

**А.С.Алимов, А.А.Ветров, Б.С.Ишханов, А.А.Косарев,**

**Н.И.Пахомов, О.В.Чубаров, В.И.Шведунов**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ВНУТРЕННИМИ  
ЯЧЕЙКАМИ СВЯЗИ ДЛЯ ДВУХСТОРОННЕГО РАЗРЕЗНОГО  
МИКРОТРОНА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1.5 ГэВ.**

**Препринт НИИЯФ МГУ 2004-15/754**

**Московский Государственный Университет  
им. М.В. Ломоносова**

---

**Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына**

**А.С.Алимов, А.А.Ветров, Б.С.Ишханов, А.А.Косарев,  
Н.И.Пахомов, О.В.Чубаров, В.И.Шведунов**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ВНУТРЕННИМИ  
ЯЧЕЙКАМИ СВЯЗИ ДЛЯ ДВУХСТОРОННЕГО РАЗРЕЗНОГО  
МИКРОТРОНА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1.5 ГэВ.**

**Препринт НИИЯФ МГУ 2004-15/754**

**УДК 384.63621.**

**A.S.Alimov, A.A.Vetrov, B.S.Ishkhanov, A.A.Kosarev, N.I.Pakhomov,  
O.V.Chubarov, V.I.Shvedunov**

E-mail: [alimov@depni.npi.msu.su](mailto:alimov@depni.npi.msu.su)

Preprint SINP MSU 2004-15/754

**NUMERICAL SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ON-  
AXIS COUPLED ACCELERATING STRUCTURE FOR DOUBLE-SIDED RACE-TRACK  
MICROTRON WITH 1.5 GeV ENERGY.**

Abstract

In the present work we made numerical simulations of the biperiodic on-axis coupled accelerating structure at 2450 MHz for the project of the Harmonic Double-Sided CW Race-Track Microtron at the energy 1.5 GeV, being constructed in the Institute of Nuclear Physics of the Mainz University (Germany). On the basis of the calculations the test cells have been manufactured, used for developing the methods of measuring and tuning the structure cells. The final cells geometry has been established.

Аннотация

В настоящей работе проведено численное моделирование бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи на частоту 2450 МГц для проекта двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 1.5 ГэВ, строящегося в Институте ядерной физики Университета г. Майнц (Германия). На основании расчетов изготовлены тестовые ячейки структуры, на которых апробированы и отлажены методики измерения и настройки ускоряющей структуры, определены окончательные геометрические размеры структуры.

©Алимов А.С. и др., 2004

©НИИЯФ МГУ, 2004

## 1. Введение.

В Институте ядерной физики Университета г. Майнц, Германия, в течение 14 лет успешно функционирует трехкаскадный разрезной микротрон непрерывного действия МАМІ с максимальной энергией 855 МэВ и средним током пучка 100 мкА, обеспечивая исключительно высокое качество пучка и, соответственно, высокое качество проводимых на ускорителе фундаментальных физических экспериментов [1,2]. Высокое качество пучка ускорителя достигается развитой системой диагностики пучка, в основе которой лежат резонаторные датчики положения, тока и фазы пучка электронов [3], разветвленная система контроля и управления [4], а также датчики радиационного контроля, расположенные вдоль всего ускорителя.

В конце 90-х гг. после тщательного анализа и расчетов [5-7] было принято решение увеличить энергию ускорителя до 1.5 ГэВ добавлением четвертого каскада ускорения – двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия, блок-схема которого показана на Рис. 1 [7].

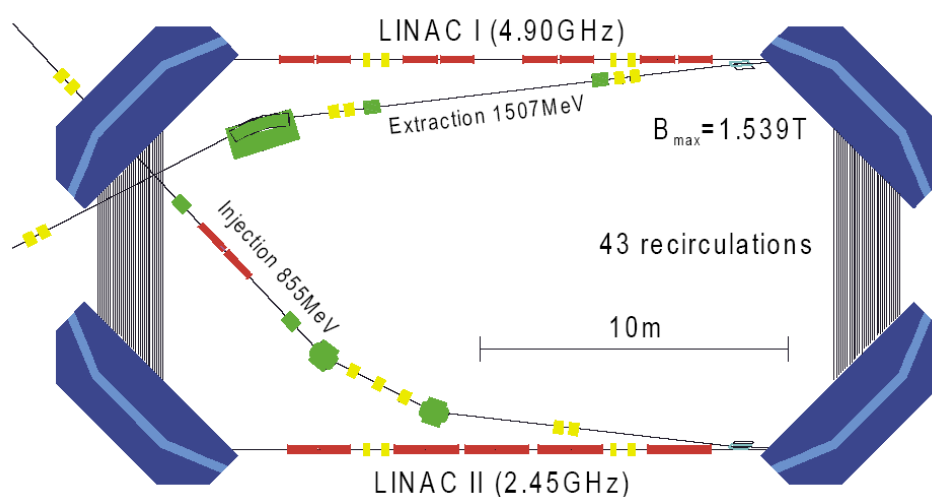


Рис. 1. Блок-схема двухстороннего разрезного микротрона МАМІ-С [7].

Основными компонентами двухстороннего разрезного микротрона являются две пары  $90^0$  поворотных магнита и два линейных ускорителя, расположенных между ними (Рис. 1). Одной из основных особенностей этого микротрона является то, что

для обеспечения более высокой продольной стабильности пучка один линейный ускоритель работает на частоте 2450 МГц, а второй – на первой гармонике, 4900 МГц.

Разработка и создание ускоряющих секций на рабочую частоту 2450 МГц были предложены НИИЯФ МГУ.

## **2. Проектные характеристики ускоряющей секции для двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 1.5 ГэВ.**

Проектные характеристики ускоряющих секций с частотой 2450 МГц для двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия были определены, исходя из предыдущего опыта работы ускоряющих секций трехкаскадного разрезного микротрона непрерывного действия МАМИ [19,20]

1). Ускоряющие секции на частоте 2450 МГц должны быть реализованы на основе бипериодической структуры с внутренними ячейками связи [8-12].

2). Каждая ускоряющая секция имеет длину 207 см и состоит из 33 ускоряющих ячеек и 32 ячеек связи (иногда для сокращения записи мы будем обозначать их УЯ и ЯС, соответственно). Центральная ускоряющая ячейка является узлом ввода мощности (УВМ). Схематический чертеж секции показан на Рис. 2.

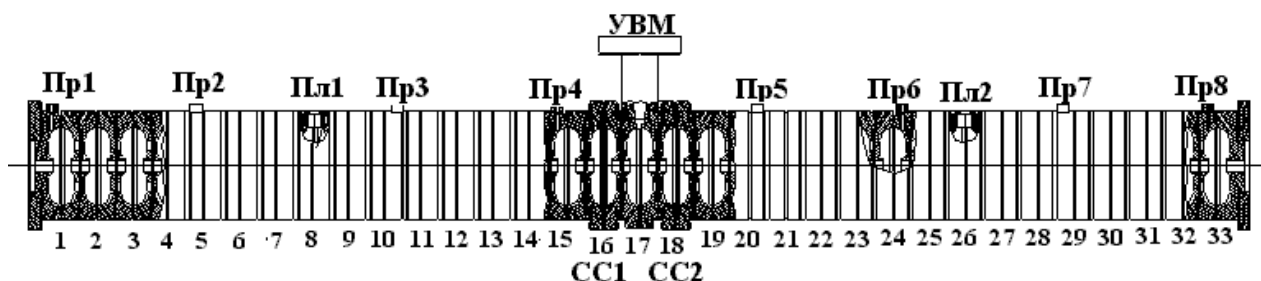


Рис. 2. Схематический чертеж ускоряющей секции.

3). Секция имеет два настроечных плунжера  $\varnothing 18$  мм в ускоряющих ячейках №8 и №26 (Пл1 и Пл2), которые в штатном режиме управляются системой контроля и управления и используются для стабилизации резонансной частоты за счет синхронного параллельного движения плунжеров вверх (снижение резонансной частоты секции) и вниз (повышение резонансной частоты секции). При тренировках секций на невысоком уровне мощности, рассеиваемой в стенках структуры (~5-10

кВт), для очистки ячеек связи используется антипараллельное движение плунжеров, при котором возбуждаются электромагнитные поля в ячейках связи, выжигающие мелкую пыль и загрязнения в этих ячейках. Номинальное положение плунжеров +3 мм внутрь ячейки относительно боковой стенки ускоряющей ячейки. Диапазон перемещения плунжеров составляет +9/-6 мм, соответствующее максимальное изменение резонансной частоты секции при параллельном движении плунжеров относительно номинального положения +3/+3 мм составляет +500 кГц (+9/+9 мм)/-280 кГц (-6/-6 мм).

4). Для диагностики и контроля распределения амплитуды ускоряющего поля каждая секция имеет по восемь вакуумно плотных СВЧ-проб (штыри связи), равномерно распределенных по длине структуры и расположенных в ускоряющих ячейках №№1, 5, 10, 15, 20, 24, 29 и 33 (Пр1 – Пр8 на Рис. 2).

5). Полуячейки (сегменты) для секции изготавливаются из сертифицированной бескислородной меди, соединительные и волноводные фланцы, а также фланцы для крепления СВЧ-проб – из вакуумно плотной немагнитной ( $\mu < 1.05$ ) нержавеющей стали, подставка для секции – из алюминиевого сплава (на Рис. 2 не показана).

6). Пайка секции осуществляется в водородной печи серебряным припоем ПСР-72. Поскольку длина секции, 207 см, слишком велика для того, чтобы поместить ее в печь целиком, секция паяется тремя отдельными узлами – левая половина, узел ввода мощности и правая половина. Соседние с узлом ввода мощности ускоряющие ячейки №16 и №18 представляют собой так называемые соединительные сегменты (СС1 и СС2 на Рис. 2). Каждая из четырех полуячеек (сегментов) указанных ускоряющих ячеек спаяна с фланцем из нержавеющей стали. После пайки основных узлов ускорителя левая половина, узел ввода мощности и правая половина секции соединяются болтами через фланцы соединительных сегментов. При соединении фланцев СС1 и СС2 используется специально разработанная медная прокладка, обеспечивающая одновременно как вакуумный, так и СВЧ-контакт между сегментами ускоряющих ячеек №16 и №18. Ячейки связи в месте соединения полуячеек (на максимальном радиусе) должны иметь скругление  $R = 0.9$  мм для предотвращения скапливания припоя в углах ячейки при пайке.

7). Требуемые СВЧ-параметры ускоряющей секции представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Требуемые СВЧ-параметры ускоряющей секции.

$f_{рез}$ (вакуум, номинальный уровень мощности $P_{ст} = 25$ кВт, положение плунжеров Пл1/Пл2 = +3/+3 мм)	2449.532 (-0.25/+0.1) МГц
Полоса запираения дисперсионной кривой	$\Delta = \tilde{f}_{ЯС} - \tilde{f}_{УЯ} \leq 0.4$ МГц
Равномерность ускоряющего поля на оси структуры при Пл1/Пл2 = +3/+3 мм	$\pm 3\%$
Равномерность ускоряющего поля на оси структуры при Пл1/Пл2 = +9/+9 и -6/-6 мм	$< \pm 10\%$
Собственная добротность $Q_0$ для нормального положения плунжеров	$\geq 15000$
Коэффициент отражения по напряжению для нормального положения плунжеров	$r_v = 0.06 (\pm 0.04)$ – пересвязь КСВн = $\beta_0 = 1.13 (+0.07/-0.09)$ – пересвязь

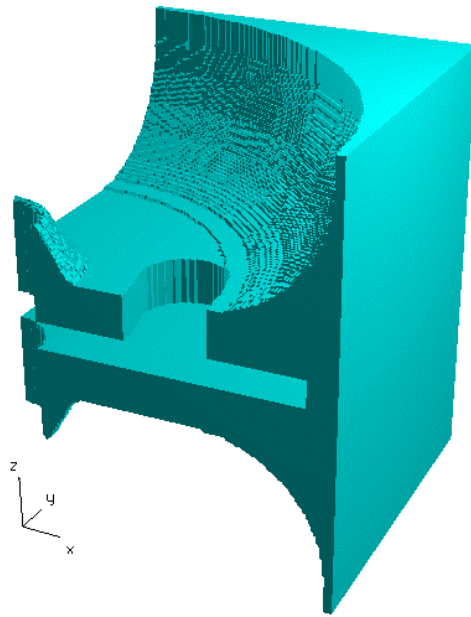
8). Натекание при проверке вакуумной плотности гелиевым течеискателем не должно превышать  $10^{-9}$  мбар·л/с (при давлении охлаждающей воды 6 атм).

### 3. Численное моделирование ускоряющей структуры на 2450 МГц.

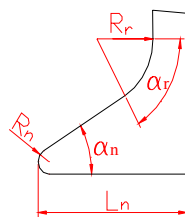
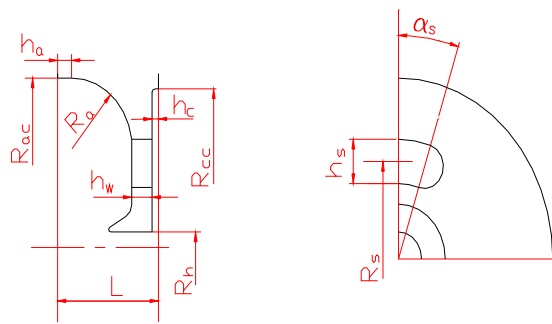
#### 3.1. Расчет и настройка частоты $\pi/2$ -колебания для ускоряющей ячейки и ячейки связи.

Параметры  $\pi/2$ -колебания в ускоряющих ячейках и ячейках связи были рассчитаны в связи между ними, как показано на Рис. 3(а). Параметры для расчета ячеек представлены на Рис. 3(б). Исходные данные для размеров ячеек были взяты из работы [12].

Результаты трехмерных расчетов, представленных здесь, были получены с количеством точек сетки около 600000 – это число было ограничено максимальной производительностью компьютера.



(a)



(б)

Рис. 3. (а) Квадрант трехмерной геометрии двух ускоряющих полуячеек и одной ячейки связи между ними, (б) основные размеры ускоряющих ячеек и ячеек связи.



Заметим, что в трехмерных расчетах мы не брали в расчет скругление  $R = 0.9$  мм, имеющее место в реальных ячейках на внешнем радиусе ячейки связи для предотвращения затекания припоя внутрь ячейки. Граничные условия для ускоряющих ячеек и ячеек связи, используемые в расчетах частоты  $\pi/2$ -колебания брались, соответственно, как  $e-e$  и  $m-m$  (где  $e$  – электрическая и  $m$  – магнитная) стенки. Для  $R_{CC} = 44.45$  мм, изначально использованного в расчетах [12], частота  $\pi/2$ -колебания оказалась  $f_{\pi/2}^{YC} = 2430.97$  МГц. Для выхода на рабочую частоту 2450 МГц радиус ячеек связи  $R_{CC}$  был скорректирован до 43.96 мм. В Таблице 2 приведены результаты расчетов размеров ячеек в соответствии с обозначениями Рис. 3(б) [13]. Для оценки влияния щелей связи на параметры ускоряющих ячеек и ячеек связи мы также провели трехмерные расчеты без учета щелей связи. В Таблице 3 представлены результаты расчетов резонансных частот и собственных добротностей ячеек без учета и с учетом щелей связи.

Таблица 2. Размеры ячеек в соответствии с обозначениями Рис. 3(б) (в мм и градусах).

$R_{ac}$	$h_a$	$R_a$	$h_w$	$h_c$	$R_{cc}$	$L$	$R_h$
42.82	4.22	18.26	6.19	1.93	43.96	30.60	7.0
$R_n$	$R_r$	$L_n$	$R_s$	$h_s$	$\alpha_n$	$\alpha_r$	$\alpha_s$
0.642	3.40	6.97	25.25	11.45	30	60	18.25

Таблица 3. Результаты расчетов резонансных частот и собственных добротностей ускоряющих ячеек и ячеек связи для  $\pi/2$ -колебания с учетом и без учета щелей связи.

	$f_{рез}, \text{ МГц}$	$Q_0$	$Q_0^{\text{уточненное}}$
$f_{\pi/2}^{VЯ}$	2448.18	18490	16600
$f_{\pi/2}^{VЯ}$ , без щелей связи	2477.75	20140	18100
$f_{\pi/2}^{YC}$	2450.31	3090	2780
$f_{\pi/2}^{YC}$ , без щелей связи	2639.74	2800	2500

Из табличных результатов следует, что полоса запираения составляет  $\Delta = f_{\pi/2}^{YC} - f_{\pi/2}^{VC} = +2.13$  МГц. Поскольку это значение находится в пределах точности расчета по программе MAFIA [13], дальнейшее уточнение параметров ячеек не проводилось.

В связи с результатами, представленными в Таблице 3, необходимо сделать замечание по поводу расчета собственной добротности. Двухмерные программы (URMEL [14], PRUD-0 [15]) дают для ускоряющих ячеек без щелей связи добротность  $\sim 18400$ , т.е. на 9-10% ниже, чем трехмерные. Мы провели расчет величины добротности цилиндрического полого резонатора по трехмерной программе, сравнили ее с результатом, полученным с помощью аналитических выражений, и нашли, что трехмерные расчеты завышают значение собственной добротности примерно на 10%. В Таблице 3 добавлены скорректированные на 10% значения добротности ( $Q_0^{\text{уточненное}}$ ). Как следует из результатов, щели связи уменьшают добротность примерно на 8-9%.

В трехмерных расчетах была проведена оценка величины чувствительности резонансной частоты ускоряющих ячеек и ячеек связи к изменению основных размеров ячеек, что необходимо для оценки допусков на изготовление и последующей настройки ячеек. Результаты расчета чувствительности представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Величины чувствительности резонансной частоты ячейки к изменению основных размеров ячеек.

$\partial f^{yя} / \partial R_{yя}$	$\partial f^{yя} / \partial L_n$	$\partial f^{яс} / \partial R_{яс}$
-13 МГц/мм	+34 МГц/мм	-39 МГц/мм

При расчете  $df^{yя}/dL_n$  одновременно с длиной носиков ( $L_n$  на Рис. 3(б)) изменялся угол  $\alpha_n$ .

### 3.2. Расчет узла ввода мощности с подводющим волноводом.

Расчет узла ввода мощности с подводющим волноводом преследует две цели: (1) оценка размеров отверстия связи, обеспечивающего необходимую связь ускоряющей структуры с подводющим волноводом и (2) - оценка изменения частоты узла ввода мощности с изменением размера окна связи.

Для оценки коэффициента связи была рассчитана внешняя добротность  $Q_{\text{внешн}}$  с использованием ТЗ модуля программы MAFIA [13] с временной зависимостью. Трехмерная геометрия УВМ с подводющим волноводом показана на Рис. 4. Использовались следующие принципы расчета. Подводящий волновод возбуждался волной, имевшей гауссову

временную зависимость амплитуды с дисперсией  $\sigma_t = 1.25 \cdot 10^{-9}$  с и распространявшейся по направлению к узлу ввода мощности.

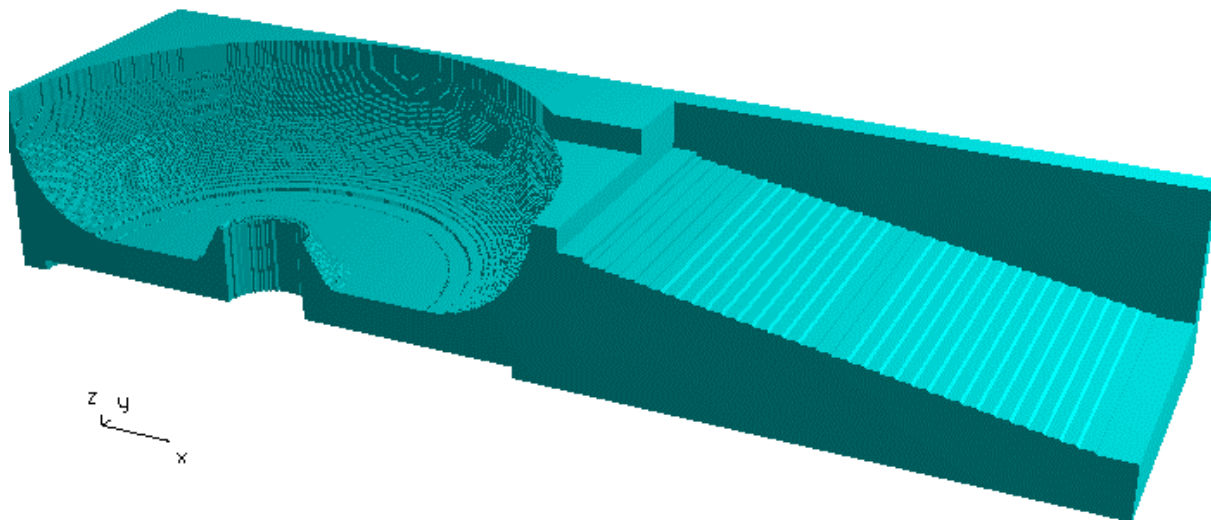


Рис. 4. Узел ввода мощности с подводщим волноводом.

Выбор  $\sigma_t$  определялся необходимостью: (1) ослабления возбуждающего сигнала до пренебрежимо малой величины за время, существенно меньшее постоянной времени  $\tau_{внешн}$ , определяемой внешней связью и (2) – обеспечения большого частотного диапазона, достаточного для возбуждения основной моды без точного знания ее частоты.

Стенки ячейки полагались идеально проводящими, поэтому затухание электромагнитного поля в ней и, как следствие, уменьшение амплитуды выходного сигнала обусловлено только поглощением во внешней нагрузке, т.е. внешняя добротность определяет постоянную времени секции:

$$\tau_{внешн} = Q_{внешн} / \omega, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – частота свободных колебаний резонатора. Для оценки  $f_0$  мы находили интервал времени (начиная с момента, когда вклад возбуждающей волны становился пренебрежимо мал), за который совершается определенное число колебаний (обычно в диапазоне  $50 \div 100$  колебаний). Для определения  $\tau_{внешн}$ , за тот же интервал времени мы оценивали уменьшение амплитуды свободных колебаний, аппроксимируя изменение амплитуды экспоненциальной зависимостью  $A(t) \sim A_0 \exp(-t/\tau)$ . На Рис. 5(а) показана

временная зависимость амплитуды падающей волны, на Рис. 5(б) - временная зависимость амплитуды волны, распространяющейся от узла ввода мощности, представляющей собой суперпозицию сигнала, отраженного от входного окна и сигнала, выходящего из ячейки. Определив из соотношения (1)  $Q_{внешн}$  для одной ячейки, мы оценивали  $Q_{внешн}$  для  $N$  ячеек секции как  $Q_{внешн}^N = NQ_{внешн}$  и вычисляли коэффициент связи секции с подводимым волноводом как  $\beta_0 = Q_0 / Q_{внешн}^N$ , где  $Q_0$  – предполагаемая собственная добротность секции.

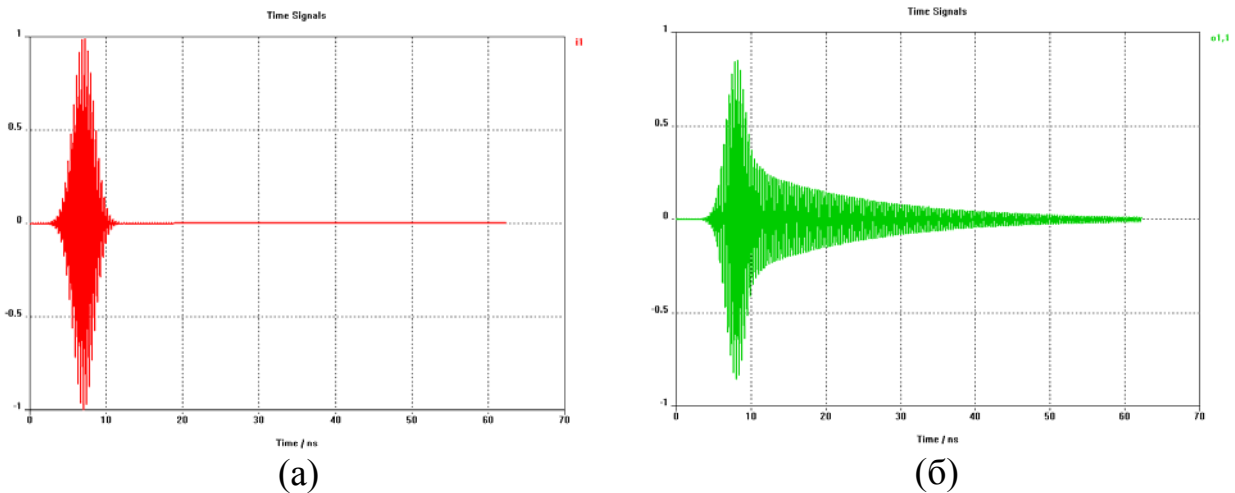


Рис. 5. Входной (а) и выходной (б) сигналы в волновод.

В соответствии с параметрами секции, коэффициент отражения волны по напряжению должен составлять  $r_v=0.06$  (пересвязь), т.е.  $\beta_0 = 1.13$ . Для проектного значения  $Q_0 = 15000$  необходимо иметь для 33-х ускоряющих ячеек секции  $Q_{внешн}^N = 13274$ , соответственно, для одной ускоряющей ячейки  $Q_{внешн} = 428$ . Соответствующая постоянная времени для одной ускоряющей ячейки  $\tau_{внешн} = 2.78 \cdot 10^{-8}$  с.

Были рассчитаны внешняя добротность и коэффициент связи с подводимым волноводом для двух значений толщины стенки окна связи ( $h_i = 8.44$  мм и 10 мм) и нескольких значений длины окна связи ( $l_i$ ). Результаты расчетов представлены в Таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчетов размера окна связи.

$h_i$ , мм	8.44	8.44	8.44	8.44	10	10
$l_i$ , мм	30	40	50	60	39.2	40
$f_0$ , МГц	2463.9	2453.8	2431.8	2411.1	2455.3	2451.5
$Q_{внешн}$	-	391	44	20	382	301
$\beta_0$	-	1.16	10.3	22.7	1.19	1.51

Для расчета размеров окна для проектного коэффициента связи  $\beta_0 = 1.13$  мы выполнили экстраполяцию данных Таблицы 5, основываясь на следующем приближении:

$$\left(\frac{l_{i1}}{l_{i2}}\right)^n = \frac{\beta_0^1}{\beta_0^2}.$$

В результате величина длины окна связи для  $\beta_0 = 1.13$  составила  $\sim 39$  мм. Соответствующая частота ускоряющей ячейки узла ввода мощности составила 2456.2 МГц. Это значение частоты получено для ячейки без щели связи. Принимая во внимание данные Таблицы 5, мы оценили, что снижение частоты узла ввода мощности за счет увеличения длины окна связи составляет примерно  $-21.6$  МГц.

### **3.3. Расчет концевой ячейки.**

Согласно данным Таблицы 3 прорезание двух пар щелей связи приводит к снижению частоты ускоряющей ячейки на  $-29.57$  МГц. Поскольку концевая ускоряющая ячейка содержит только одну пару щелей связи, для настройки на рабочую частоту ее радиус должен быть уменьшен по сравнению с регулярной ячейкой на  $DR = 29.57 / (2\partial f^{VЯ} / \partial R_{VЯ}) \approx 1.14$  мм, где значение  $\partial f^{VЯ} / \partial R_{VЯ} = -13$  МГц/мм взято из Таблицы 4.

## **4. Измерения и настройка тестовых ячеек.**

Для проверки технологии и точности изготовления ячеек были изготовлены несколько тестовых сегментов структуры с внутренними ячейками связи: шесть сегментов со щелями связи и два сегмента без щелей связи. Изготовленные сегменты показаны на Рис. 6.

### **4.1. Измерение добротности.**

Собственная добротность,  $Q_0$ , является одной из важнейших характеристик ускоряющей структуры, определяющей затраты СВЧ мощности на создание ускоряющего поля, тепловой режим структуры и эффективность ускорения частиц. Для заданной геометрии ускоряющей структуры величина  $Q_0$  зависит от качества поверхности ускоряющих ячеек и качества контакта между сегментами. В процессе разработки технологии изготовления сегментов мы стремились к достижению

максимальной величины добротности за счет выбора режима обработки их внутренней поверхности.



Рис. 6. Тестовые сегменты структуры.

Измерение собственной добротности ускоряющей ячейки проводилось на двух сегментах без щелей связи до и после пайки в соответствии со схемой, показанной на Рис. 7. Для измерений используются два коаксиальных штыря связи, вводимых в отверстия пролетного канала с противоположных сторон ячейки.

В процессе измерений фиксируется резонансная частота ускоряющей ячейки и ее добротность в зависимости от величины ослабления сигнала при изменении глубины погружения штырей связи внутрь ячейки. Измерения проводятся двумя методами: с помощью измерителя разности фаз и ослаблений ФК2-18 по ширине резонансной кривой на уровне половинного ослабления мощности проходящего сигнала и с помощью сетевого анализатора Hewlett Packard-8752C. Оба метода дают близкие результаты. Погрешность измерения добротности составляет  $\pm 1.5\%$  и

определяется максимально достижимой величиной ослабления сигнала между штырями связи, около -60 дБ. Большая величина ослабления не может быть достигнута из-за ухудшения СВЧ контакта между наружной поверхностью коаксиального штыря связи и внутренней поверхностью пролетного канала.

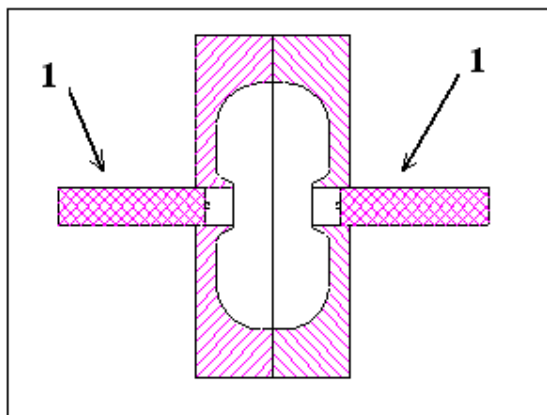
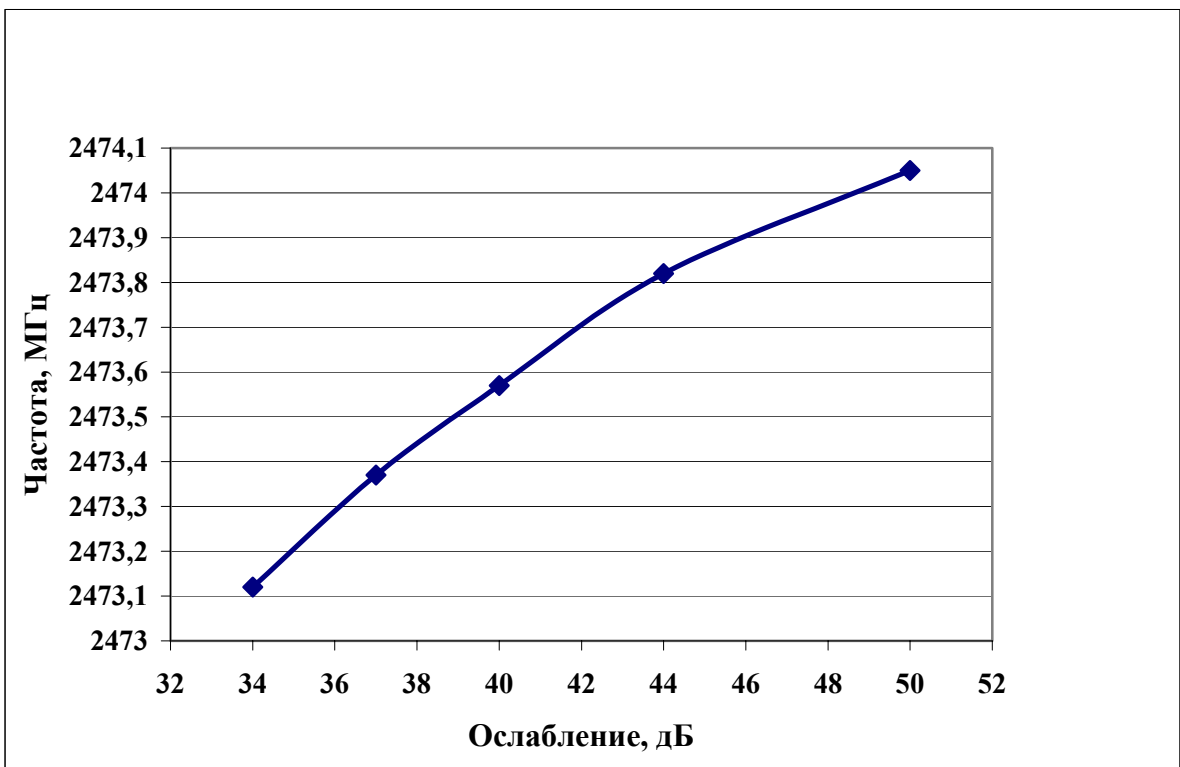


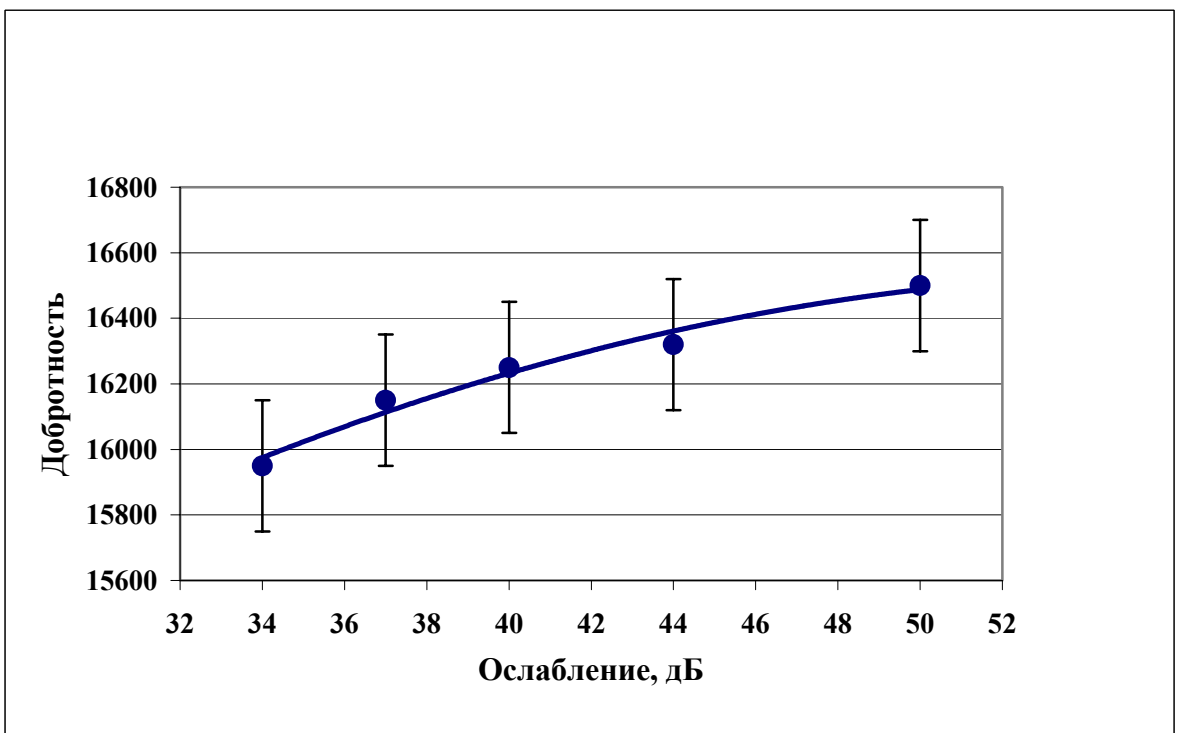
Рис. 7. Схема метода для измерения собственной добротности резонатора (1 – штыри связи).

Измерение добротности ускоряющей ячейки, состоящей из двух сегментов без щелей связи под прессом с давлением 5 тонн дало значение  $Q_0 = 15000 \pm 200$  и резонансную частоту  $f_{рез} = 2474.53$  МГц. После пайки сегментов без щелей связи были измерены зависимости резонансной частоты и добротности от ослабления между штырями, представленные на Рис. 8 (а) и (б), соответственно.

Из зависимости, представленной на Рис. 8(б), следует, что нижний предел собственной добротности составляет не менее  $Q_0 = 16500 \pm 200$ . Расчетное значение  $Q_0 = 18100$  (Таблица 3). Таким образом, снижение добротности из-за шероховатости внутренней поверхности ускоряющей ячейки составляет около 9%. Из трехмерных расчетов (Таблица 3) следует, что щели связи уменьшают  $Q_0$  на 8%. С экспериментальной добротностью  $Q_0 = 16500$  без щелей это соответствует  $Q_0 = 15160$  со щелями связи – значение, которое соответствует необходимым параметрам секции.



(a)



(б)

Рис. 8. Зависимость: (а) резонансной частоты и (б) добротности от переходного ослабления между штырями связи.



#### 4.2. Измерение резонансных частот ускоряющих ячеек.

Для измерений частот ускоряющих ячеек был использован метод эталонных полуячеек [9, 16]. В этом методе измеряются частоты  $\pi/2$ -колебания в сборке ( $f^{(2)}_{\pi/2}$ ), состоящей из двух эталонных полуячеек с крышками: [крышка –  $1/2УЯ_{э\text{т}}$  – ЯС –  $1/2УЯ_{э\text{т}}$  – крышка]; и сборке ( $f^{(4)}_{\pi/2}$ ), состоящей из четырех полуячеек с крышками: измеряемые сегменты помещаются между эталонными [крышка –  $1/2УЯ_{э\text{т}}$  – ЯС –  $УЯ_{изм}$  – ЯС –  $1/2УЯ_{э\text{т}}$  – крышка]. Искомая частота  $f^{(изм)}_{\pi/2}$  определяется из соотношения:

$$\begin{aligned} f^{(4)}_{\pi/2} &= \frac{f^{(2)}_{\pi/2} + f^{(изм)}_{\pi/2}}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow f^{(изм)}_{\pi/2} &= 2 \cdot f^{(4)}_{\pi/2} - f^{(2)}_{\pi/2} \end{aligned} \quad (2)$$

Частоты ускоряющих ячеек были также измерены с помощью метода штырей связи, ранее использованного для настройки ускоряющих структур для разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ [17,18,21]. В этом методе сборка, состоящая из 4-х полуячеек без крышек [ $1/2УЯ$  – ЯС –  $УЯ_{изм}$  – ЯС –  $1/2УЯ$ ] измеряется с помощью штырей связи на оси (Рис. 9).

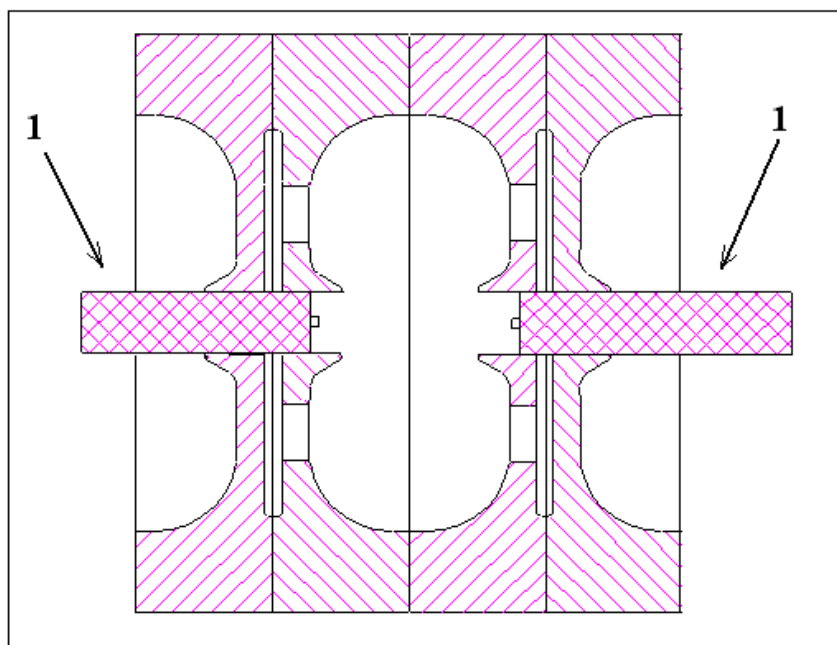


Рис. 9. Схема метода для измерения частоты  $\pi/2$  колебания ускоряющей ячейки (1 – штыри связи).

Штыри связи изготовлены таким образом, чтобы их поверхность плотно прилегала к поверхности пролетного канала. Проходя через пролетный канал к измеряемой ячейке, они закорачивают соседние ячейки связи, и собственные частоты ячеек связи при этом отстраиваются примерно на 2000 МГц, в результате чего электромагнитные колебания в соседних ячейках связи вблизи рабочей частоты практически не возбуждаются. Таким образом, структура поля в ускоряющей ячейке оказывается близкой к структуре поля  $\pi/2$  колебания в идеально настроенной секции.

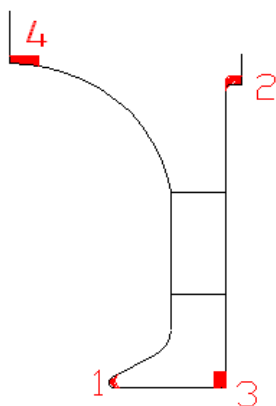


Рис. 10. Размеры для настройки ячеек ( 1 – увеличение  $f_{рез}$  ускоряющей ячейки, 2 - уменьшение  $f_{рез}$  ячейки связи, 3 – увеличение  $f_{рез}$  ячейки связи, 4 – уменьшение  $f_{рез}$  ускоряющей ячейки)

Таблица 6. Результаты измерений резонансных частот ускоряющих ячеек эталонным методом.

Комбинация сегментов	$f^{(2)}_{\pi/2}$ , МГц	$Q_2$
Е-3'-2-Е	2450.60	7200
Е-2'-3-Е	2450.94	7800
Е-1'-1-Е	2450.47	7800

Комбинация сегментов	$f^{(4)}_{\pi/2}$ , МГц	$f^{(изм)}_{\pi/2} = 2f^{(4)}_{\pi/2} - f^{(2)}_{\pi/2}$ МГц	$Q_4$	$Q_0 = Q_2 Q_4 / (2Q_2 - Q_4)$
Е-1'-2-3'-1-Е	2450.25	2450,03	9800	13200
Е-3'-3-2'-2-Е	2450.31	2450,02	9000	12000
Е-3'-1-1'-2-Е	2450.23	2449,86	9100	12300

Комбинация сегментов	$f^{(6)}_{\pi/2}$ , МГц	$Q_6$	$Q_0 = Q_2 Q_6 / (1.5Q_2 - Q_6/2)$
Е-1'-3-2'-2-3'-1-Е	2449.82	10400	12500

После изготовления ускоряющие частоты тестовых ячеек были измерены эталонным методом. Частота  $\pi/2$ -колебания для различных сочетаний сегментов составила  $f_{\pi/2} = 2448.60 \pm 0.30$  МГц. Проточкой носиков ускоряющих полуячеек (размер 1 на Рис. 10) все сегменты были настроены на частоту 2450 МГц.

Результаты измерений частот  $\pi/2$ -колебаний для различных сборок с добротностью, определенной с использованием различных методов [9,16], а также частоты, найденные из соотношения (2) представлены в Таблице 6 (E – крышка; 1,1',...,3' – номера сегментов со щелями связи).

Табличные данные для тестовых ячеек свидетельствуют о том, что разброс частот после настройки невелик, собственная добротность соответствует ожидаемой добротности до пайки, причем добротности, измеренные различными способами, дают согласующиеся результаты. Величина измеренной добротности УЯ с использованием штырей связи для различных комбинаций сегментов составила  $Q_0 = 12600 \pm 300$ .

### ***4.3. Измерение дисперсионной характеристики и резонансных частот ячеек связи.***

Метод измерения частоты и настройки ЯС, используемый в МАМІ, основан на измерении дисперсионной характеристики и последующем расчете с помощью программы DISPER [19] величин коэффициентов связи, полосы запираения и частоты  $\pi/2$ -колебания ЯС.

Программа DISPER аппроксимирует измеренные частоты дисперсионной характеристики по методу наименьших квадратов зависимостью, вытекающей из модели связанных контуров [20,21]. Модель основана на физической аналогии, существующей между колебательным контуром и объемным резонатором в узкой полосе частот вблизи собственной частоты резонатора. Для описания бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи в модели вводится индуктивная связь между соседними ячейками и через одну ячейку. Модель учитывает нарушающие симметрию структуры эффекты, связанные с различными типами окончаний секций (на целые ячейки, полуячейки, комбинированные окончания). Программа DISPER позволяет аппроксимировать данные с помощью 3-х,

4-х или 5-и параметров. При 3-х параметрической аппроксимации, которая используется в основном при малом ( $\sim 5$ ) количестве ячеек в секции, выходными данными программы, являются 1) - резонансная частота  $\pi/2$ -колебания ускоряющих ячеек ( $f_{\pi/2}^{УЯ}$ ), 2) резонансная частота  $\pi/2$ -колебания ячеек связи ( $f_{\pi/2}^{ЯС}$ ) и 3) коэффициент связи между соседними ячейками ( $k_1$ ). По формуле

$$D = f_{\pi/2}^{ЯС} - f_{\pi/2}^{УЯ} \quad (3)$$

вычисляется полоса запираения дисперсионной кривой. При 4-х параметрическом расчете, который, как правило, дает наиболее достоверный результат, к указанным характеристикам добавляется коэффициент связи через ячейку ( $k_2$ ). При 5-и параметрическом расчете учитывается различие между ускоряющими ячейками и ячейками связи бипериодической структуры посредством введения второго коэффициента связи через ячейку ( $k_3$ ).

Достоверность результатов измерений и точность настройки отдельных ячеек ускоряющей структуры можно оценить по коэффициенту  $\chi^2$ , который рассчитывается по формуле:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-l} \sum_i W_i (f_i^{изм} - f_i^{расч})^2, \quad (4)$$

где  $N$  – количество ячеек ускоряющей структуры,  $l$  – число параметров аппроксимации,  $f_i^{изм}$  –  $i$ -ая измеренная частота дисперсионной характеристики,  $f_i^{расч}$  – результат программной аппроксимации  $f_i^{изм}$ ,  $W_i$  – весовой фактор, равный  $W_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$  ( $\sigma_i$  – ошибка измерения частоты,  $f_i \pm \sigma_i$ ). Как правило, при удовлетворительной настройке  $\chi^2$  не должен превышать количество ячеек в измеряемой структуре.

Для одной ячейки связи в сборке из двух полуячеек [крышка – 1/2УЯ – ЯС – 1/2УЯ – крышка], когда можно определить только частоты 0-,  $\pi/2$ - и  $\pi$ -колебания, точность 3-х параметрического расчета по DISPER является недостаточной для надежной оценки частоты  $\pi/2$ -колебания ячейки связи. Точность в этом методе повышается с увеличением числа ячеек. В этом случае можно получить верхнее значение величины полосы запираения для всех ячеек связи в измеряемой сборке в случае отсутствия существенных отличий между ними.

Определение полосы запираания из измеренной дисперсионной характеристики дает только среднее значение частот ячеек связи, из которой невозможно определить частотный разброс отдельных ячеек. Поэтому мы использовали метод настройки по DISPER для измерений абсолютной величины полосы запираания (чем больше число сегментов в сборке – тем выше точность определения полосы запираания) и, при необходимости (например, большое значение коэффициента  $\chi^2$ ), прямой метод измерения относительных резонансных частот отдельных ячеек связи с использованием штырей связи. Измерение частот ячейки связи методом штырей связи схематически иллюстрируется на Рис. 11. В сборке, состоящей из 4-х полуячеек без крышек [1/2ЯС – УЯ – ЯС – УЯ – 1/2ЯС], измеряемая ячейка связи находится посередине. Штыри связи, закорачивая соседние ускоряющие ячейки, отстраивают их вверх по частоте, в результате чего электромагнитные колебания в соседних ускоряющих ячейках вблизи частоты  $\pi/2$  колебания связи практически не возбуждаются, и структура поля в измеряемой ячейке связи оказывается близкой к структуре поля  $\pi/2$  колебания. Измерения частот ячеек связи с помощью этого метода систематически отличаются от частот, найденных с помощью определения полосы запираания из дисперсионной характеристики ( $\sim -2.0$  МГц), что может объясняться недостаточной частотной отстройкой соседних ускоряющих ячеек.

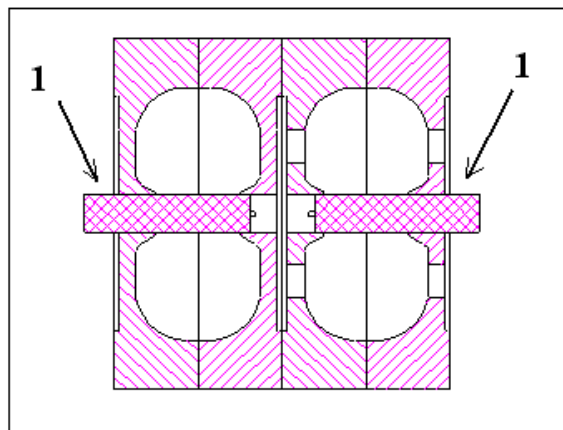


Рис. 11. Схема метода для измерения частоты  $\pi/2$  колебания ячейки связи (1 – штыри связи).

Тем не менее, используя фиксированные длины штырей связи, можно получить достоверную информацию об относительных частотах отдельных ячеек связи,

которая может быть использована в процессе настройки. Абсолютная величина частоты для настройки определяется из измерений полосы запираения в сборке, состоящей из большого числа сегментов.

Основной целью измерений и настройки тестовых ячеек связи было:

- определение окончательного размера диаметра ячейки связи для изготовления;
- определение чувствительности частоты ячейки связи к изменению диаметра;
- настройка ячейки связи и настройка полосы запираения до значения  $\Delta < \pm 0.4$  МГц.

Для шести тестовых ячеек методом штырей связи мы измерили зависимость резонансной частоты ячеек связи от их диаметра при изменении диаметров ячеек связи от 87.1 мм до 89.8 мм со скруглением  $R=0.9$  мм. Результаты измерений представлены на Рис. 12.

Из этих измерений можно оценить чувствительность частоты ячейки связи к изменению диаметров обеих полуячеек, как  $\frac{\partial f_{\pi/2}^{ЯС}}{\partial \varnothing} \approx -23$  МГц/мм. Основываясь на этой зависимости, мы зафиксировали диаметр ячейки связи 88.3мм со скруглением  $R = 0.9$  мм. Это значение соответствует частоте  $f_{\pi/2}^{ЯС} \approx 2445$  МГц на Рис. 12. Поскольку метод штырей связи занижает частоту ЯС на  $\sim -2.0$  МГц, реальная частота для данного диаметра ячеек составляет  $f_{\pi/2}^{ЯС} \approx 2447.0$  МГц.

Окончательная настройка ячеек связи на необходимую резонансную частоту  $f_{\pi/2}^{ЯС} \approx 2450.0$  МГц проводилась изменением размера 3 (Рис. 10) – кольцевая проточка на радиусе 8 мм. Чувствительность резонансной частоты ячейки связи к глубине  $h$  проточки при проточке обеих полуячеек составляет  $\frac{\partial f_{\pi/2}^{ЯС}}{\partial h} \approx +21.2$  МГц/мм.

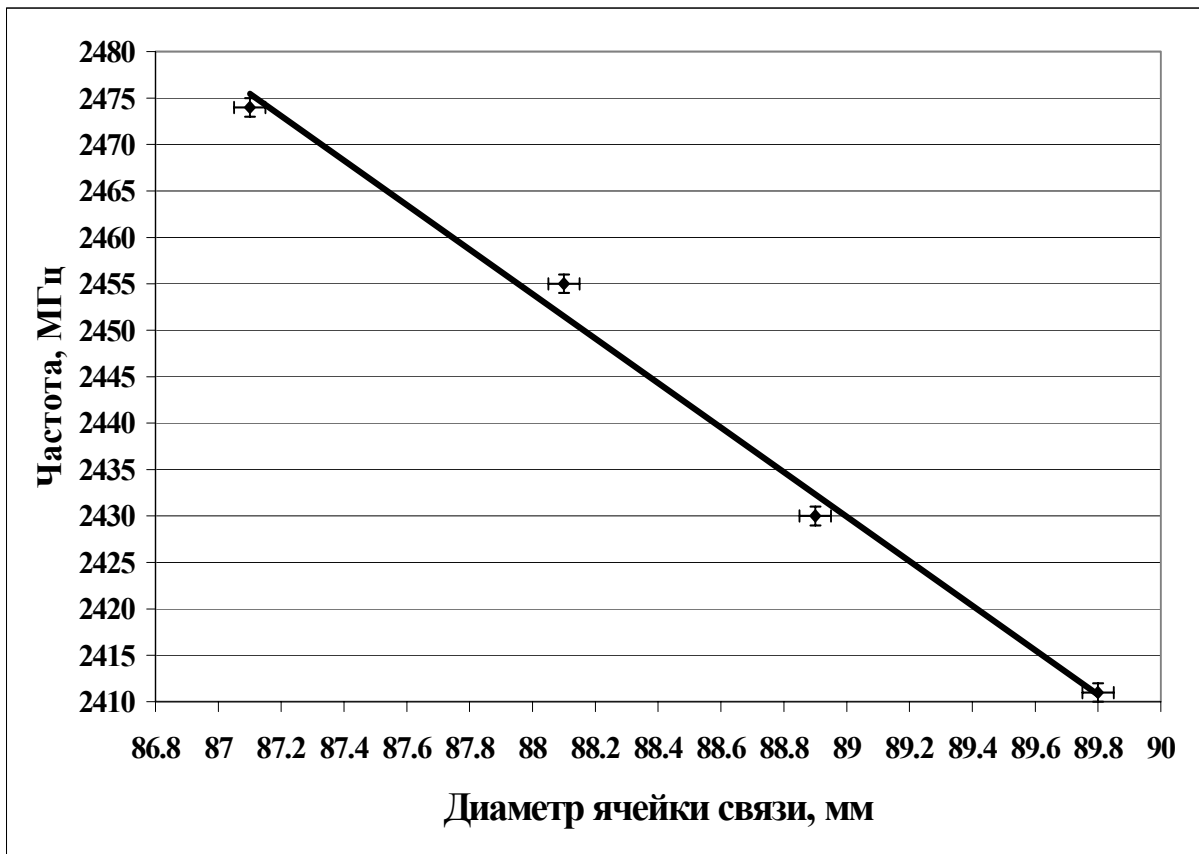


Рис. 12. Зависимость частоты ячейки связи от диаметра.

Результаты аппроксимации по программе DISPER [19] дисперсионной кривой, измеренной на сборке из шести сегментов с крышками, представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Результат окончательного аппроксимации измеренной дисперсионной кривой по DISPER.

	3-х параметр. расчет	4-х параметр. расчет	5-и параметр. расчет
$f_{\pi/2}^{YC}$ , МГц	2451.13	2450.76	2449.65
$f_{\pi/2}^{YЯ}$ , МГц	2449.45	2450.51	2449.47
$\Delta = f_{\pi/2}^{YC} - f_{\pi/2}^{YЯ}$ , МГц	+1.68	+0.25	+0.18
Коэффициент связи, $k_1$ , %	4.24	4.23	4.26

Полоса запираания для 3-х параметрического расчета составляет  $\Delta = +1.68$  МГц, для 4-х параметрического -  $\Delta = +0.25$  МГц и для 5-и параметрического  $\Delta = +0.18$  МГц. В первом приближении коэффициент связи  $k_1 = 4.2\%$ .

#### 4.4. Измерение распределения электрического поля на оси.

Для получения информации о распределении ускоряющего поля на оси структуры мы использовали метод малого возмущения электромагнитного поля, возникающего при протягивании пробного тела вдоль оси. Пробное тело представляло собой металлический цилиндр длиной 4 мм и диаметром 0.8 мм, закрепленный на леске диаметром 0.1 мм. Установка для измерения распределения поля была создана на основе сетевого анализатора Hewlett Packard-8752C, который работал в режиме измерения переходного ослабления между: 1) петлями связи, расположенными в одной из торцевых крышек исследуемого набора сегментов или 2) коаксиально-волноводным переходом, закрепленном на входном фланце секции и одной из восьми проб при измерении поля полной секции в сборе (см. Рис. 2). При прохождении пробного тела через области структуры с различной напряженностью электрического поля возникает сдвиг собственной частоты исследуемой резонансной системы, пропорциональный квадрату напряженности поля  $\delta f \sim E_z^2$ . В результате, при неизменной частоте возбуждающего сигнала, происходит сдвиг фазы поля секции по отношению к возбуждающему сигналу,  $\delta\varphi$ , который и фиксируется с помощью сетевого анализатора. Сдвиг частоты определяется как  $\delta f = \frac{f_{\pi/2} \text{tg}(\delta\varphi)}{2 \cdot Q_l}$ , где  $f_{\pi/2}$  - резонансная частота структуры,  $Q_l$  - измеренная нагруженная добротность структуры. Измерения и обработка экспериментальных данных выполняется с использованием лицензионного программного обеспечения LabView. Результирующие зависимости  $\delta f(z)$  и  $E_z(z)$  (в относительных единицах) записываются в формате Excel-файлов.

Распределение электрического поля на оси сборки из шести настроенных тестовых сегментов с крышками показано на Рис. 13 (расположение сегментов в сборке соответствует номерам на Рис. 13).

Результаты численного моделирования, измерений и настройки тестовых ячеек ускоряющей структуры позволили определить окончательные размеры всех ячеек и разработать комплект рабочих чертежей на ускоряющую структуру с внутренними ячейками связи на частоту 2450 МГц для двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 1.5 ГэВ. Трехмерный разрез части секции показан на Рис. 14.



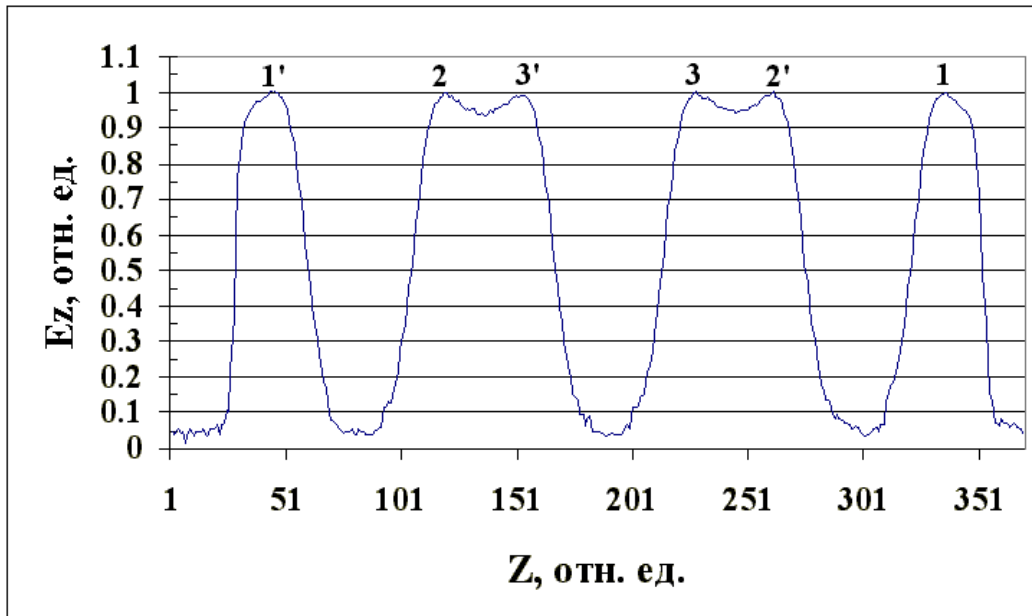


Рис 13. Распределение электрического поля на оси  $E_z(z)$  (сборка из шести тестовых сегментов с крышками).



Рис. 14. Трехмерный разрез части секции.

### **Заключение.**

Проведено численное моделирование бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи на частоту 2450 МГц для проекта двухстороннего разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 1.5 ГэВ [7]. На основании расчетов изготовлены тестовые ячейки структуры, на которых проведены измерения собственной добротности, определена чувствительность к изменению различных размеров структуры, сформулированы рекомендации по технологии обработки внутренней поверхности ячеек и технологии пайки структуры. В результате проделанной работы апробированы и отлажены методики измерения и настройки ускоряющей структуры, определены окончательные геометрические размеры структуры.

Авторы выражают искреннюю благодарность Dr. H. Euteneuer, Dr. A. Jankowiak (Институт ядерной физики, Университет г. Майнц, Германия) за активную помощь в работе.

## Литература.

1. H. Herminghaus, A. Feder, K.-H. Kaiser, W. Manz, H.V.D. Schmitt, **The Design of a Cascaded 800 MeV Normal Conducting C.W. Race Track Microtron**, Nucl. Instr. and Meth. 138 (1976) 1
2. H. Herminghaus, **First Operation of the 850 MeV C.W. Electron Accelerator MAMI**, in **Proc. of the 1990 Linear Acc. Conf., Albuquerque**, N.M., 10.9. - 14.9.90, LA-12004-C, p.362
3. H. Euteneuer, H. Herminghaus, P. Jennewein, K.-H. Kaiser, H.-J. Kreidel, D. Mittwich, G. Stephan, Th. Weis, P. Zinnecker, **Beam monitors at the Mainz Microtron**, in **Proc. of the 1992 Linear Acc. Conf.**, Ottawa, CA, 24.8. - 28.8.92, AECL-10728, Vol.1, p.356
4. H.-J. Kreidel, **Status Report on the MAMI Control System**, in **Proc. of the 1999 Int. Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems**, Triest, Italy, Oct. 99, p.645
5. U. Ludwig-Mertin, H. Euteneuer, K.-H. Kaiser, H.-J. Kreidel, S. Ratschow, **Three Dimensional Design of the Bending Magnets for a 1.5GeV Double Sided Microtron**, in **Proc. of the 1998 European Particle Accelerator Conference**, Stockholm, 22.-26.6.98, p.1931
6. H. Euteneuer, A. Jankowiak, M. Negrazus, V.I. Shvedunov, **The 4.9 GHz Accelerating Structure for MAMI C**, in **Proceedings of the 2000 European Particle Accelerator Conference**, Wien, 26.-30.06.00, p.1954
7. A. Jankowiak, K. Aulenbacher, H. Euteneuer, R. Herr, P. Jennewein, K.-H. Kaiser, H.-J. Kreidel, U. Ludwig-Mertin, M. Negrazus, S. Ratschow, M. Seidl, G. Stephan, A. Thomas, A.S. Alimov, O.V. Chubarov, G.A. Novikov, V.I. Shvedunov, **Design and Status of the 1.5 GeV-Harmonic Double Sided Microtron for MAMI**, in **Proc. of the 2002 European Particle Accelerator Conference**, Paris, 03.-07.06.03, p.1085
8. H. Herminghaus, B. Dreher, H. Euteneuer, K.-H. Kaiser, M. Kelliher, R. Klein, H.-J. Kreidel, M. Loch, U. Ludwig-Mertin, K. Merle, H. Schöler, R. Schulze, P. Semmel, G. Stephan, **Status Report on the Normal Conducting C.W. Race Track Microtron Cascade MAMI**, in **Proc. of the 1983 Particle Accelerator Conference Santa-Fe**, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS 30, No. 4 (1983), p. 3274

9. H. Euteneuer, **Measurement on  $\beta < 1$  Segments of the On-Axis-Coupled Structure for the Injector-LINAC of MAMI**, Preprint MAMI 09/1984
10. J.P. Labrie, H. Euteneuer, J. McKeown, **Energy Gradient Limits in Room Temperature C.W. Linacs**, in Proc. of the 1984 Linear Accelerator Conference, Seeheim, GSI-84-11, p.460
11. H. Euteneuer, H. Schöler, **Experiences in Fabricating and Testing the RF-Sections of the Mainz Microtron**, in Proc. of the 1986 Linear Accelerator Conference, Stanford, SLAC Report-303, p.508
12. H. Euteneuer, H. Scholer, **Das Design der HF-Sektionen für MAMI-B**, Preprint MAMI 14/85.
13. R. Klatt, F. Krawczyk, W.R. Novender, C. Palm, T. Weiland, B. Steffen, T. Barts, M.J. Browman, R. Cooper, C.T. Mottershead, G. Rodenz, and S.G. Wipf, **MAFIA - A Three-Dimensional Electromagnetic CAD System for Magnets, RF Structures, and Transient Wake-Field Calculations**, in Proc. 1986 Linear Accelerator Conf., SLAC-303 (1986) 276.
14. Van Rienen U., Weiland T., **Cavity and Waveguide Design by Triangular Mesh Code URMEL-T**, in Proc. 1986 Linear Accelerator Conference, Stanford, June 2-6, 1986. SLAC-Report-303, p. 286
15. Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Португалов Ю.И., Рябов А.Д., **Модификация пакета программ PRUD-0 для расчета периодических структур**. Препринт ИФВЭ 83-178, Серпухов, 1983.
16. H. Euteneuer, **Tuning der MAMI-Resonatoren**, Preprint MAMI 4/1982b
17. A.S. Alimov, B.S. Ishkhanov, I.M. Piskarev, V.I. Shvedunov, and A.V. Tiunov, **Operational Experience with Room Temperature Continuous Wave Accelerator Structures**, Nucl. Instrum. Meth. **A328** (1993) 385.
18. A.S. Alimov, A.S. Chepurnov, O.V. Chubarov, I.V. Gribov, B.S. Ishkhanov, I.M. Piskarev, A.G. Rzhakov, M.A. Sotnikov, I.V. Surma, A.V. Shumakov, V.I. Shvedunov, A.V. Tiunov, and V.A. Ushkanov, **Performance of the 6 MeV Injector for the Moscow Racetrack Microtron**, Nucl. Instrum. Meth. **A326** (1993) 391.
19. S.O. Schriber, **Fitting of an Ordered Set of Mode Frequencies**, Chalk River, Ontario, 1970, AECL-3669

20. Милованов О.С., Собенин Н.П., **Техника СВЧ**, М., Атомиздат, 1980.
21. N.P. Sobenin, B.V. Zverev, **Electrodynamic Characteristics of Accelerating Cavities**, FISEC, London, England, 1999.

Андрей Сергеевич Алимов  
Андрей Алексеевич Ветров  
Борис Саркисович Ишханов  
Андрей Анатольевич Косарев  
Николай Иванович Пахомов  
Олег Владимирович Чубаров  
Василий Иванович Шведунов

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С  
ВНУТРЕННИМИ ЯЧЕЙКАМИ СВЯЗИ ДЛЯ  
ДВУХСТОРОННЕГО РАЗРЕЗНОГО МИКРОТРОНА  
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 1.5 ГэВ.**

**Издательство УНЦ ДО  
ИД №00545 от 06.12.1999 г.**

117246, Москва, ул. Обручева, 55-А, УНЦ ДО  
Тел./факс (095) 718-6966, 718-7767, 718-7785 (комм.)  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://abiturcenter.ru/izdat/>

Заказное. Подписано в печать 23.06.04 г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная №2. Усл.п.л. 1.8  
Тираж 50 экз. Заказ № 638

Отпечатано в мини-типографии УНЦ ДО  
<http://abiturcenter.ru/print/>  
в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета