

С 3454

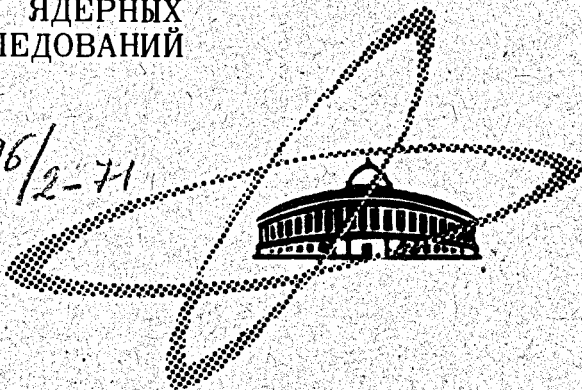
3/1-71

В-451

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1396/2-71



P9-5669

С. Б. Ворожцов, Н. Л. Заплатин

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛОТРОНА

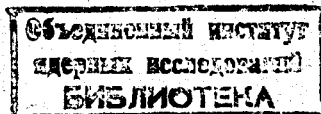
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1971

P9-5669

С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛОТРОНА



В работе описаны исследования, связанные с созданием магнитного поля моноэнергетического циклотрона^{/1/}. Требования к магнитному полю и некоторые результаты моделирования поля изложены в^{/2,3/}. На рис. 1-4 представлены экспериментальные результаты моделирования поля на секторном электромагните в масштабе 1:10. Как видно из рис. 2, характер среднего поля существенно меняется при перестройке уровня возбуждения в предельном случае от протонной изохронной зависимости к дейтонной. Основным недостатком конфигурации ярма магнита в начале исследований (1 вариант ярма - рис. 5, азимутальная протяженность полюсного наконечника $\alpha(r) = 42,5^\circ$) были недопустимо малые значения флаттера F в обоих предельных режимах возбуждения (рис. 1). Требования к величине флаттера $0,67 \leq F \leq 0,9$ во всем диапазоне радиусов.

При уменьшении угловой протяженности полюсных наконечников в центре удалось поднять значение флаттера, однако требование $F \geq 0,67$ не было выдержано для $r = r_H = 5,4$ см и наблюдалось существенное снижение среднего поля в районе инжекции (рис. 2), что видно из сравнения кривых азимутального распределения поля (рис. 3).

Дальнейшее увеличение флаттера происходило при введении второго обратного ярма в центральной области из-за увеличения амплитуды азимутального распределения и более крутого спада поля (рис. 3). Однако среднее поле несколько уменьшилось в зоне инжекции.

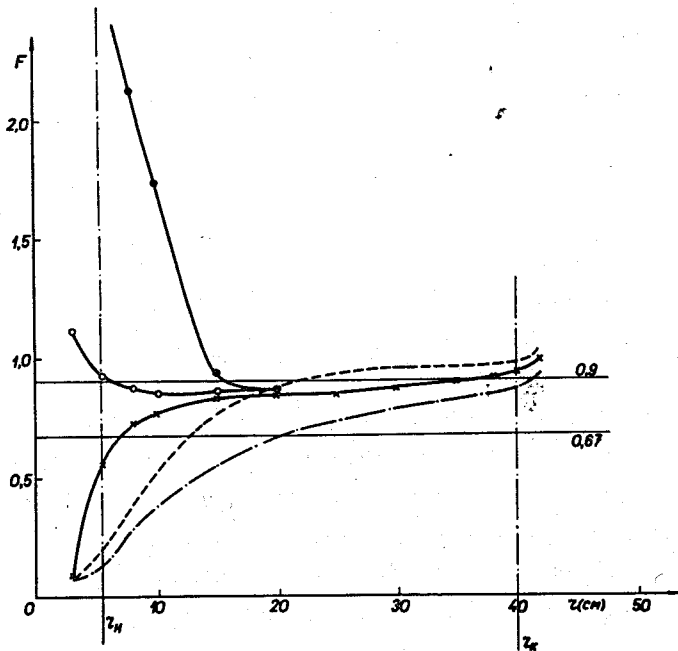


Рис. 1. Зависимость флаттера от радиуса для различных экспериментов.
 ----- I вариант ярма, $\alpha(r) = 42,5^\circ$; $\times \times \times \times$ II вариант ярма,
 уменьшение $\alpha(r)$; $\circ \circ \circ$ центральное ярма и II вариант основ-
 ного ярма; $\bullet \bullet \bullet$ экранирование обмоток, $\Delta = 16$ мм, II вариант
 ярма; - - - - I вариант ярма, $\alpha(r) = 42,5^\circ$, протоны.

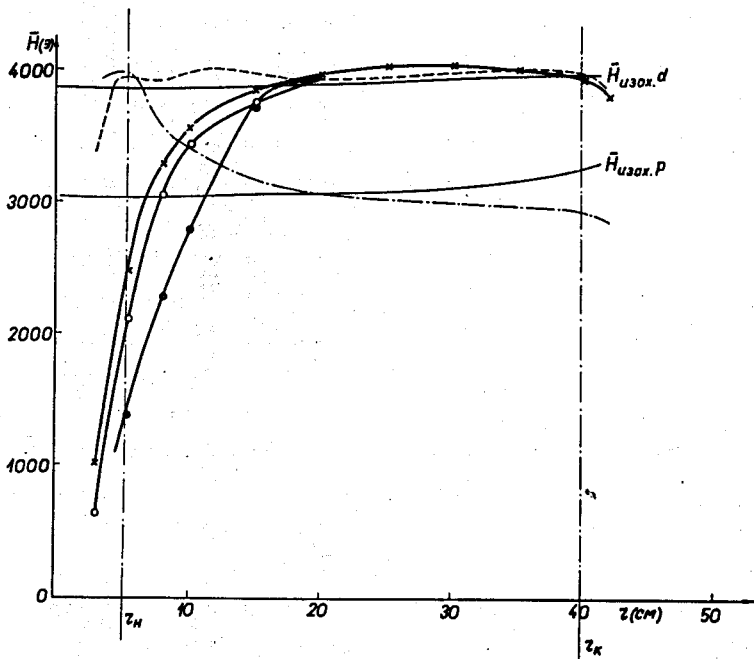


Рис. 2. Зависимость среднего поля от радиуса для различных экспериментов. Обозначения на рис. 1.

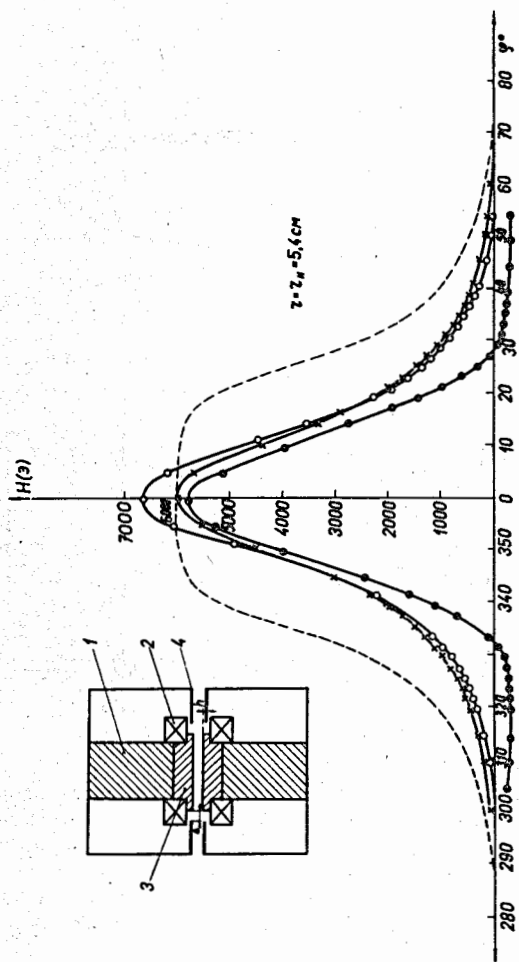


Рис. 3. Азимутальные распределения поля для радиуса инъекции и схема экранирования обмоток. Обозначения (рис. 1) и 1 - ярмо, 2 - обмотка, 3 - полюсной наконечник, 4 - экран.

Единственной возможностью увеличения флаттера является применение так называемых магнитных "пробок" (рис. 3)^{4,5/}, позволяющее менять крутизну спада азимутального распределения в зависимости от зазора между экраном и полюсом Δ при одновременном уменьшении влияния на форму спада уровня возбуждения магнита.

При этом относительное уменьшение среднего поля меньше соответствующего изменения флаттера F .

При измерении кривой намагничивания электромагнита на начальной стадии исследований (рис. 5) оказалось, что магнитопровод обладает относительно большим магнитным сопротивлением при необходимой величине возбуждения обмоток (143% от сопротивления зазора). Для локализации области насыщения магнитопровода были предприняты расчёты на ЭВМ эквивалентной нелинейной электрической цепи, моделирующей магнитные свойства начальной конфигурации электромагнита. Вертикальное сечение магнита (рис. 5) разбивалось на прямоугольные области (до 100 областей) по возможности одинакового размера. Каждая такая область считалась узлом эквивалентной электрической цепи, соединенной через 4 или более магнитных сопротивления со смежными областями. При вычислении величин сопротивлений связи считалось, что в пределах каждой области магнитная проницаемость μ однородна и учитывалась площадь перпендикулярного плоскости чертежа сечения магнита, отделяющего одну область от другой.

В эквивалентную цепь включились также сопротивления потоков рассеяния и выпучивания. Медианная плоскость считалась плоскостью равного магнитного потенциала (заземления, например).

Подключались эквивалентные ЭДС величиной $JW/2$ для каждой электрической линии, пересекающей плоскость, проходящей через обмотку возбуждения. Для заданного начального распределения μ рассчитывали линейную в этом случае электрическую цепь методом узловых потенциалов^{6/}. Определяя магнитные потоки через границы смежных областей, по заданной характеристике материала электромагнита мы вычисляли новое распределение μ . При этом использовался прием недорелаксации нового значения μ с фактором 0,1 для обеспечения сходимости итерационного процесса. При $\frac{\Delta\mu}{\mu} = 0,01$ решение считалось полученным.

Результаты расчёта начальной конфигурации магнита показали, что для выделенной области (рис. 5) имеет место насыщение ($\mu \approx 14-19$), что объясняет поведение кривой намагничивания и зависимости $H(r)$ вдоль средней линии полюсов магнита (рис. 4). После незначительного усиления ярма в области насыщения и использования второго ярма в центре ситуация существенно улучшилась ($\mu = 76-111$). Изменения характера кривой $H(r)$ вдоль средней линии свидетельствуют о меньшем влиянии на зависимость среднего поля от радиуса уровня возбуждения магнита при перестройке на ускорение различных частиц.

Магнитное сопротивление магнитопровода в этом случае составляет 68% сопротивления зазора.

В заключение можно отметить, что использование усиленного ярма магнита позволило улучшить стабильность относительной зависимости среднего поля от радиуса при необходимой перестройке уровня возбуждения. Использование экранов обмоток создало запас по величине флаттера в зоне инжекции, что позволяет увеличить угловую протяженность полюса для поднятия среднего поля в этой области. Тонкое шиммирование среднего поля будет осуществляться секторными обмотками.

Авторы благодарны Р.Р. Газизову за помощь в проведении расчётов и экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. А.А. Глазов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3932, Дубна, 1968.
2. С.Б. Ворожцов, Б.И. Замолдчиков, Н.Л. Заплатин. Материалы рабочего совещания по моноэнергетическому циклотрону. Препринт ОИЯИ, 13-4496, Дубна, 1969, стр. 81.
3. Д.П. Василевская и др. Материалы рабочего совещания по моноэнергетическому циклотрону. Препринт ОИЯИ, 13-4496, 88, 1969.
4. С.М. Braams. Nucl.Instr.and Meth., 26, 83 (1964).
5. H.A. Enge. Int.Symp. on Magn. Technology. p.84 (1965). Stanford University, Stanbord, California.
6. Ю.М. Гришин, В.И. Дворецкий, А.И. Родионов, О.А. Тюриков. Препринт ОИЯИ, 11-4588, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

4 марта 1971 года.

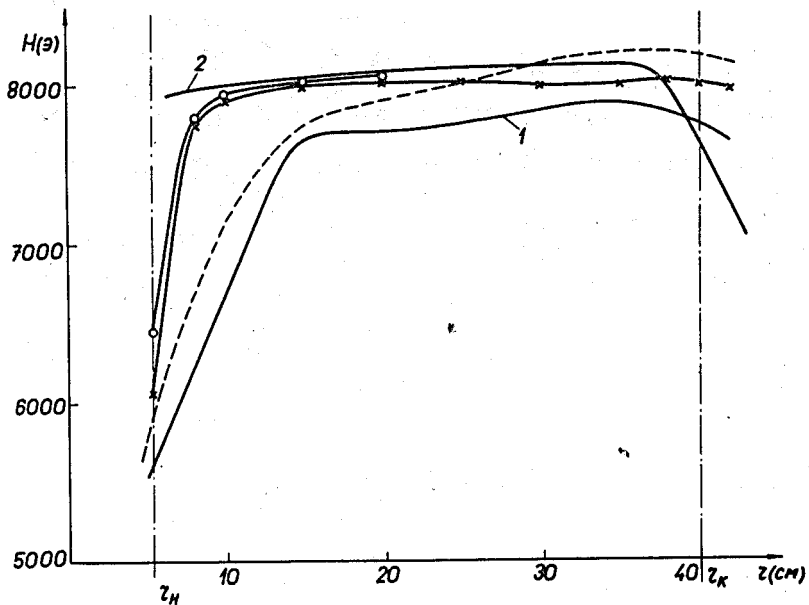


Рис. 4. Распределения поля вдоль средней линии полюсного наконечника. Обозначения (рис. 1) и 1 - расчёт I варианта ярма и $\alpha(r)=42,5^\circ$. 2 - расчёт с центральным ярмом, II варианта основного ярма и уменьшением $\alpha(r)$ в центре.

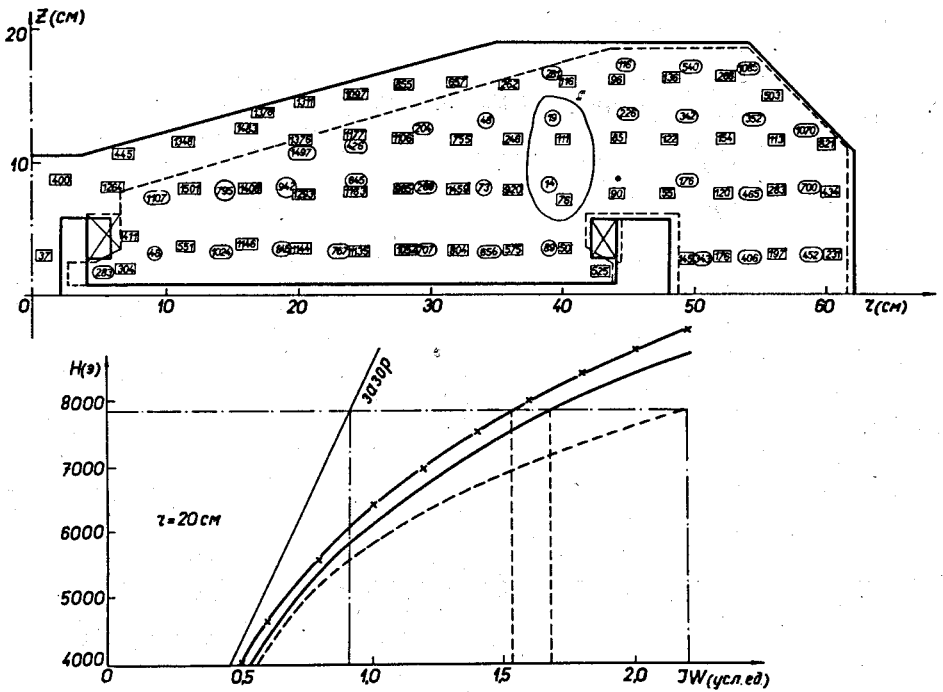


Рис. 5. Расчётные значения магнитной проницаемости μ двух конфигураций секторного магнита, экспериментальные кривые намагничивания. Обозначения (рис. 1) и [76] - μ для конфигурации с центральным ярмом, 76 - μ для конфигурации с ярмом I - варианта, $\alpha(r) = 42,5^\circ$.