

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

9-87-495

Г.Г.Гульбемян, Э.Л.Иванов

**ПРОГРАММА РАСЧЕТА  
НЕОДНОРОДНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ  
И УСКОРЯЮЩИХ СИСТЕМ  
ЦИКЛОТРОНОВ У-400 И ИЦ-100**

**1987**

## 1. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Компоновка того или иного циклотрона начинается с оценки возможности создания магнитной структуры и далее именно эта структура определяет требования к остальным системам.

Высокочастотная структура должна обеспечивать необходимый темп ускорения и частотный диапазон, удовлетворяя при этом компоновке магнитной структуры, требованиям по потребляемой мощности и приемлемым габаритам. И только в случае невозможности удовлетворения этих требований необходимо изменить конструкцию магнитной структуры.

Так, например, невозможность создания радиальных коаксиальных высокочастотных систем для компактных циклотронов с большим диаметром полюсов привела к созданию магнитных структур с разделенными секторами и использованию вертикальных коаксиальных линий или резонаторов.

Специфические условия при создании или реконструкции в.ч. систем компактных циклотронов требуют создания метода расчета мощностных и частотных параметров неоднородных по длине коаксиальных линий, обеспечивающих достаточную точность и возможность варьирования в процессе расчета геометрии линий для оптимизации ее параметров. Создание модели резонаторов может быть необходимо только после расчетной оптимизации.

В настоящей работе описана программа "LINE" для расчета резонансной ускоряющей структуры в виде укороченной емкостью дуанта радиальной коаксиальной линии.

Программа применима и для коаксиальных резонаторов других назначений. При составлении программы использовались преобразования, изложенные в работах /1,2/. Суть программы состоит в следующем.

Коаксиальная линия разбивается на "N" однородных участков с соответствующими волновыми сопротивлениями  $Z_{oi}$  и электрической длиной:

$$A_i = 2\pi L_i \lambda^{-1},$$

где  $\lambda$  - длина волны, а  $L_i$  - длина соответствующего отрезка /рис. 1/.

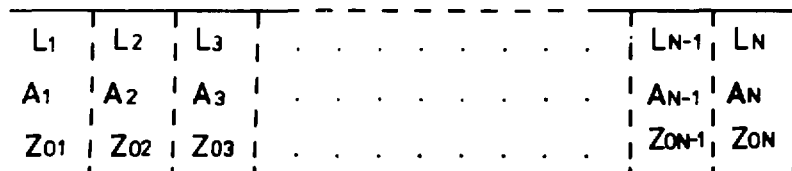


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема разбиения резонатора на участки с длиной  $L_i$ ; волновое сопротивление  $Z_{0i}$  и электрическая длина  $A_i$ ;  $i = 1 \dots N$ .

Расчет линии начинается с открытого конца. Можно показать, что входное сопротивление  $i$  этого участка будет:

$$Z_{вхi} = Z_{0i} [\operatorname{tg}(A_i + A'_i)]^{-1},$$

где  $A'_i$  - эквивалентная электрическая длина входного сопротивления  $(i-1)$  участка в терминах волнового сопротивления  $i$ -того участка.

$$A'_i = \operatorname{arctg}[Z_{0i} Z_{вхi-1}^{-1}].$$

Таким же образом можно получить рекуррентные формулы для амплитуды напряжения на  $i$ -том участке

$$V_i = V_{i-1} \cos(A_i + A'_i) \cos^{-1} A'_i,$$

где  $V_0$  - амплитуды напряжения на открытом конце дуанта. Соответственно амплитуда тока  $i$ -того участка

$$I_i = V_i Z_{0i}^{-1}.$$

При этом активные потери мощности на  $i$ -том участке определяются выражением:

$$P_i = R_i V_{i-1} (4Z_{0i} \cos^2 A'_i)^{-1} \{L_i + \lambda(4\pi)^{-1} [\sin 2A'_i (1 - \cos A_i) - \sin A_i \cos 2A'_i]\},$$

где  $R_i$  - активное сопротивление внутреннего и внешнего проводников.

Реактивная энергия, накапливаемая на  $i$ -том участке, определяется как:

$$W_i = 2\pi Z_{0i} P_i (\lambda R_i)^{-1}.$$

и соответственно добротность всей линии определяется выражением:

$$Q = \sum_{i=1}^N W_i (P_K + P_T + \sum_{i=1}^N P_i)^{-1},$$

где  $P_K$  и  $P_T$  - мощности, рассеиваемые в переходных конструктивных контактах и торцевой закорачивающей пластине соответственно.

Омические потери на контактных сопротивлениях перемещаемой закорачивающей пластины вычислялись по формуле:

$$P_K = I_K^2 R_n (\Pi_{нар}^{-1} + \Pi_{внутр}^{-1}),$$

где:  $R_n$  и  $I_K$  - сопротивление единицы длины контактов и ток через контакты соответственно, а  $\Pi_{нар}$  и  $\Pi_{внутр}$  - периметры внешнего и внутреннего проводников.

Оптимизация резонансной системы велась таким образом, чтобы плотность тока через контакты не превышала величины  $3,10^8$  А/м., что для точностей выполнения контактных поверхностей порядка  $5,10^{-3}$  м представляется наиболее приемлемой величиной. Использование контактов с линейной плотностью тока до  $7-8,10^8$  А/м требует точности выполнения контактных поверхностей на уровне  $5,10^{-4}$  м<sup>3,4/</sup>. В расчетах для вычисления потерь на контактах погонное сопротивление принималось равным  $6,10^{-4/5/0}$  м, хотя это, вероятно, завышенное значение.

Мощность активных потерь на плоскости закорачивающей пластины определялась по формуле:

$$P_T = 0,597 \cdot 10^{-5} I_{зак}^2 Z_{ОН} (\sqrt{\lambda})^{-1},$$

где  $I_{зак}$  - ток через закорачивающую пластину, а  $Z_{ОН}$  - волновое сопротивление последнего участка.

В программе также вычисляется шунтовое сопротивление и необходимое количество охлаждающей воды.

Положение закорачивающей пластины определяется изменением знака входного сопротивления какого-нибудь участка. В этом случае цикл останавливается, потом возвращается на шаг назад и вычисляется длина последнего участка.

Вся вычислительная часть оформлена как блок в основной программе и не меняется с изменением геометрии резонатора. Сама геометрия участка линии задается в подпрограмме максимально четырьмя параметрами, число которых зависит от конкретной геометрии поперечного сечения участка. Имеются области, в которых изменение параметров геометрии участков описывается некоторыми функциями. В подпрограмме задаются число и длина таких облас-

тей, а также соответствующие функции. Подпрограмма вычисляет волновое сопротивление  $Z_{oi}$  и активное сопротивление  $R_i$  участков разбиения. Для определения волнового сопротивления отдельных участков можно использовать данные работ<sup>1,6/</sup>, или более точные формулы, полученные в работе<sup>7/</sup> методом конформных отображений.

В качестве входных параметров основной программы вводятся частота и максимальное количество шагов.

Программа "LINE" занимает 20-30 Кбайт оперативной памяти с быстротой счета от 1 до 2 мин. Имеется возможность оперативно изменить геометрию линии. Измерения частотного диапазона на моделях и реальных дуантных линиях дают несовпадение с результатами расчетов лучше, чем 5%, причем контрольные измерения геометрических параметров показывают, что частично это несовпадение вызвано неточностью изготовления.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ В.Ч.СИСТЕМЫ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-400

Высокочастотная ускоряющая система циклотрона У-400 представляет собой два резонансных контура, каждый из которых представляет собой четвертьволновую коаксиальную линию, закороченную на одном конце и нагруженную емкостью дуанта угловой протяженностью  $42^\circ$  на другом. На каждом дуанте обеспечивается около 100 кВ амплитудного в.ч.напряжения. Изменение частот от 5,6 до 10,2 МГц осуществляется путем перемещения закорачивающих пластин.

Режим работы У-400 наиболее удобен на четных гармониках 2 и 4, так как при этом для обеспечения фазировки дуанты можно соединить в центре перемычкой и возбуждать резонаторы от одного в.ч.генератора. Ускорение на второй гармонике в диапазоне частот от 5,6 до 10,2 МГц позволяет ускорять до конечного радиуса ионы с  $A/Z$  от 6,2 до 11,7 с энергиями 15,8-4,8 МэВ/нуклон, а на четвертой гармонике с  $A/Z$  от 12,8 до 23,3 с энергиями 4 и 1,2 МэВ/нуклон соответственно.

Так как магнитное поле изохронного циклотрона У-400 сформировано до  $A/Z = 4$ , необходимо было расширить частотный диапазон в области более высоких частот, чтобы обеспечить ускорение ионов до более высоких энергий на второй гармонике в.ч.напряжения.

Было просчитано несколько вариантов изменения геометрии неоднородной части резонатора при условии неизменности хода закорачивающей пластины. Для моделирования и реализации выбран вариант изменений, представленный на рис. 2 как удовлетворяющий частотным, технологическим, конструктивным и мощностным условиям.

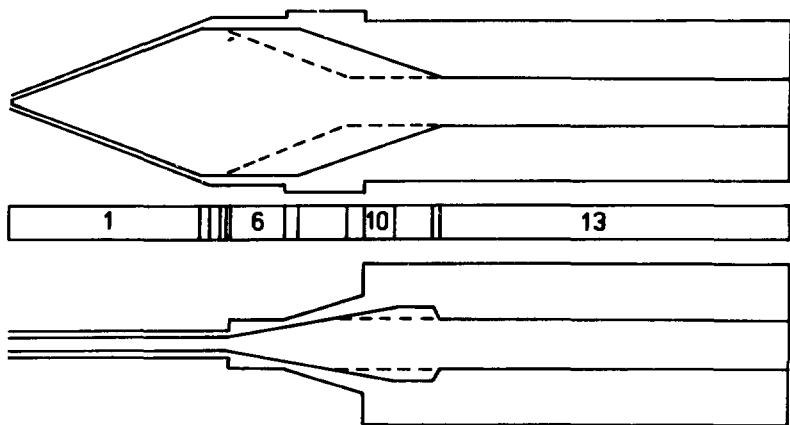


Рис. 2. --- - геометрия с частотным диапазоном от 5,6 до 10,2 МГц; — - модернизированный вариант с частотным диапазоном от 5,6 до 13,3 МГц.

Моделирование проведено на резонаторе циклотрона У-400 с помощью накладок. На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные зависимости резонансной частоты от положения закорачивающей пластины. На том же рисунке показана аналогичная кривая для резонатора до модернизации. Видно, что совпадение расчетных и экспериментальных результатов не хуже 5%.

Повышение верхней частоты до 13,3 МГц позволяет ускорять ионы до  $A/Z = 4,4$  с энергией до 27,8 МэВ/нуклон на второй гармонике в.ч.напряжения. Использование ускорения на первой гармонике нецелесообразно ввиду низкого набора энергии за оборот.

На рис. 4 показаны зависимости добротности и активных потерь в резонаторе от резонансной частоты для старого и модернизированного вариантов резонатора циклотрона У-400. Видно незначительное изменение потребляемой мощности  $P$  и добротности  $Q$  в результате оптимизации геометрии резонатора.

На рис. 5 показано распределение амплитуды в.ч.напряжения по длине резонансной линии при максимальных частотах 10,2 и 13,3 МГц, для старого и модернизированного варианта резонатора. Из рисунка видно, что увеличение величины спада амплитуды в.ч.напряжения в рабочей части дуанта незначительно и не должно сказываться на ухудшении условий ускорения и вывода.

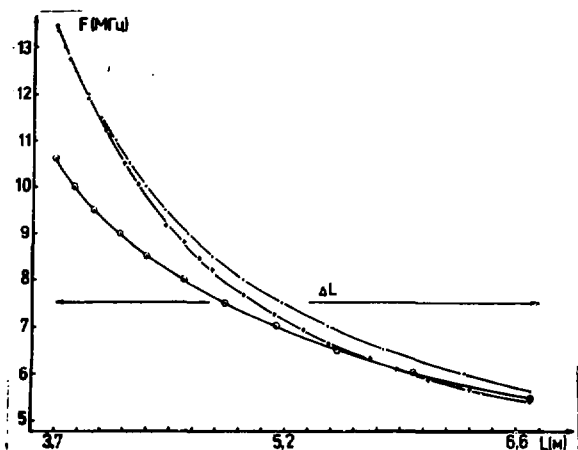


Рис. 3.  $\circ$  - частотный диапазон до модернизации,  $\bullet$  - частотный диапазон после модернизации /расчет/,  $+$  - частотный диапазон после модернизации /эксперимент/,  $\Delta L$  - диапазон движения закорачивающих пластин.

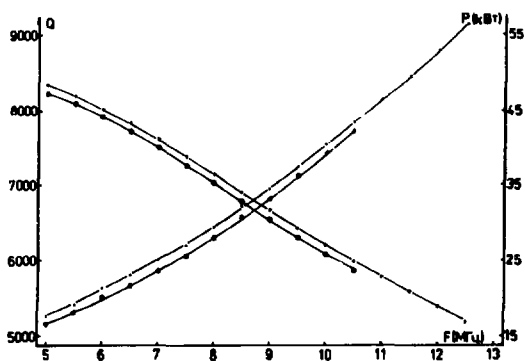


Рис. 4.  $\bullet$  - зависимость  $P=P(F)$  для резонатора со старой геометрией,  $\circ$  - зависимость  $P=P(F)$  для модернизированного резонатора,  $\bullet$  - зависимость  $Q=f(F)$  для резонатора со старой геометрией,  $+$  - зависимость  $Q=f(F)$  для модернизированного резонатора.

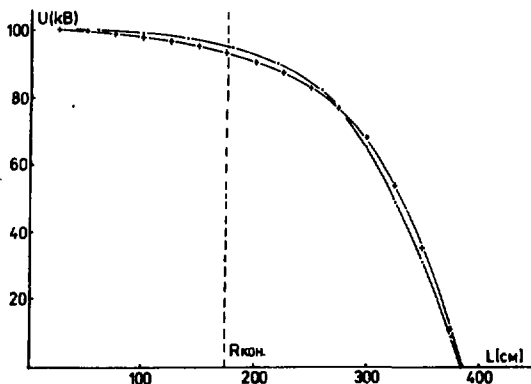


Рис. 5. • - для резонатора со старой геометрией на частоте 10,2 МГц, + - для модернизированного варианта резонатора на частоте 13,3 МГц.  $R_{\text{кон}}$  - конечный радиус ускорения.

### 3. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА ИЦ-100

С использованием программы "LINE" были рассчитаны резонаторы ускоряющей системы циклического имплантатора ИЦ-100, который был запущен в ЛЯР ОИЯИ в 1985 году. В этом случае магнитная структура также определяла требования к ускоряющей системе.

Для четырехсекторной магнитной структуры с диаметром полюсов 105 см., угловым раствором долин  $34^\circ$  и магнитным зазором в долине 110 мм, необходимо было создать ускоряющую структуру с рабочей частотой 10,25 или 20,5 МГц /2-я или 4-я гармоника ускоряющего напряжения соответственно/ и обеспечением темпа ускорения около 200 кВ за оборот с дуантами, расположенными в долинах. Для обеспечения приемлемых размеров резонансной системы расчеты велись для частоты 20,5 МГц /4-я гармоника/ и высокого волнового сопротивления однородного участка резонатора /120 Ом/.

Расчетным путем была проведена оптимизация высоты дуанта, геометрии переходного участка и соотношения диаметров штока и бака однородного участка коаксиальной линии. Предполагалось изменение частоты на 1 МГц перемещением гибкой закорачивающей пластины и подстройка в резонанс триммерами.



В табл. 1 приведены некоторые геометрические размеры коаксиальных ускоряющих линий ИЦ-100.

Таблица 1

Длина линии	- 1,901 м
Длина однородного участка	- 1,010 м
Диаметр бака	- 0,8 м
Диаметр штока	- 0,1 м
Расстояние дуант - верхняя плакировка	- 0,03 м
Угловая протяженность дуанта	- 31°
Ход движения закоротки	- 0,1 м

В табл. 2 даны основные высокочастотные характеристики резонаторов.

Следует отметить энергетическую экономичность спроектированной ускоряющей структуры. Так как удельная мощность, выделяемая во внешней цилиндрической части однородного участка /бака/, составляет величину  $2,2 \cdot 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>, то было рекомендовано и принято отсутствие принудительного охлаждения этого элемента линии.

Таблица 2

Параметр	Расчет	Эксперимент
Длина резонатора для частоты 20,62 МГц	1,932 м	1,902 м
Напряжение на дуантах	-	50 кВ
Добротность	5200	3800
Изменение частоты при движении закоротки на 100 мм	870 кГц	900 кГц
Активная мощность, выделяемая в одном резонаторе	3,4 кВт	4,65 кВт
Плотность тока через гибкие контакты	23 А/см	-

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bieth C. - Le Systeme Accelérateur du Ganil" - Ganil 78R/053/HF/02, Avril 1978.
2. Kwiatkowski S. - Booster Cavity 92 and 69 MHz - Triumpf 85-F-CYC/GEN, Booster, May 1985.

3. Bieth C., Ducoudrent B., Joubert A. et al. - Les Systemes Accelerateurs du Ganil - Ganil 80R/148/HF/23, October, 1980.
4. Pagani C., Camon J., Varisco G. - Very High Performance Sliding Short for RF Resonators Tuning - University of Milan and Unstotuto nazionale di fisica nucleare, Milan, Italy.
5. Плодукин Б.В. - Коаксиальные диапазонные резонаторы, М., Энергоиздат., 1956.
6. Мегла Г. - Техника дециметровых волн, Советское радио, 1958.
7. Tsung-Shan Chen - Determination of the Capacitance, Inductance and Characteristic Impedance of Rectangular Lines, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, p.510.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 июля 1987 года.

### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Гульбекян Г.Г., Иванов Э.Л.

9-87-495

Программа расчета неоднородных коаксиальных резонаторов и ускоряющих систем циклотронов У-400 и ИЦ-100

Дано описание программы расчета неоднородных коаксиальных резонаторов. Результаты расчета резонаторов циклотрона У-400 обеспечили возможность повышения энергии ускоряемых ионов до 27 МэВ/нуклон. Расчет ускоряющей системы циклического имплантатора ИЦ-100 позволил создать компактную конструкцию с малым потреблением высоко-частотной мощности.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Gulbekian G.G., Ivanov E.L.

9-87-495

Program for Computing Nonhomogeneous Coaxial Resonators and Accelerating Systems of the U-400 and IC-100 Cyclotrons

A computer code for computing nonhomogeneous coaxial resonators is described. The results obtained for the resonators of the U-400 cyclotron made it possible to increase the energy of accelerated ions up to 27 MeV/nucleon. The computations for the IC-100 cyclic implantator gave the opportunity to build a compact confinement with a low value of consumed RF power.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

<b>Индекс</b>	<b>Тематика</b>
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

15 коп.

**Редактор** Б. В. Колесова. **Макет** Н. А. Киселевой.

**Набор** О. В. Шестаковой, И. Г. Андреевой.

**Подписано в печать** 07.09.87.

**Формат** 60x90/16. **Офсетная печать.** Уч.-изд. листов 0,98.

**Тираж** 205. **Заказ** 39574.

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.**