погрешностей. Выявлены наиболее опасные виды погрешностей. (Например, к таким относятся повороты ВЧ-линз вокруг оси ускорителя.)

Общий вывод, который можно сделать на основе анализа допусков в ускорителе с ВЧКФ: допуски в таком ускорителе ничуть не жестче, чем в ускорителе Альвареца с такими же параметрами фокусировки и требованиями к пучку.

### ***Краткий обзор ускорителей с ВЧКФ, разработанных и созданных в ИФВЭ***

В заключение я, как и обещал, кратко прокомментирую каждый из пунктов приведенного выше списка ускорителей с ВЧКФ, разрабатывавшихся в ИФВЭ.

В 1973 г. был разработан проект УРАЛ-30 – инжектора в бустер протонного синхротрона У-70 и началось его изготовление в мастерских ИФВЭ. Изготовление секций ускорителя велось одновременно с разработкой новых систем (таких, например, как система автокомпенсации возмущений поля в резонаторе), с завершением экспериментов на макетах и с отработкой технологических вопросов. Первая часть ускорителя до 16 МэВ была запущена в 1975 г. [33], физический пуск ускорителя в целом состоялся в 1977 г. [34]. Размещался УРАЛ-30 во временном помещении (здание бустера еще не было готово) и использовался как макет для изучения особенностей ускорителя нового типа и для выявления и устранения

слабых мест в его системах. Особую ценность составлял набор статистики долговременной электрической прочности резонаторов. На основе полученных данных канал ускорителя был пересчитан на более низкую напряженность поля и в 1982 г. изготовлены новые электроды. В 1983 г. УРАЛ-30 был сдан в эксплуатацию для наладки бустера. С 1985 г. и по сей день УРАЛ-30 работает в составе ускорительного комплекса ИФВЭ. Результаты исследования его эксплуатационных характеристик описаны в ряде работ, например [35].

Следующий ускоритель в списке – УРАЛ-7. Это просто повторение соответствующего участка УРАЛ-30. Ни принципиальных, ни конструктивных особенностей он не имеет. Точно так же не имеет каких-либо особенностей ускоритель УРАЛ-16. Оба ускорителя отправлены в Сухуми (в разное время).

В конце семидесятых годов в ОИЯИ разрабатывался проект мощного нейтронного генератора на основе суперциклотрона [36]. Задумывался стопроцентный вывод ускоренного пучка из циклотрона на основе разделения выходных орбит. Для этого требовалось иметь качественный пучок, начиная с момента инжекции. Особенно жесткими были требования к величине продольного фазового объема. Нами были проведены детальные расчеты физических параметров инжектора с ВЧКФ [37] для дейтронного циклотронного комплекса [38], из которых следовало, что инжектор с ВЧКФ является наилучшим вариантом для осуществления принципа разделенных орбит.

На следующих четырех установках я подробно останавливаться не буду, так как на них отрабатывались, в основном, различные технические вопросы, например вопросы разработки линейных ускорителей ионов с ВЧКФ для промышленных целей [39].

В связи с разработкой проекта УНК потребовалось создать проект нового инжектора в бустер с повышенной энергией частиц и более высоким качеством пучка. Такой проект был разработан (УРАЛ-60). Но так как работы по УНК были приостановлены, то реализуется только часть этого проекта (УРАЛ-30М) для замены действующего инжектора в бустер, основные системы которого за двадцать лет работы устарели морально и физически и нуждаются в полной замене. Об отличиях продольного согласования пучка между секциями в старом и новом ускорителях я уже говорил. Есть отличия и в поперечных параметрах канала. В новом ускорителе принята более однородная структура фокусировки: и в НЧУ и в ОЧУ используется структура ФД. Снижена максимальная величина напряженности поля на поверхности электродов.

В настоящее время ведется разработка прототипа линейного ускорителя с ВЧКФ для проекта сверхпроводящего линейного ускорителя SPL CERN. Прототип представляет собой секцию от 3 до 11 МэВ (первая секция ускорителя на 40 МэВ). Рабочая частота (352,2 МГц) более чем в два раза выше частоты, на которой работают ускорители с ВЧКФ в ИФВЭ. Намного выше тепловые нагрузки (скважность ~ 6). Жесткие требования предъявляются к качеству пучка. Создание прототипа осуществляется в кооперации с ВНИИЭФ (г. Саров).

## *Литература*

1. Г.М. Анисимов, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1963, № 1, с. 21.
2. Д.В. Каретников и др. Линейные ускорители ионов. М.: "Атомиздат", 1962.
3. А.П. Мальцев, Э.А. Зотова, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1964, № 4, с. 20.
4. А.П. Мальцев, Э.А. Зотова, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1965, № 7, с. 17.
5. В.А. Тепляков и др. ПТЭ, 1965, № 4, с. 26.
6. А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1965, № 4, с. 29.
7. В.А. Тепляков. ПТЭ, 1964, № 6, с. 24.
8. В.А. Тепляков, В.Б. Степанов. РЭ, 1968, № 1, с. 1965.
9. В.А. Тепляков и др. БИ, 1967, № 19, а.с. № 202362.
10. А.П. Мальцев, С.М. Ермаков, В.А. Тепляков. АЭ, 1967, т. 23, вып. 3, с. 195.
11. А.П. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Препринт ИФВЭ 69-2, Серпухов, 1969.

12. В.А. Зенин и др. – Труды 8 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982, изд. Дубна, 1983, т.2, с. 77.
13. Г.Н. Дерновой и др. Препринт ИФВЭ 75-1, Серпухов, 1975.
14. А.П. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков. Препринт ИФВЭ 71-116, Серпухов, 1971.
15. А.В. Жеребцов. Препринт ИФВЭ 81-173, Серпухов, 1981.
16. А. Zherebtsov. – Proceedings of Workshop BDO-96, p. 293.
17. А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев. ВАНТ, серия "Техника физического эксперимента", Харьков, 1979, вып. 2 (4), с. 68.
18. А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. Препринт ИФВЭ 90-29, Протвино, 1980.
19. С.А. Ильевский и др. АЭ, 1973, т. 34, вып. 1, с.56.
20. Н.И. Голосай и др. АЭ, 1975, т. 39, вып.2, с. 123.
21. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1970, № 2, с. 19.
22. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1970, № 4, с. 17.
23. И.М. Капчинский. Препринты ИФВЭ 72-29 (Часть 1) и 72-30 (Часть 2), Серпухов, 1972.
24. И.М. Капчинский, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков. – Труды 7 Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, изд. АН Армянской ССР, Ереван, 1970, т.1, с. 153.
25. Г.Н. Дерновой, А.П. Мальцев. ЖТФ, 1982, т. 52, в. 6, с.1209; Препринт ИФВЭ 80-48, Серпухов, 1980.
26. Ю.А. Буданов, А.П. Мальцев. Препринт ИФВЭ 83-9, Серпухов, 1983.
27. Ю.А. Буданов, А.В. Козлов, А.П. Мальцев. ВАНТ, серия "Техника физического эксперимента", вып. 3(24), М., 1985, с. 48.
28. Ю.А. Буданов. ЖТФ, 1984, т. 54, вып. 6, с. 1068.
29. Ю. А. Буданов. – Труды 17 Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000, с.130.
30. А.П. Мальцев. АЭ, 1966, т.21, вып. 4, с. 295.
31. А.П. Мальцев, Г.А. Шулаев. ЖТФ, 1982, т. 52, вып. 8, с.1604.
32. Г.А. Шулаев. Препринт ИФВЭ 89-115, Серпухов, 1989.
33. Б.М. Горшков и др. ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 11, с. 2328.
34. А.А. Егоров и др. Препринт ИФВЭ 79-151, Серпухов, 1979.
35. В.А. Зенин и др. – Труды 13 Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, Новосибирск, "Наука", 1987, т. 1, с. 312.
36. А.А. Глазов и др. – Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., "Наука", 1977, т. 1, с. 123.
37. Ю.А. Буданов, А.В. Козлов, А.П. Мальцев. Препринт ИФВЭ 90-126, 1990.
38. А.А. Глазов и др. – Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий, Киев, "Наукова думка", 1982, с.182.
39. А.А. Боровиков и др. – Труды 12 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990, изд. Дубна, 1992, т. 2, с. 120.

**В.Б. Степанов**

## **Вопросы создания ускоряющих структур с ВЧК-фокусировкой в ИФВЭ**

В предыдущем докладе А.П. Мальцев рассказал о развитии расчетных методов, без которых невозможна реализация пространственно-однородной и пространственно-периодической фокусировки в ускоряющих структурах. Под термином ускоряющая структура для названных видов фокусировки понимается совокупность ускоряюще-фокусирующего канала и резонатора, обеспечивающего заданное высокое ВЧ-напряжение на ускоряющих электродах канала. Ускоряющая структура преобразует энергию ВЧ-генератора в энергию сгустков пучка ионов при их ускорении и сжатии по фазам и энергетическому спектру.

Как показал опыт создания и эксплуатации ускорителя с ВЧК-фокусировкой (УРАЛ-30), о достаточности качества работы ускоряющей системы, можно судить по следующему набору наблюдаемых параметров в процессе эксплуатации:

- настройка на рабочую частоту с высокой точностью ее поддержания (в нашем случае это  $148505 \pm 1,5$  кГц);
- поддержание амплитуды ВЧ-напряжения в секциях в диапазоне величин 130–350 кВ с точностью  $\pm 1\%$ ;
- поддержание частоты пробоев на номинальном уровне менее 0,05%;
- поддержание давления внутри секций не более  $5 \cdot 10^{-8}$  Торр при ускорении ионов  $H^-$ ;
- поддержание минимального уровня рентгеновского излучения, как индикатора относительной чистоты поверхности электродов.

В наборе наблюдаемых параметров ускоряющей структуры опущено качество пучка, поскольку оно является характеристикой всего ускорителя и в значительной мере зависит от ионной пушки. Чтобы эти требования выполнялись, при создании ускоряющей структуры необходимо решить большой круг вопросов, а именно:

- юстировка, геодезия;
- пробой, электронная нагрузка;
- макеты; расчетные модели;
- подстройка частоты; вакуум; ввод ВЧ-мощности;
- рентгеновское излучение;
- стабилизация температуры воды;
- конструкция, технология; термомодеформации;
- радиотехнические измерения.

Из приведенного перечня следует, что при создании ускоряющей структуры нет главных и второстепенных вопросов. Все они должны быть решены на высоком научно-техническом уровне. При недостатке творческих исполнителей принцип равенства вопросов нарушается, что-то приходится делать сегодня и многое откладывать на потом. Неполное знание наказывается ошибками в процессе конструирования и изготовления, которые необходимо как-то исправлять потом во время настройки, что является достаточно болезненным процессом. При изложении перечисленных вопросов снова нарушается принцип их равенства. Изложение я начну с юстировки, и далее по списку.

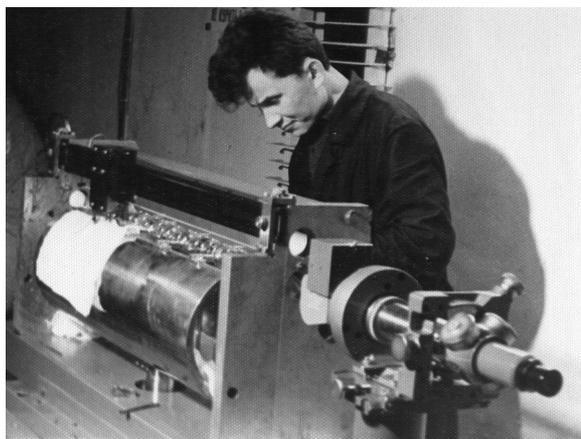
### ***Юстировка ускоряющих электродов в ускорителе с ВЧК-фокусировкой***

Из доклада А.П. Мальцева можно понять, что допуски на размещение электродов в приосевом пространстве такие же, как и в ускорителе Альвареца. У нас это ускоритель И-100, габариты которого в 5 раз больше габаритов ускорителя с ВЧК-фокусировкой. При монтаже И-100 группой Е.А. Хеседа применялись маятниковая мишень и параллельный створ (фото 1).



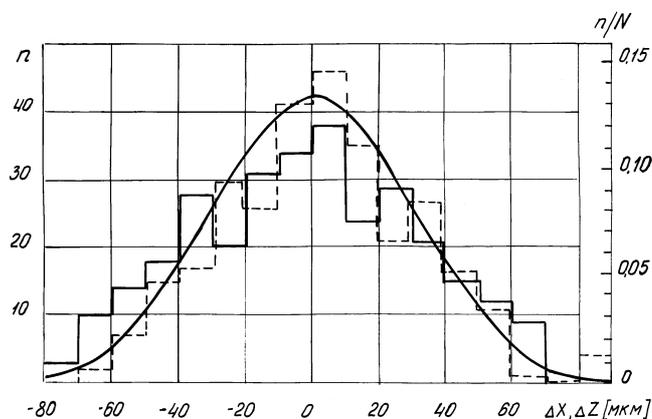
**Фото 1.** Монтаж электродов И-100.

Такой вариант для нас казался неприемлемым из-за малой жесткости электродов (особенно промежуточного) и их малости в сравнении с трубками дрейфа И-100. На этом этапе было решено работать с прямым створом, когда ось микротелескопа совмещается с осью ускоряющего канала путем постановки индикаторной мишени с малым центральным отверстием в апертуру ускоряющих электродов. Допуск на апертуру электродов выдерживался  $+0,02$  мм. Оказалось, что глаз очень чувствителен к делению изображения центрального отверстия мишени в микротелескопе на четыре сектора с помощью креста, который перемещается лимбами микротелескопа через 20 микрометров (одно деление лимба). Был создан специальный стенд (фото 2), на котором направляющая и микротелескоп позволяли каретке с установленным на ней электродом двигаться по оси микротелескопа строго параллельно направляющей.



**Фото 2.** Специальный стенд юстировки электродов.

Для фиксации продольной координаты использовалась натянутая компарированная лента рулетки. Изображение штрихов ленты и торца электродов с помощью двух пентапризм передавалось на второй вход в микротелескопе. В микротелескопе поочередно можно видеть или центральное отверстие мишени, или продольную координату торца электрода. Когда электрод выставлен в заданном положении и к его ножке подведен кронштейн с гарантированным зазором (кронштейн укреплен на краю резонатора), остается только чем-либо залить этот зазор и дать "схватиться" электроду с кронштейном без деформаций. На этом этапе в качестве заливки был выбран сплав Вуда при  $t^{\circ} \approx 100^{\circ} \text{C}$ . (Температура затвердевания  $60^{\circ} \text{C}$ .) Результаты исполнительной съемки представлены на рис. 1. С помощью такой методики мы отюстировали несколько макетных ускоряющих систем и провели изучение ускоренных пучков. Постепенно по мере появления точных станков с ЧПУ мы перешли на механические способы монтажа электродов. При этом повысилась надежность крепления электродов, особенно при повышенных тепловых нагрузках. Но точность монтажа осталась прежней.



**Рис. 1.** Количество электродов в зависимости от отклонения их центра от оси.

### **Электрическая прочность. Электронная нагрузка**

Электрическая прочность вакуумного зазора изучается десятилетиями, имеется большое количество экспериментальных работ и несколько монографий (И.Н. Сливков, Р. Латам, Г.А. Месяц). На рис. 2 сделана попытка собрать в обозримом виде результаты пробойных испытаний. Видно, что большинство точек лежит выше линии, определяемой критерием Килпатрика. Экспериментальные точки, полученные на различных установках мира, имеют достаточно большой разброс. В настоящее время нет договоренности о правилах фиксации величины напряженности:

- по появлению любого малого тока в зазоре,
- по достижению уровня первого пробоя,
- по серии пробоев,
- или как-нибудь еще.

Кроме того, нет стандарта на величину запасенной энергии. При большой ее величине — велики разрушения и время на ликвидацию разрушений. При некоторых малых величинах запасенной энергии пробой выглаживают поверхность, повышая электропрочность.

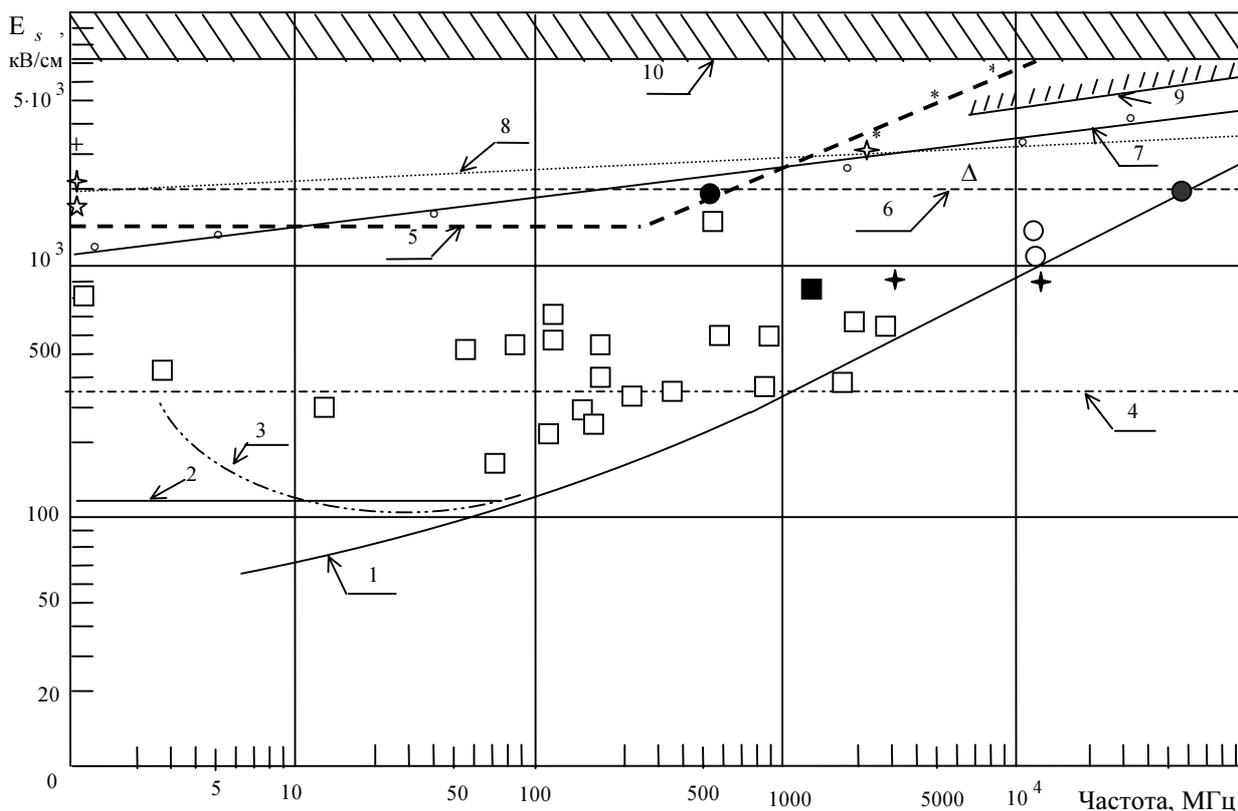


Рис. 2. Зависимость электрической прочности от частоты.

1 – W.D. Kilpatrick; 2 – И.М. Капчинский; 3 – W. Peter et al.; 4 – граница эмиссионных явлений, заметных для генератора; 5 – Low-Wang (\*); 6 – Мо, 2003 г. (●); 7 – VARIAN (ε); 8 – Япония (✦, 130 ГГц, импульсный режим, 1994 г.); 9 – граница поверхностного нагрева (P.V. Palmer, D. Prusnitz, M. Tinger); 10 – предел механической прочности меди (И.Н. Сливков); □ – данные по электропрочности из разных источников; ■ – Н.Р., 1995 г.,  $\tau = 150$  мкс; + – Япония (1992 г., непрерывный режим); ○ – Low-Wang, 1992 г.; Δ – В.Е. Балакин; ☆ – МИФИ, 1972 г.; + – А.С. Богомолов.

Отметим на этом рисунке две самые верхние точки, взятые из работ Лоу и Вонга (кривая 5). После наложения их на рисунок, стало ясно, что их там не должно быть. Детальное знакомство со способом их определения выявило, что авторы используют собственную добротность  $Q_0$  ускоряющей структуры, а не нагруженную, которая меньше  $Q_0$ . В испытаниях она проявляется из-за электронной нагрузки, которая в экспериментах представлена большим рентгеновским излучением. В 1991 году Лоу посетил Протвино и участвовал в работе совещания по линейным коллайдерам. Он признал: "С возрастом все падает, и кривая тоже". Подправить критерий Килпатрика пытались И.М. Капчинский и W. Peter et al. Но сейчас принято (не у всех) считать кривую Килпатрика за единицу и говорить во сколько раз напряженность превышает этот критерий ( $2 \div 3$  Кр).

Наш путь освоения высоких напряженностей поля на поверхности проходил от больших величин к меньшим. Этот путь отражен в таблице, из которой видно, что при больших напряженностях велика частота пробоев. При заметно разных  $E_s$  в ПОКФ и ППКФ частота пробоев одинакова, что очень долго не удавалось объяснить. Кроме того, было замечено, что

после определенного срока фронты ВЧ-импульсов при больших уровнях уменьшаются и от генераторов требуется большая мощность.

Измерение полосы пропускания нагруженного резонатора показало: с ростом мощности в ускоряющей системе полоса расширяется. Это означает появление дополнительного расхода ВЧ-мощности, которая тратится на ускорение электронов, эмитируемых с поверхности ускоряющих электродов. Ток эмиссии сам по себе невелик по сравнению с токами на поверхности ускоряющей системы, но из-за высокого ВЧ-напряжения забираемая им мощность может составить заметную долю, которая в конечном счете создает дополнительную тепловую нагрузку на элементы ускоряющей системы. Так в НЧУ произошло удвоение номинальной мощности. Выяснение причин такой большой электронной нагрузки проводилось на трех последних установках, которые были собраны на индиевых уплотнениях (без резины). В них создавалось давление меньше  $5 \cdot 10^{-8}$  Торр. После ввода мощности измерялось распределение рентгеновского излучения вдоль ускоряющей структуры, которое было близко к равномерному и коррелировалось с  $E_{s \max}$  на поверхностях электродов. По мере работы с пучком, распределение рентгеновского излучения сильнее возрастало в начале ускоряющей системы, где напряженность на поверхности минимальна.

**Таблица.** Зависимость электропрочности установок с ПОКФ и ППКФ от установки.

Параметры	Литература	$E_s$ , [кВ/см]		$\Delta W$ , [МэВ]		Частота пробоев, %
		ПОКФ	ППКФ	ПОКФ	ППКФ	
Установка						
УРАЛ-30 (1977 г.)	-	354	480	0,1÷2,0	2,0÷30,0	10
УРАЛ-30 (1980 г.)	-	276	380	0,1÷2,0	2,0÷30,0	1
УРАЛ-30 (с 1989 г.)	[1]	225	380	0,1÷2,0	2,0÷9,0	0,02
ЛУСИ (ПЛ-10)	[7]	225	350	0,1÷2,0	2,0÷10	0,05
ДУ-1	[8]	234	-	0,04÷1,0	-	0,02
НЧУ-1,8	[9]	256	-	0,1÷1,8	-	-

Если удавалось очистить электроды от продуктов работы ионной пушки (ИП), то ситуация повторялась. Таким образом, было доказано, что в НЧУ (с ПОКФ) электронная эмиссия возрастает из-за загрязнений продуктами работы ИП. Чистые электроды в НЧУ держат  $E_{s \max} \approx 400$  кВ/см.

В ППКФ электронная нагрузка обязана большой  $E_{s \max}$ , качеству обработки поверхности и частым вскрытиям ускоряющей системы. Было установлено, что в ЛУСИ (с ППКФ)  $E_{s \max} = 350$  кВ/см без электронной нагрузки, тогда как в ПОКФ при  $E_{s \max} = 225$  кВ/см электронная нагрузка была большой.

### Макеты

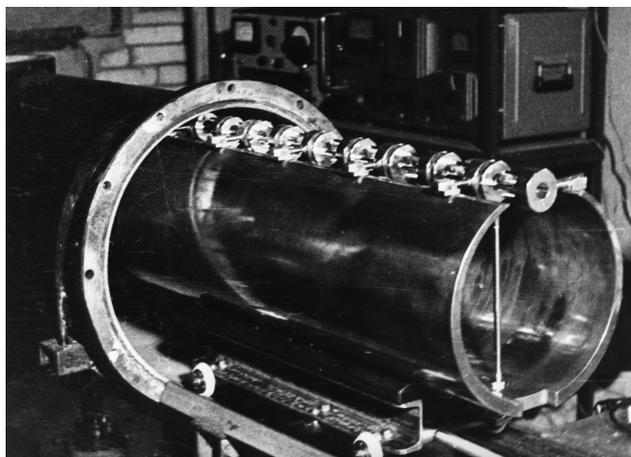
Под этим заголовком, я понимаю создание множества металлических упрощенных конструкций для уточнения: частотных зависимостей, добротности, распределения поля, конструктивных и технологических особенностей. Сегодня я попробую показать две линии макетирования:

- НЧУ или ПОКФ;
- ОЧУ или ППКФ.

Технологически по ходу пучка они расположены именно так. Но исторически мы начинали в обратной последовательности.

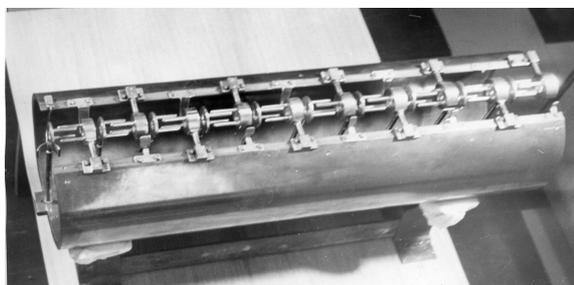
### *Первые макеты с ППКФ*

В 1968 г. мы начали проектировать секцию ОЧУ с целью испытать ее с пучком от резервного форинжектора. Сохранились калька теоретического чертежа этого ускоряюще-фокусирующего канала и фото монтажа одной из трех секций этого ускорителя (фото 3).



**Фото 3.** Элемент первой секции с ППКФ.

Емкость квадрупольного зазора здесь уравнивалось емкостью аксиально-симметричного зазора. По мере роста скорости частиц растущая емкость квадрупольного зазора компенсировалась за счет увеличения внешнего диаметра электродов в аксиально-симметричном зазоре (фото 4).



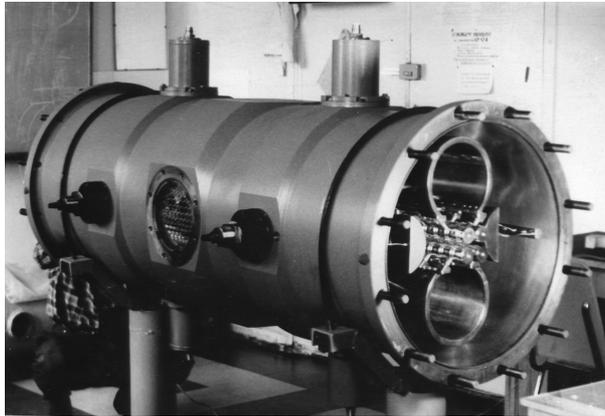
**Фото 4.** Отрезок резонатора УРАЛ-4 с электродами.

Так что, к концу секции зазоры между электродами и краями (бортами) резонатора становились заметно малыми и могли пробиваться. В таком виде секцию удалось собрать и настроить нужное распределение поля на частоте 132,5 МГц. На эту частоту удалось перестроить генератор в наладочной системе ВЧ-питания И-100 и кабелем подать ВЧ-мощность на резервный форинжектор. С нетерпением ждали изображения ускоренного пучка на экране осциллографа в виде прямоугольного импульса с амплитудой 20 мА. Получили 20 мА в течение первой микросекунды, а остальные 20 мкс ток не превышал 4 мА. Причина – резонанс ножки промежуточного электрода. С этого момента и до настоящего времени конструкция ножки промежуточного электрода претерпела множественную модификацию. Второй вариант ножки промежуточного электрода содержал сопротивление из мастики марки МОУ. Ускоренный ток стал полным, но сами сопротивления быстро сгорали в месте

контакта с мастикой. Эти сопротивления были заменены на проволочные, которые в разных вариантах живут и в наши дни.

### *Первые макеты с ПОКФ*

На фото 5 показан первый макет с ПОКФ.



**Фото 5.** Первый макет с ПОКФ.

Электроды в первом макете имели средний диаметр равный 30 мм. Такой большой диаметр электродов обеспечивал линейность поля по радиусу апертуры канала, близкую к той, что дают идеальные гиперболические электроды. Электроды крепились к 2Н-резонатору. Макет с гладкими электродами был уже испытан и было видно, что пучок транспортируется без потерь в квадрупольном канале даже при очень малых напряжениях (примерно начиная с  $0,1 U_{ном}$ ). Макет для ускорения пучка от 0,1 до 0,659 МэВ достаточно быстро заработал, но не хотел выдавать ток на выходе более 20 мА, сколько бы ему не давали на вход. Так мы на практике впервые познакомились с параметрическим резонансом, который вскоре обнаружили и расчетным способом.

Электроды пересчитали заново. Они уменьшились в диаметре, а форма аппроксимации пространственной синусоиды из ступенчатой перешла в трапециевидную. В таком виде НЧУ заработала сначала самостоятельно, а затем в составе ускорителя с выходной энергией 4 МэВ.

### *Четырехкамерный резонатор*

И.М. Капчинский (он с 1967 года работал начальником отдела), заканчивая трудоемкие расчеты длинного четырехкамерного резонатора в 1969 г., попросил сделать макет для проверки расчетов на частоте 148,5 МГц. Он выдал поперечные размеры, а о продольных мы договорились исходя из технических возможностей местных мастерских и наличия материала (длина  $\approx 0,5$  метра). После изготовления и сборки этого резонатора в присутствии И.М. Капчинского была сделана запитка резонатора от измерительного генератора. Кто знал Илью Михайловича, сказал бы, что он был в глубоком шоке из-за 30% несовпадения частот – расчетной и измеренной. Где-то через год удалось разобраться с влиянием торцов и необходимостью постановки связок для удаления дипольного типа колебаний.

Несмотря на успехи с 2Н-резонатором и на трудности, связанные с 4К-резонатором, мы с последним продолжали работать. На экскурсии О.К. Беляев может познакомить вас с шедевром макетного искусства – с четырехкамерным резонатором длиной 2 метра из фольги и

пенопласта. На нем нам удалось настроить равномерное поле  $\pm 1\%$  при гладких электродах. Однако на нашей частоте мы не смогли справиться с технологией изготовления рабочей секции. Удалось только изготовить кокиль для отливок четырехкамерного резонатора и получить отливки с завода "Молния". Обработка же отливок похоронила весь энтузиазм технологов и станочников. Пришлось отказаться от 4К-резонатора в пользу 2Н-резонатора. За рубежом, тем не менее, конструкции четырехкамерного резонатора получили путевку в жизнь (на высоких частотах  $200 \div 400$  МГц).

### *Расчетные модели*

Исследования ускоряющих структур, работающих на волнах аналогичных Н-волнам, проводились еще в конце пятидесятих годов прошлого столетия, например, П.М. Зейдлицем и В.А. Ямницким. В своей работе (АЭ, 1961, т.10, в.5) они отметили: "В 1947-1957 гг. линейные ускоряющие системы, использующие колебания, аналогичные Н-волнам, ввиду невозможности их точного расчета и необходимости длительного экспериментального подбора были необоснованно отвергнуты. Проведенные нами систематические измерения показали существенное преимущество объемных резонаторов, работающих на волнах указанного типа, перед широко употребляемыми резонаторами, работающими на волне  $E_{010}$ ". Заметим, что тогда это были электроды в виде обычных трубок дрейфа, т.е. без промежуточного электрода делящего зазор на аксиально-симметричную и квадрупольную части.

Применение двойного зазора существенно осложнило ситуацию с расчетами, в отличие от резонаторов  $E_{010}$ , где граничные условия относительно легко позволяют выделить расчетный отсек (период ускорения). Поэтому нами был сделан акцент на экспериментальное изучение Н-резонатора с электродами. Удалось показать, что подобрав по определенной методике размеры торцевых областей резонатора, мы получаем резонатор, у которого рабочая частота и распределение электрического поля в плоском зазоре не зависят от длины резонатора. Плоский зазор в Н-резонаторе эквивалентен по частоте настройки резонатору с реальными электродами. В таком резонаторе подробно изучались и менялись двойные зазоры.

Параллельно мы пытались развивать и расчетные методы. Так модель колебательного контура с трансформатором, имитирующим распределенность параметров контура, позволили оценить параметры Н-резонатора и сравнить его шунтовое сопротивление с резонатором  $E_{010}$  в диапазоне скоростей ионов. Все трудности с точным расчетом частоты и других параметров были переложены на  $C_g$  – емкость, эквивалентную емкости электродов и на  $C_0$  – собственную емкость длинного резонатора.

Появление двумерных программ (SUPERFISH, PRUD-0) позволило расширить диапазон исследований, но экспериментальная подгонка осталась.

Ситуация существенно изменилась с появлением трехмерных программ MWS и HFSS. Освоение их заняло около трех лет, но зато появилась уверенность, что результаты расчетов близки к реальности. Программы позволяют использовать в качестве граничных условий магнитные и электрические стенки, а также их комбинации. Это очень важно для сложной геометрии ускоряющей структуры.

На этом разделе придется прервать выступление – кончилось время семинара. Но несколько слов о последнем разделе (радиотехнические измерения) я скажу. Этот раздел продолжает успешно развиваться, позволяя настраивать ускорители с ВЧКФ. Процедура настройки весьма точная, а значит, и трудная для краткого изложения. К тому же, появилось много нового материала. К сожалению, он по объему превышает возможности данного семинара.

*Рукопись поступила 28 марта 2006 года.*

В.А. Тепляков, А.П. Мальцев, В.Б. Степанов.  
Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения  
и развития).

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word-97.

Редактор Н.В. Ежела.

---

Подписано к печати	30.04.2006 г.	Формат 60×84/8.
Офсетная печать. Печ. л.	4,15. Уч.-изд.л. 3,65.	Тираж 80. Заказ 52 .
Индекс 3649.	ЛР N ° 020498 от 17.04.97.	

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

**ПРЕПРИНТ 2006–5, ИФВЭ, 2006**

---