

3-328



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 10830

ЗАПЛАТИН
Николай Леонтьевич

МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ И СИСТЕМЫ ВЫВОДА ПУЧКА
ДЛЯ ЦИКЛОТРОНОВ И ФАЗОТРОНОВ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ ПОЛЯ

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

академик АН Каз.ССР доктор технических наук

доктор технических наук

доктор физико-математических наук

Л.М.Неменов,

Е.С.Миронов,

В.П.Саранцев.

Будущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерной физики АН Каз.ССР.

Автореферат разослан " _____ 1977 года.

Защита диссертации состоится " _____ 1977 года в " _____ часов на заседании специализированного Совета Д-56/3 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь специализированного Совета при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов.

Наиболее перспективным направлением увеличения тока частиц в ускорителях на энергию протонов до 1 ГэВ является сооружение ускорителей с непрерывным (изохронные циклотроны) или почти непрерывным (фазотроны с пространственной вариацией магнитного поля) режимом работы.

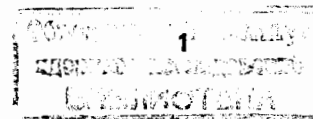
Идея использования азимутально-несимметричных магнитных полей в циклотронах была высказана Л.Томасом еще в 1938 году. Ее реализация позволила бы поднять предельную энергию ускоряемых протонов до (80-100) МэВ. Важным шагом в развитии идеи Томаса явилось предложение Д.Керста и др. о применении в циклических ускорителях циклотронного типа магнитных полей, напряженность которых периодически меняется как по азимуту, так и по радиусу. Преимущество таких полей заключается в том, что при относительно небольшой глубине вариации поля возможно увеличить предельную энергию циклотрона вплоть до энергии 1000 МэВ, характерной для протонных синхротронов.

В настоящее время проведены детальные исследования динамики частиц в полях с пространственной вариацией, построены десятки циклотронов. В Советском Союзе первый циклотрон радиально-секторного типа был запущен в 1959 году (*) в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова АН СССР.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с 1955 года под руководством члена-корреспондента АН СССР В.П.Джелелова и профессора В.П.Дмитриевского проводятся разработки ускорителей новых типов, использующих стационарные магнитные поля с пространственной вариацией. С участием автора диссертации в 1959 году был создан циклотрон с кругоспиральной структурой магнитного поля на энергию дейтронов 13 МэВ, а в период 1960-65 г.г. проведен комплекс работ по разработке и проектированию мезонной фабрики - релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 МэВ при токе ускоренного пучка 500 мкА.

Мезонные фабрики являются дорогостоящими ускорителями как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным расходам.

*) J. A. Zavenyagin, R. A. Metschcherov, E. S. Mironov, L. M. Nemenov and J. A. Kholmovskij. Proc. of the Intern. Conf. on High-Energy Accel. and Instr. CERN, 1959.



Именно это обстоятельство поставило на повестку дня необходимость реконструкции действующих синхротронов с целью повышения интенсивности пучка до (10-50) мкА, улучшения качества пучка и достижения эффективности вывода (50-70)%.

Настоящая работа посвящена исследованию и созданию магнитных систем и систем вывода для трех ускорителей, а именно:

1. Фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля - установка "Ф" (строится).

2. Электронной модели кольцевого циклотрона - ЭМКЦ (запущена в 1967 году).

3. Изохронного циклотрона - У-120М (запущен в 1976 году). Эти исследования выполнены в ЛЯП ОИЯИ под руководством и при непосредственном участии автора диссертации.

Диссертация состоит из введения, в котором проводится сравнение действующих, разрабатываемых и строящихся ускорителей в научных центрах разных стран мира; четырех разделов, объединяющих восемь глав; и заключения, включающего в себя основные выводы проведенной работы.

В первом разделе (I-II-III главы) рассматриваются общие вопросы, касающиеся сформулированной темы диссертации.

В первой главе этого раздела анализируются различные конфигурации магнитного поля, обсуждаются их особенности, дается связь между выбранной структурой поля и принятой схемой вывода ускоренного пучка из ускорителя.

Методы расчета магнитостатических полей описываются во II главе диссертации.

В Лаборатории ядерных проблем при участии автора разработана программа TRIMD, аналог широко известной программы TRIM, для расчета двумерных магнитостатических полей методом сеток с использованием векторного потенциала на нерегулярной треугольной сетке. Написанная программа использовалась для выполнения ряда практических расчетов. Расчеты кривых намагничивания и радиальных распределений поля электромагнита СП-57, в зазоре которого моделировалась магнитная система фазотрона с пространственной вариацией поля (установка "Ф"), показали, что точность расчетов составляет ~1%. С целью определения погрешностей, вносимых из-за неточности моделирования размеров ярма и положения катушек магнитной системы установки "Ф", были проведены расчеты радиального распределения поля в зазоре электромагнита Е-1 (уст."Ф")

и СП-57. Совпадение расчетных кривых с точностью ~0,5% в рабочем диапазоне радиусов позволило сделать вывод, что магнитопровод для рассматриваемых конфигураций не оказывает существенного влияния на распределение поля в зазоре электромагнита.

Анализ расчетных распределений магнитного поля от различных элементов магнитной системы изохронного циклотрона У-120М, полученных с помощью программы TRIMD, позволил оптимизировать параметры системы спиральных и кольцевых шимм с целью достижения максимально возможного энергетического диапазона и широкого набора ускоряемых частиц. Аналитические формулы расчета полей от шимм различной конфигурации (параллелепипед, цилиндры, кольца, спирали и др.), полученные в предположении равномерного намагничивания объема шимм, широко используются в данной диссертации.

Для рассматриваемых в диссертации ускорителей магнитное поле для средней плоскости записывается в следующем виде:

$$H(z, \varphi) = H(z) [1 + \varepsilon_N(z) \sin(\beta_N(z) - N\varphi)] \quad (1)$$

где $H(z)$ - среднее магнитное поле, $\varepsilon_N(z) = H_N(z)/H(z)$,

$$\beta_N(z) = \frac{z}{\lambda} - \text{вариация и фаза основной гармоники поля } H_N(z),$$

N, λ - периодичность и радиальный шаг структуры магнитного поля.

Особенности динамики частиц в заданном поле рассматриваются в первом параграфе III главы диссертации. Замкнутая орбита относительно радиуса R для частицы с импульсом $P = eH(R)RA$ может быть записана в виде

$$z = R + \varepsilon_N R \left\{ N^2 \Lambda \left[1 - \frac{2+n+m-\Lambda}{N^2 \Lambda} \right] \right\}^{-1} \sin(\beta_N - N\varphi) \quad (2)$$

где $n = \frac{z}{H} \frac{dH}{dz} \Big|_{z=R}$, $m = \frac{R}{\varepsilon_N} \frac{d\varepsilon_N}{dz} \Big|_{z=R}$,

$$\Lambda = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\varepsilon_N^2 (2+n+m)}{2N^2}}$$

*) В.И.Данилов, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбачко, Л.А.Саркисян. ОИЯИ, Р-344 и Р-409, Дубна, 1959.

**) В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.

Знание замкнутой орбиты позволяет определить требуемый закон изменения среднего магнитного поля по радиусу для изохронных циклотронов:

$$H(z) = \frac{H_0 \bar{\sigma}}{\Lambda \sqrt{1 - (z^2/z_\infty^2) \bar{\sigma}^2}}, \quad (3)$$

где $z_\infty = E_0/eH_0$, $\bar{\sigma} = 1 + \frac{\varepsilon_N^2}{4N^2 \Lambda^2}$.

Для ускорителей с постоянной вариацией магнитного поля ($\varepsilon = const$) выполняется условие $\Lambda \approx 1$. В этом случае пространственная устойчивость частиц описывается уравнениями Матве, а величины частот бетатронных колебаний могут быть найдены из приближенных выражений:

$$Q_z^2 \approx -n + \frac{\varepsilon_N^2}{2} + \left(\frac{\varepsilon_N R \beta_N}{N} \right)^2, \quad Q_z^2 \approx 1+n, \quad (4)$$

где $\beta_N' = \frac{d\beta_N}{dz} \Big|_{z=R}$.

Минимальная величина вариации магнитного поля, выше которой существует аксиальная устойчивость, определяется соотношением

$$\varepsilon_N = \frac{N}{R \beta_N} \sqrt{2n}. \quad (5)$$

В последующих двух параграфах этой главы рассматриваются различные методы вывода пучка. Заброс пучка в отклоняющее устройство в случае нерезонансных методов осуществляется за счет разделения последовательных оборотов замкнутых орбит на конечном радиусе ускорителя при сохранении качества внутреннего пучка. В ускорителях с пространственной вариацией магнитного поля при $\varepsilon_N \sim 1$ для создания эффективной системы вывода может быть использован эффект расширения замкнутых орбит за счет соответствующего выбора закона изменения вариации поля вдоль радиуса:^{*}

$$\frac{d\varepsilon_N}{dR} \approx -\frac{2+n}{R_0} \varepsilon_0 + \frac{2N^2 \Lambda_0}{R_0} (\Lambda - 1), \quad (6)$$

где индекс ноль относит величины к начальному радиусу изменения вариации поля.

Анализ резонансных методов вывода дан в конце главы. Приводятся формулы для расчета скорости увеличения амплитуд свободных радиальных колебаний.

* В.П.Дмитриевский. ОИЯИ, Р9-934I, Дубна, 1976.

Второй раздел диссертации посвящен разработке и моделированию магнитной системы (Углава) и системы вывода ускоренного пучка (Углава) для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля на энергию протонов $E_p = 680$ МэВ при токе ускоренного пучка до 50 мкА (установка "Ф").

В первом параграфе IV главы приводится оценка ожидаемой интенсивности пучка в фазотроне, излагаются основные соображения по выбору структуры магнитного поля, формулируются требования к точности его формирования. Показано, что для установки "Ф" периодичность и радиальный шаг структуры магнитного поля могут быть приняты равными $N = 4$, $\lambda = 15$ см при заданном минимальном зазоре между элементами магнитной системы ($2h_1 = 30$ см) во всей области за исключением центральной зоны ускорителя.

Магнитное поле фазотрона формируется в зазоре электромагнита ($\varnothing 700$ см, $\delta = 120$ см) синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Для выбранного значения конечного радиуса ускорения $r_k = 270$ см изменение среднего магнитного поля принято в форме:

$$H(z) = H_0 \exp(0,359 \xi^2 + 0,83 \xi^6 - 2,35 \xi^8 + 1,5 \xi^9 - 0,025 \xi^{10}), \quad (7)$$

где $\xi = \frac{z}{z_k}$, $H_0 = 11902$ Э - поле в центре системы.

Требуемая зависимость вариации поля найдена исходя из выражения (4) при удовлетворении условия $0 \leq Q_z \leq 0,2$ для $15 \text{ см} < r < 270 \text{ см}$. Максимальное значение амплитуды 4-й гармоники $H_4 = 3000$ Э достигается на радиусе $r = 180$ см, затем падает до $H_4 = 1600$ Э на конечном радиусе.

Предварительный выбор основных параметров магнитной системы базировался на расчетах полей от отдельных ее элементов в предположении равномерного намагничивания. Для уточнения этих параметров были проведены эксперименты с системой прямолинейных брусков, моделирующих вариацию спиральных шимм, а также набором кольцевых и одной парой спиральных шимм в зазоре электромагнита. На основании этого комплекса расчетных и экспериментальных работ были выбраны параметры модели магнитной системы установки "Ф" с коэффициентом подобия $K = 1/5,22$. Внешний вид полюсного наконечника модели изображен на рис. I.

В процессе формирования поля на модели необходимые изменения геометрии системы определялись следующим образом:

I) с помощью ЭВМ рассчитывались среднее поле и вариация поля

от малых элементов магнитной системы, определяющих предполагаемые изменения геометрии;

2) величины полей, полученные путем расчета, суммировались с соответствующими экспериментальными значениями для предыдущей геометрии системы;

3) размеры и форма малых элементов менялись в расчете до тех пор, пока не было достигнуто улучшения экспериментальных кривых;

4) производилось измерение поля для измененной геометрии, и весь цикл повторялся заново.

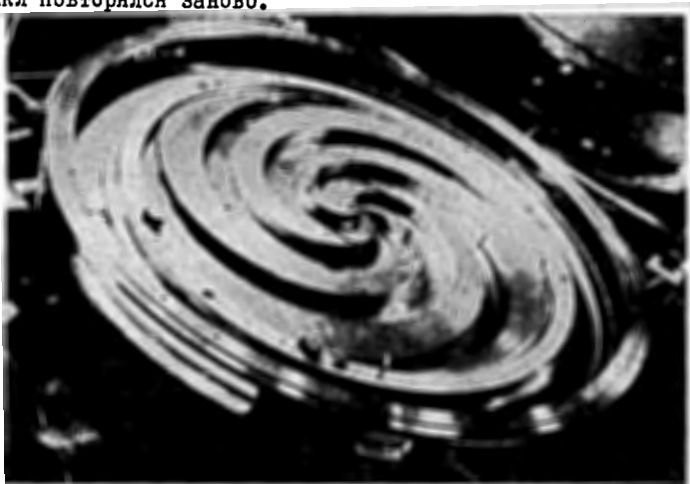


Рис.1. Модель магнитной системы установки "Ф".

В результате формирования магнитного поля модели с помощью системы спиральных и кольцевых шимм отклонение среднего поля от требуемого не превышает ± 70 Э, а амплитуда основной гармоники отличается от заданной на величину ~ 300 Э.

Для дальнейшего формирования среднего поля ускорителя в структуре системы предусмотрены элементы тонкой коррекции поля - четыре токовые обмотки и секторные шиммы. Эксперименты на модели с секторными шиммами показали возможность получения среднего поля в пределах ± 10 Э от требуемого.

Расчеты энергии E , частоты обращения ω и частот свободных колебаний Q_x и Q_z в зависимости от среднего радиуса равновесной

орбиты показали, что аксиальная ($0 < Q_z < 0,5$) и радиальная ($1 < Q_x < 2$) устойчивости частиц обеспечиваются вплоть до радиуса $Z = 274$ см, что соответствует максимальной энергии $E_p = 700$ МэВ.

Проблема высокоэффективного вывода является особенно важной для сильноточных фазотронов на энергию сотен мегаэлектрон-вольт, где ток внутреннего пучка будет составлять десятки микроампер.

Эффективность выводной системы существенно зависит от соотношения между величиной заброса и толщиной септума, а также от значений эмиттанса пучка. В расчетах системы вывода для установки "Ф" принято, что амплитуды бетатронных колебаний составляют $A_z \leq 3$ см и $A_x \leq 1,3$ см, а толщина септума равна $\delta = 4$ мм.

Выбор оптимальных параметров регенеративной системы раскачки проводился матричным методом с помощью программы MAXCOILA с использованием результатов расчетов параметров равновесной орбиты по программе CYCLOPS и траекторий большого числа частиц в системе раскачки по программе SIMPZ*. При этом в уравнениях движения учитывались только линейные члены разложения в ряд горизонтальных составляющих магнитного поля. Изменение энергии производилось дважды за оборот ($2 \Delta E = 100$ кэВ) на азимутах, отстоящих друг от друга на 180° .

Схема размещения элементов системы вывода пучка в камере фазотрона показана на рис.2, а их параметры приведены в таблице I.

Таблица I. Параметры системы вывода.

Элементы системы вывода	Азимутальная протяженность (град.)	Азимут. положение входа (град.)	Радиус входа (см)	ΔH (Э)	$\frac{d\Delta H}{dz}$ (Э/см)
Возбудитель	5,7	-11,0	266	-	310
Регенератор	5,7	50,0	269	-	270
Дополнительный регенератор	3,0	-5,0	272	-	350
Магнитный канал I-я секция (железно-токовая)	17,7	1,0	275,6	4700-4500	150-30
II-я секция (ферромагнитная)	4,5	19,75	279	4000	-100
III-я секция (ферромагнитная)	10,0	25,0	281,5	5400	-100
IV-я секция (ферромагнитная)	8,0	37,0	292	0	1000

* R.Cohen et al. IEEE Trans.on Nucl.Sc. NS-18, No.3, p.326,1971.

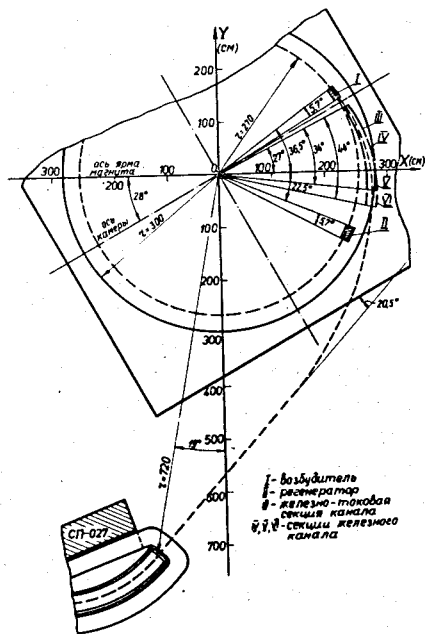


Рис.2. Схема размещения элементов выводной системы в камере ускорителя.

В результате моделирования процесса раскачки при равномерном распределении частиц по A_z и A_z получены зависимости эффективности заброса частиц в канал от величины среднего разделения орбит ΔZ_H и начальной энергии раскачки E_H для двух и трех локальных неоднородностей поля. В случае использования возбуждателя Р и регенератора R при оптимальном забросе $\Delta Z_H = 1,75$ см и $E_H = 660$ МэВ максимальный коэффициент заброса частиц в канал составляет 53%. Такая же эффективность заброса имеет место и при $E_H = 670$ МэВ, $\Delta Z_H = 1,73$ см.

Анализ Z-движения частиц на последних оборотах, непосредственно перед попаданием в канал, показывает, что расплывание пучка в Z-направлении объясняется приближением мгновенной частоты Q_z на орбитах к резонансному значению $Q_z = 0,5$. Для понижения частоты Q_z на последних оборотах предложено использовать допол-

нительную локальную неоднородность типа используемой в регенераторе, располагаемому на азимуте между возбудителем и входом в канал. Понижение частоты достигается за счет изменения среднего радиального градиента поля на орбите частицы.

Анализ дифференциальных эффективностей раскачки показывает, что наличие второго регенератора дает увеличение коэффициента вывода с 48% до 68%, т.е. в 1,4 раза, а для частиц с $A_z < 1,5$ см обеспечивает $\sim 100\%$ -ное попадание в канал.

Величины снижения поля в секциях канала подбирались путем расчета выводных траекторий, а градиенты и требуемые вертикальные и радиальные апертуры канала - из расчета огибающих пучка. В качестве исходных данных для проведения этих расчетов использовалось представление пучка на фазовых плоскостях (ZP_z) и (ZP_z) на входе в канал с величинами эмиттансов $\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 20 \pi$ мм·мрад.

В последующих параграфах главы У обсуждаются результаты по выбору параметров всех элементов системы вывода и моделированию магнитного поля этих систем.

Общий вид макета железно-токовой секции канала показан на рис.3. Секция состоит из ферромагнитной пластины, двух основных витков (септум, антисептум), по которым протекает ток, равный 11000 А, и двух корректирующих - с током 3100 А. Выбор столь высо-

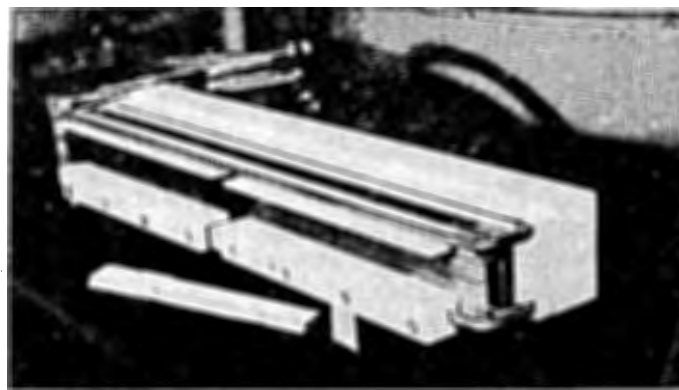


Рис.3. Макет железно-токовой секции канала.

кого значения тока в основной обмотке позволяет исключить использование изоляции на входной части септума, что является важным в условиях высокого уровня радиации, обусловленного попаданием ускоренных протонов (~25%) на септум. Предложенная конфигурация железо-токовой секции позволяет уменьшить магнитное поле фазотрона внутри секции на (4700-4500) Э, при этом максимальное возмущение поля в области последних оборотов циркулирующего пучка составляет ~30 Э. Искажения поля за счет ферромагнитных секций канала также не превышают этой величины.

В третьем разделе (VI-VII главы) диссертации излагаются результаты работы по созданию магнитного поля электронной модели кольцевого протонного циклотрона с жесткой фокусировкой (ЭМКЦ).

Разработка сильноточного протонного ускорителя "суперциклотрона" * на энергию 800 МэВ при интенсивности пучка (10-100) мА требует детального исследования как эффектов пространственного заряда, так и вопросов, связанных с необходимостью стопроцентного вывода пучка.

Для решения этих задач в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ была разработана и в 1967 году построена электронная модель кольцевого циклотрона (ЭМКЦ), параметры которой приведены в таблице II.

Если предположить, что ток пучка ограничивается эффектом поперечного расталкивания кулоновским полем, то соотношение между током в моделируемом протонном ускорителе и током в электронной модели можно записать в форме

$$\frac{I_p}{I_e} = \frac{H_p \Delta Z_p}{H_e \Delta Z_e}, \quad (8)$$

где ΔZ - высота пучка.

Среднее значение магнитного поля ЭМКЦ на радиусе инжекции выбрано равным $H = 14$ Э; если принять $H_p = 4270$ Э, $\Delta Z_p = 2 \Delta Z_e$, $I_p = 100$ мА, то для моделирования эффектов пространственного заряда необходимо в ЭМКЦ получить ток ускоренных электронов $I_e = 0,7$ мА. Требуемые зависимости среднего магнитного поля $H(z)$ и амплитуды гармоники $H_g(z)$ описываются выражениями (3) и (4). Точность формирования среднего поля при максимальном наборе энергии за оборот $2eV_0 = 1,5$ кэВ должна составлять $\Delta H/H = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$.

* В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга.
Р9-7833, ОИЯИ, Дубна, 1974.

Таблица II. Параметры электронной модели кольцевого циклотрона

Энергия ускоренных электронов	$E_K = 408,8$ кэВ
Энергия инжекции	$E_H = 5,7$ кэВ
Радиус инжекции	$Z_H = 18,0$ см
Радиус конечной орбиты	$Z_K = 100,7$ см
Радиус, соответствующий бесконечной энергии	$Z_\infty = 121,23$ см
Напряженность магнитного поля в центре	$H_0 = 14,06$ Э
Напряженность магнитного поля на радиусе инжекции	$H(z_H) = 14,01$ Э
Периодичность структуры магнитного поля	$N = 8$
Радиальный шаг структуры магнитного поля	$\lambda = 8$ см
Вариация поля на конечном радиусе	$\xi(z_K) = 1,062$
Частота аксиальных колебаний	$Q_z(z) = 1,1^{+0,2}_{-0,05}$
Частота радиальных колебаний	$1,04 \leq Q_z \leq 2,0$
Максимальный набор энергии за оборот	$2 eV_0 = 1,5$ кэВ

Создание требуемой конфигурации магнитного поля электронной модели циклотрона осуществляется двумя независимыми системами обмоток - гармонической и концентрической.

Требуемая зависимость амплитуды основной гармоники поля вдоль радиуса создается за счет изменения вертикального зазора $2h$ между витками гармонической обмотки, представляющей собой систему двух симметрично расположенных относительно средней плоскости ускорителя проводников, уложенных по линиям спирали Архимеда и дугам окружностей R_1 и R_2 (рис.4). Выбор параметров вариационной обмотки проводился с помощью расчетов по аналитическим формулам на ЭВМ магнитных полей для заданной конфигурации токовой обмотки, а также для бесконечной системы прямолинейных токов.



Рис.4. Полюс магнитной системы ЭМЦ.

Формирование среднего поля в заданных допусках осуществлялось с помощью 13 аксиально-симметричных обмоток грубой коррекции. Определение необходимых величин токов в этих обмотках проводилось на ЭВМ методом наименьших квадратов.

Первая гармоника радиальной компоненты поля, величиной $0,132\text{ Э}$, обусловленная магнитным полем Земли, была скомпенсирована до значения $0,016\text{ Э}$ во всем диапазоне рабочих радиусов за счет двух пар взаимно перпендикулярных прямолинейных проводников с одинаковым направлением тока, располагаемых параллельно средней плоскости модели.

На рис.5 показана фотография следа пучка, полученная на кварцевой мишени, перемещаемой по радиусу кольцевой зоны ускорителя. Пучок без существенных потерь проходит до предельного радиуса и размывается в зоне радиусов (106–108) см. Минимальное ускоряющее напряжение на дуанте в эксперименте составляло $0,7\text{ кВ}$, что соответствует 600 оборотам пучка ускоряемых электронов, необходимым для достижения ими конечного радиуса. Вертикальный размер пучка ΔZ на большей части радиусов не превышает 5 мм.

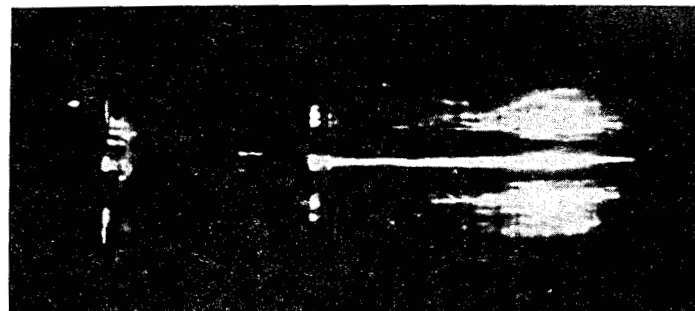


Рис.5. След электронного пучка на флуоресцирующей мишени, перемещаемой вдоль радиуса.

На основании полученных результатов экспериментального исследования пучка в электронной модели можно сделать вывод о возможности достижения тока пучка величиной (300–400) мА в протонных ускорителях на энергии 800 МэВ.

Как упоминалось выше, в ускорительных установках с вариацией магнитного поля (циклотронах, фазотронах) при уменьшении глубины вариации вдоль радиуса ускорителя происходит расширение замкнутых орбит, что может быть использовано для эффективного вывода частиц из ускорителей с большой ($\xi \sim 1$) величиной вариации магнитного поля.

Для экспериментального исследования этого эффекта на электронной модели кольцевого циклотрона создана система, позволяющая регулировать характер изменения вариации на конечных радиусах.

Для обеспечения прироста радиуса орбиты на величину $\Delta r = 3\text{ см}$ необходимо сформировать вариацию магнитного поля на $\tau = 97,5\text{ см}$ так, чтобы производная вариации вдоль радиуса составляла величину $-2,8\text{ Э/см}$ при примерно постоянной фазе максимума основной гармоники поля. Кроме того, изохронное магнитное поле должно быть сформировано с точностью $2,5 \cdot 10^{-3}$, а низшие гармоники поля не должны превышать величин $H_{12} = 0,05\text{ Э}$, $H_{22} = 0,15\text{ Э}$, $H_{12} = 0,015\text{ Э}$.

Необходимый спад амплитуды 8-й гармоники поля достигался с помощью дополнительной вариационной обмотки (рис.4), выполненной из двух ветвей, сдвинутых на полпериода системы ($22,5^\circ$), с противоположными направлениями текущих в них токов, так что при условии

идентичности выполнения этих ветвей среднее поле от обмотки равно нулю.

Результаты экспериментального наблюдения эффекта расширения замкнутых орбит представлены на рис.6, где приведены зависимости от радиуса: тока Δi , фиксируемого дифференциальной мишенью ($\Delta Z = 2$ мм), и полного тока J ($\Delta Z = 26$ мм).

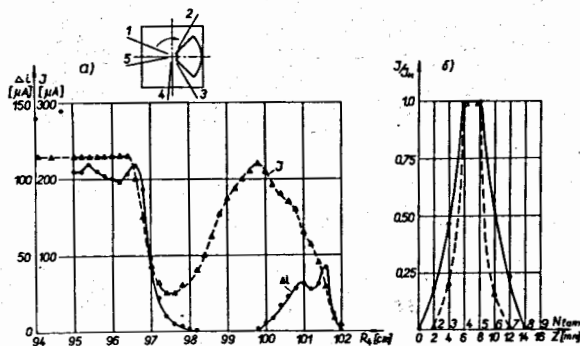


Рис.6. а) Зависимость тока ускоренных электронов от радиуса для дифференциальной мишени Δi ($\Delta Z = 2$ мм) и интегральной мишени J ($\Delta Z = 26$ мм); б) Распределение плотности электронного тока по высоте пучка.

Из приведенного рисунка видно, что величина ΔZ составляет 4 см, причем зона полного отсутствия тока на данном азимуте равна 2 см. Ток пучка отдельной орбиты ($R_k = 99,8$ см), измеренный интегральной мишенью, равен току до момента расширения орбиты, что свидетельствует об отсутствии потерь тока в процессе расширения замкнутой орбиты. Интеграл функции тока от радиуса отдельной орбиты, измеренного дифференциальной мишенью, также равен току внутреннего пучка. В зоне полного отсутствия тока $R_k = (98-99,8)$ см устанавливалась перегородка с радиальной протяженностью 3 мм. Перемещение перегородки в указанной зоне не внесло изменений в величину суммарного тока, измеряемого на $R_k = 99,8$ см. На рис.6б показано распределение плотности частиц по вертикали, снятое с помощью многоламельной мишени. Видно, что эффект расширения сопровождается некоторым уширением пучка по вертикали.

В четвертом разделе диссертации описаны результаты по разработке магнитной системы и формированию поля изохронного циклотрона У-120М для ускорения p, d, α, He_3^{+2} в широком диапазоне энергии. Магнитное поле ускорителя формировалось с помощью системы спиральных шимм и концентрических обмоток, расположенных в зазоре между крышками камеры, равном 22 см.

Анализ движения частиц в центральной области и исследование фокусирующих свойств спиральной структуры магнитного поля показали, что оптимальным является выбор спиральности $\lambda = 4,5$ см при $N = 4$.

Выбор крутоспиральной структуры поля позволил отказаться от использования громоздких вариационных обмоток. Такая возможность основывается на широком допуске по аксиальной жесткости частиц ($0 < \beta_z \leq 0,5$), что может быть использовано для работы при различных индукциях магнитного поля. Полученный интервал магнитных полей $H = (10-18)$ кЭ соответствует этому допуску.

Для обеспечения аксиальной фокусировки зазор между спиральными шиммами, принятый в центральной области равным $2h_1 = 8,2$ см, с ростом радиуса увеличивается до $2h_1 = 11,2$ см. Такая конфигурация шимм позволила разместить в большом интервале радиусов концентрические обмотки с минимальным зазором между ними.

Параметры магнитной системы циклотрона были выбраны на основании большего объема модельных исследований и численных расчетов методом сеток магнитного поля спиральных шимм разных конфигураций. Предложенный способ, использующий специальные аксиальные пазы в спиральных шиммах, оказался достаточно эффективным для уменьшения в несколько раз относительного разброса среднего поля в центральной области при изменении внешнего поля в заданных пределах (10-18) кЭ. Общий вид нижнего полюсного наконечника показан на рис.7.

Формирование и анализ магнитного поля ускорителя проводились для трех уровней возбуждения основной обмотки электромагнита: $I_0 = 610, 350, 175$ А, соответствующих получению энергии протонов $E_k = 39,9; 30,0; 13,0$ МэВ на конечном радиусе $Z_k = 51$ см. Анализ основных характеристик магнитного поля циклотрона, сформированного с помощью ферромагнитных элементов магнитной системы в зазоре электромагнита, показал, что максимальный разброс среднего магнит-

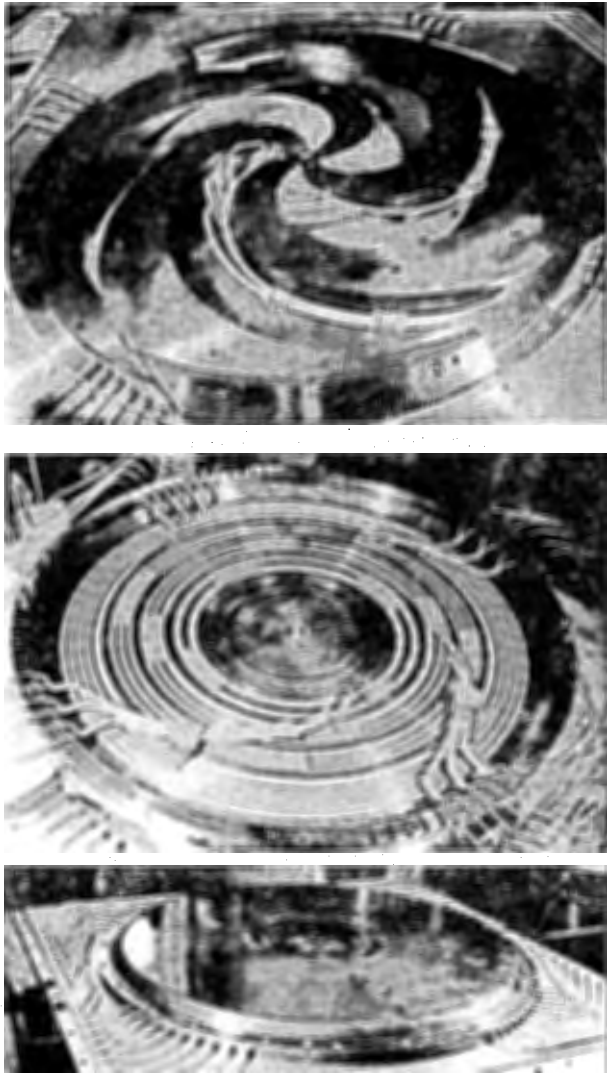


Рис.7. Магнитная система циклотрона У-120М.

ного поля относительно характерной точки $z=16$ см составляет 200 Э в центре и 1000 Э на конечном радиусе $Z_K=51$ см.

В результате формирования изохронного среднего магнитного поля с помощью токовых обмоток отклонения поля от требуемых зависимостей в центральной области $Z < 4$ см составили величины $\pm 3 \cdot 10^{-3}$, а в диапазоне радиусов $Z=(4-51)$ см отклонения не превышали $\pm 6 \cdot 10^{-4}$ от требуемых. Расчеты фазового режима работы ускорителя показали, что смещение фазы пучка относительно ускоряющего напряжения не будет превышать $\pm 5^\circ$, а полученные характеристики пространственной устойчивости частиц Q_z и Q_r будут находиться в заданных пределах.

Далее обсуждаются вопросы допусков на элементы магнитной системы. Приводятся расчетные и экспериментальные оценки возмущений магнитного поля, обусловленные характерными отклонениями от заданных параметров при изготовлении магнитной системы циклотрона.

В последнем параграфе этой главы кратко описаны результаты расчетного и экспериментального исследований возможности применения электромагнитной секции в системе вывода пучка из циклотрона У-120М. Приводятся результаты модельного исследования макета железо-токовой секции, особенностью которой является обмотка из алюминиевого проводника с оксидной изоляцией, обеспечивающей высокие эксплуатационные характеристики в полях радиационного излучения.

Физический запуск изохронного циклотрона У-120М осуществлен в июне 1976 года для двух режимов ускорения протонов: $E_p=40$ МэВ, $E_p=30$ МэВ.

Исследования характеристик пучка (рис.8) показали:

- 1) потери пучка по радиусу отсутствуют;
- 2) вертикальный размер пучка составляет ~ 5 мм;
- 3) отклонение центра пучка от средней плоскости ускорителя не превышает ± 2 мм;
- 4) смещение центра орбит изменяется в пределах $(0,5-1)$ см.

Данные характеристики пучка хорошо соответствуют ожидаемым результатам, полученным из анализа сформированного магнитного поля.

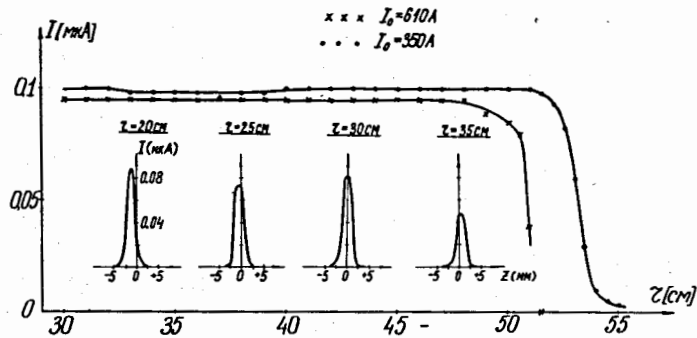


Рис.8. Характеристики ускоренного пучка протонов.

Основные результаты работ, изложенных в диссертации, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Для сооружения протонных циклических ускорителей непрерывного или квазинепрерывного действия на малые (до 100 МэВ) и средние (до 800 МэВ) энергии необходимо использовать структуры магнитного поля с пространственной вариацией.
2. Определяющим требованием при выборе структуры магнитного поля, наряду с обеспечением пространственной и фазовой устойчивости, является высокоэффективный вывод пучка из камеры ускорителя.
3. Разработаны новые методики расчета и формирования магнитных полей для циклических ускорителей, обеспечивающие устойчивое изохронное ускорение в широкой области энергий.
4. Проведен комплекс расчетных и экспериментальных работ по обоснованию структуры магнитного поля фазотрона с пространственной вариацией (установка "Ф"), выбору параметров магнитной системы ускорителя и формированию поля на модели системы. Реконструкция действующего синхроциклотрона ОИЯИ ($E_p = 680$ МэВ, $I_p = 2,3$ мкА) в фазотрон обеспечит ток ускоренных протонов $I_p = 50$ мкА, что при разработанной системе вывода пучка (~70%) увеличит плотности пучков вторичных частиц в сотни раз.
5. Исследован, путем численного математического моделирования на ЭВМ, регенеративный метод раскачки радиальных колебаний частиц в зоне вывода фазотрона. Получены оптимальные параметры для случая двух (возбудитель, регенератор) и трех (+ дополнительный

ный регенератор) локальных неоднородностей поля. Максимальная эффективность заброса частиц в канал составила 68% для эмиттансов циркулирующего пучка, равных $\epsilon_x = 500$ мм·мрад, $\epsilon_z = 20$ мм·мрад. Показано, что при уменьшении эмиттансов (путем, например, формирования пучка в центральной области) возможно существенное увеличение эффективности вывода.

6. Предложен, разработан и экспериментально исследован электромагнитный канал нового типа с толщиной септума, равной 4 мм.

7. Решен широкий круг вопросов по разработке магнитной системы электронной модели циклотрона с жесткой фокусировкой (ЭМКЦ), обеспечивающей создание магнитного поля ускорителя, максимальная величина которого составляет несколько десятков эрстед при допуске, равном десятым долям процента. На основании результатов экспериментального исследования на электронной модели эффектов пространственного заряда показана принципиальная возможность достижения токов в протонных ускорителях величиной (300-400) мА при энергии до 1 ГэВ.

8. Разработана система формирования специального закона изменения вариации поля на конечных радиусах электронной модели кольцевого циклотрона для исследования эффекта расширения замкнутых орбит в ускорителе. Экспериментально показано, что этот эффект может быть использован для 100%-ного вывода пучка из циклотронов с глубокой вариацией поля ($E \sim I$).

9. Проведены расчетные и модельные исследования по выбору параметров магнитной системы изохронного циклотрона У-120М на базе электромагнита классического циклотрона У-120 для ускорения p , d , α -частиц и ионов He^{+2} в широком диапазоне энергий:
 $E_p = (12,5-40,0)$ МэВ; $E_d = (8,4-20,3)$ МэВ; $E_\alpha = (16,8-40,6)$ МэВ;
 $E_{He^{+2}} = (16,9-54,4)$ МэВ.

Показано, что максимальные значения и диапазон энергий для частиц заданного типа при относительно малом диаметре полюсов электромагнита ($\Phi 120$ см) стали возможными без применения вариационных обмоток, благодаря использованию крутоспиральной структуры магнитного поля.

10. Осуществлен физический запуск циклотрона для двух режимов ускорения протонов: $E_p = 40$ МэВ и $E_p = 30$ МэВ.

Основные материалы диссертации опубликованы в виде препринтов и сообщений ОИЯИ, статей в трудах всесоюзных совещаний и международных конференций.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.А.Саркисян.
ОИЯИ, Р9-3448, Дубна, 1967.
2. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский,
Б.И.Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, М.М.Комочков,
А.А.Кропин, Л.И.Лapidус, А.И.Мухин, В.С.Роганов.
ОИЯИ, Р-32II, Дубна, 1967;
Sixth Intern.Conf.on High Energy Accel.Cambridge
(1967), p.303-314.
3. В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, С.Б.Ворожцов, А.А.Глазов, Ю.Н.
Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Н.И.Дьяков, Б.И.
Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.
Онщенко, Н.И.Полумордвинова, В.И.Прилипко, Т.М.Прилипко,
Л.А.Саркисян, М.М.Семенов, Ю.И.Сусов, П.Т.Шишлянников.
АЭ, т.25, 539 (1968); ОИЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968.
4. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский,
Б.И.Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, М.М.Комочков,
А.А.Кропин, Л.И.Лapidус, А.И.Мухин, В.С.Роганов.
ОИЯИ, 9-395I, Дубна, 1968.
5. С.Б.Ворожцов, Н.И.Дьяков, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, 9-45I7, Дубна, 1969.
6. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский,
Б.И.Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, М.М.Комочков,
А.А.Кропин, Л.И.Лapidус, А.И.Мухин, В.С.Роганов.
АЭ, т.27, вып. I (1969), с.16-22.
7. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.К.Лыткин.
ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.
8. Ю.Г.Аленицкий, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.
Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга,
А.А.Кропин, Д.Л.Новиков, Е.Схвабе.
ОИЯИ, 9-5292, Дубна, 1970.
9. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.А.Саркисян.
Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц,
т. I, Изд. ВИНТИ, Москва, 1970, с.256-262.
10. С.Б.Ворожцов, Л.Т.Закамская, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, Р9-50I2, Дубна, 1970.
11. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин.
Материалы рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М.
ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971.
12. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, Р9-5590, Дубна, 1971.
13. В.В.Ахманов, Ф.Е.Гугнин, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Е.Схвабе.
ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971.
14. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.К.Лыткин.
Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных час-
тиц, т. I, М., "Наука", 1972, с.165-167.
15. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин.
ОИЯИ, Р9-624I, Дубна, 1972.
16. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.Ф.Чеснов.
ОИЯИ, Р9-624I, Дубна, 1972, с.123-130.
17. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, Р9-624I, Дубна, 1972, с.26-33.
18. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, Р9-74I2, Дубна, 1973.
19. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, Г.П.Лещенко,
А.Ф.Чеснов. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям
заряженных частиц, т. II, М., Наука, 1973, с.99.
20. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, Г.П.Лещенко, А.Ф.Чеснов.
ОИЯИ, Р9-6880, Дубна, 1973.
21. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.Ф.Чеснов. Авторское свиде-
тельство СССР № 399087, кл H05h7/10 от 9.08.71 г. Бюлле-
тень ОИПОТЗ, 1973, № 38, стр. 175.
22. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов.
ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, с.82-92.
23. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Н.А.Морозов.
ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, с.48-6I.
24. А.Т.Василенко, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский,
Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга.
ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, с.22-33.
25. А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин, А.Г.Комиссаров, Н.А.Морозов,
Е.В.Самсонов, П.Т.Шишлянников.
ОИЯИ, Р9-8256, Дубна, 1974.
26. A. T. Vasilenko, N. L. Zaplatin et al.
JINR, B9-8443, Dubna, 1974.
27. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга.
ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.

28. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов.
ОИЯИ, Р9-8257, Дубна, 1974.
29. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин.
ОИЯИ, 9-9034, Дубна, 1975.
30. А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин, В.И.Лепилов, А.Ф.Чеснов.
ОИЯИ, Р9-9119, Дубна, 1975.
31. А.Т.Василенко, А.А.Глазов, В.П.Джелепов, Ю.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолотчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Калиниченко, В.В.Кольга, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко, Н.И.Полумордвинова, Е.В.Самсонов, П.Т.Шишлятников.
Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.205, М., "Наука", 1975;
IЗВЕ Trans.Nucl.Sci. V NS-22, No.3, p.1862-65, 1975.
32. Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов.
ОИЯИ, Р9-9023, Дубна, 1975.
33. Ю.Г.Аленицкий, Д.П.Василевская, Н.Л.Заплатин, С.А.Ивашкевич, Ли Зун, Н.А.Морозов, П.Т.Шишлятников.
ОИЯИ, Р9-10091, Дубна, 1976.
34. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов.
ОИЯИ, Р9-10090, Дубна, 1976.
35. В.В.Ахманов, Н.Л.Заплатин, А.Ф.Чеснов.
ОИЯИ, Р9-10306, Дубна, 1976.
36. Ju.G.Alenitskiy, S.V.Vorozhzov, N.L.Zaplatin. Proc.of the Conf.on the Computation of Magnetic field.Oxford,1976.
37. Ю.Г.Аленицкий, В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, Д.П.Василевская, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, Л.Г.Денисова, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин и др.
ОИЯИ, Р9-10383, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1977 года.