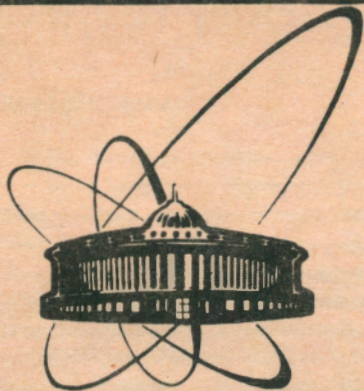


92-379



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P1-92-379

С.В.Андреев, С.Б.Ворожцов, С.И.Какурин,
В.Г.Кривохижин, Л.А.Меркулов, Ю.Л.Обухов,
В.А.Панасик, И.А.Савин, А.А.Фещенко,
Ю.А.Шишов, И.П.Юдин

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
ТОРОИДАЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА СТОРС
Результаты расчетов

1992

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в инклюзивных реакциях глубокоэластичного рассеяния лептонов на нуклонах информация, получаемая о характеристиках налетающего и рассеянного лептонов, достаточна для определения структурных функций нуклонов.

После проведения экспериментов по глубокоэластичному рассеянию на СПС ЦЕРН и в ФНАЛ стало ясно, что дальнейшие исследования структуры нуклонов на фиксированных мишенях при энергиях до 2000 ГэВ (СПС ЦЕРН, ФНАЛ, УНК) одновременно с увеличением статистики требуют существенного уменьшения систематических ошибок, главный источник которых — неточности характеристик частиц.

Спектрометр с тороидальным магнитом распределенного типа, успешно использовавшийся *BCDMS* — коллаборацией^[1], является наиболее удобным для этой цели, т.к. обеспечивает высокую (70-100%) и однородную эффективность вплоть до максимально возможных значений Q^2 ; длинная мишень гарантирует высокую светимость установки и, таким образом, большую статистическую обеспеченность данных даже в случае использования водородных мишеней; дает возможность одновременного набора данных на мишенях разного вещества, что существенно снижает систематические ошибки измерений.

Однако, с другой стороны, главными ограничениями в экспериментах, где использовались железные магниты, являются конечное разрешение и трудности выполнения калибровок.

Прогресс, достигнутый в последнее время по разработке и изготовлению сверхпроводящих магнитных систем, позволяет создавать сверхпроводящие тороидальные магниты с воздушным зазором. Последние обеспечивают достаточную величину интеграла поля и точную калибровку спектрометра и, таким образом, снимают главное ограничение железных тороидов. С учетом этих обстоятельств было подготовлено предложение по сооружению сверхпроводящего тороидального спектрометра (СТОРС)^[2] для проведения прецизионных измерений структурных функций в пучках мюонов. Схема такого спектрометра представлена на рис.1. Основой этого спектрометра является сверхпроводящая магнитная система (СПМС), которая состоит из сверхпроводящего тороидального магнита (СПТМ) и подсистем: электрических питания и защиты, криогенной, вакуумной, автоматизированных измерений, контроля и управления.

В данной работе представлены расчет конструкции магнита, расчеты магнитной индукции и сил, действующих на элементы магнита, требования к прочности и жесткости несущих элементов конструкции магнита и соответствующие расчеты.

1. СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

1.1. Схема системы

Сверхпроводящая магнитная система состоит из сверхпроводящего тороидального магнита и подсистем: электрических питания и защиты, криогенной, вакуумной, автоматизированных измерения, контроля и управления.

Ориентировочные размеры и основные параметры СПТМ представлены на рис.2—3 и в табл. 1. СПТМ состоит из трех модулей длиной по 12 м и наружным диаметром 5 м. Два первых (со стороны входа первичного пучка мюонов) имеют внутреннюю апертуру с радиусом $\approx 0,45$ м, а последний $\approx 0,1$ м.

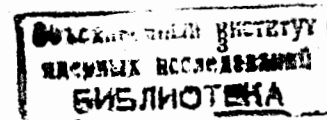
Каждый модуль содержит 8 одинаковых прямоугольных обмоток, соединенных силовыми тягами в единую тороидальную конструкцию (рис.2). Вид на модуль с торца показан на рис.3а, сечение обмотки — на рис.3б. Проводник 1 уложен в каркас 2, размещенный в вакуумном кожухе 3. Внешний теплоприток ограничен многослойной вакуумной изоляцией или азотным экраном 4. Обмотка, состоящая из нескольких десятков витков проводника 1, замкнута с помощью эпоксидного компаунда в каркасе 2 вместе с трубкой 5 для охлаждения гелием. Радиальные ponderomotorные силы, действующие на обмотку, воспринимаются тягами 6. В третьем модуле ближе к оси модуля части обмоток опираются на силовую трубу. Модули также связаны между собой "холодными" силовыми тягами. Каркасы обмоток подвешиваются внутри вакуумных оболочек, например, с помощью тангенциальных растяжек, расположенных рядом с внешними силовыми тягами (не показано), по 16 растяжек с каждого конца модуля. Передняя часть обмоток первого модуля удерживается от перемещений в осевом направлении с помощью 8 или 16 продольных тяг, расположенных вдоль горизонтальной части обмоток внутри вакуумного кожуха.

1.2. Проводник

Конструкция и параметры шины представлены на рис.4 и в табл.2. Состоящая из проводов диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м транспонированная шина стабилизирована высокочистым алюминием. Соединение сверхпроводников с алюминиевой матрицей достигается либо в процессе совместной экструзии, либо с помощью пайки.

Количество проводов диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м выбрано с учетом величины максимальной индукции B_{max} в обмотке. Нижеприведенные расчеты (см. раздел 2) показали, что в первых двух модулях $B_{max} = 3,6$ Тл, в третьем — $B_{max} = 4,3$ Тл. Причем эти величины получены при условии, что ток сосредоточен в проводах диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м, т.е. на ширине транспонированной шины. Если же считать, что ток распределен по всей шине ($3 \cdot 10^{-2}$ м в данном случае), то величины B_{max} получаются существенно меньше. Далее принимаем, что критический ток шины должен быть примерно в 2 раза выше номинального. Это обеспечивает более надежную работу магнита.

Длина входящего в СПТМ (3 модуля) провода диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м составляет 1,45 тыс.км. С учетом технологических отходов (при изготовлении вначале скрученной и затем стабилизированной шины) и брака необходимо приобрести примерно на 25 % больше, то есть 1,8 тыс.км (табл.3).



Вес входящей в магнит 48 км шины равен ≈ 19 т, в заказываемых 55 км ≈ 22 т. С учетом 10% технологического запаса необходимый вес алюминия составит около 17 т.

1.3. Подсистемы

1.3.1. Электрический источник питания и защиты

Принципиальная схема подсистемы каждого модуля дана на рис.5. Параметры источника питания: максимальный ток 12,5 кА, напряжение 48 В.

Устройство электрической защиты состоит из детектора 6 появления нормальной зоны в обмотке магнита 5, двух коммутаторов силового тока 2 и 3 и резистивных поглотителей 4 запасенной в магните энергии. В качестве коммутаторов можно использовать тиристорные или вакуумные выключатели.

1.3.2. Криогенная и вакуумная подсистемы

Принципиальная технологическая схема криогенной и вакуумной систем СПМС представлена на рис.6.

Предполагается использование криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5 мощностью 1600 Вт. При необходимости дополнительный жидкий гелий будет подаваться из цистерн общей емкостью 10 м³.

1.3.3. Автоматизированные системы измерения, контроля и управления

Автоматизированная система управления (АСУ), базирующаяся на ПЭВМ типа IBM AT 386, должна способствовать надежной эксплуатации СПМС при минимальных затратах и количестве обслуживающего персонала. Ожидается, что за работой СПМС может следить один оператор. Однако КГУ должен обслуживать довольно многочисленный персонал.

Таблица 1

Основные параметры магнита

Количество обмоток в модуле	8
Длина модуля	12 м
Максимальный радиус обмотки	2,5 м
Минимальный радиус обмотки для	
модуля первого типа	0,54 м
модуля второго типа	0,2 м
Количество слоев алюминиевой шины в сечении обмотки	70
Толщина алюминиевой шины	$4,4 \cdot 10^{-3}$ м
Ширина алюминиевой шины	$3 \cdot 10^{-2}$ м
Толщина сверхпроводящего слоя шины	$1,7 \cdot 10^{-3}$ м
Ширина сверхпроводящего слоя шины для	
модуля первого типа	$12,3 \cdot 10^{-3}$ м
модуля второго типа	$14,0 \cdot 10^{-3}$ м

Внутренний радиус кривизны криволинейных	0,5 м
участков обмотки	700 кА
Величина тока в обмотке	0,7 м
Расстояние между модулями	2
Количество модулей первого типа	1
Количество модулей второго типа	
Максимальная индукция в обмотке	
модулей первого типа	3,6 Тл
модуля второго типа	4,3 Тл
Длина шины в модуле	16 км
Длина шины в магните	48 км
Количество проводов	
в модуле первого типа	29
в модуле второго типа	33
Длина провода	
в модулях первого типа (2 × 460 км)	920 км
в модуле второго типа	530 км
Длина провода в магните	1450 км
Вес магнита	150 т

Таблица 2

Параметры проводника

Размеры поперечного сечения шины	
без изоляции	$(4 \times 30) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
в изоляции	$(4,4 \times 30,4) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
Стабилизирующий алюминий	99,995 %
Критический ток	20 кА
Диаметр проводов	$8,5 \cdot 10^{-4}$ м
Количество проводов	
в передних модулях	29
в конечном модуле	33
Количество жил в проводе	2970

Таблица 3

Основные допущения, сделанные при расчете количества провода диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м

Критический ток провода при максимальной индукции в обмотке	
переднего модуля при 3,6 Тл	700 А
конечного модуля при 4,3 Тл	600 А
Отношение критического и номинального тока в шине	2
Длина шины в магните	48 км

Длина заказываемой шины (запас 15 %)	55 км
Длина провода в магните	1450 км
Длина заказываемого провода (1450 км × 1,25)	1800 км

2. РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛ В ТОКОНЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

2.1. Метод вычисления

В основу программы MSTORS для расчета пространственного распределения магнитного поля в подобном рода конструкциях положены структурные подпрограммы из комплекса расчетной программы MAGSYS^[3], способные учитывать вклад в поле от прямолинейных и криволинейных брусков с прямоугольным сечением. В нашем случае поле токовой обмотки вычисляется как сумма вкладов от составляющих ее областей с известными аналитическими выражениями распределения поля, определяемыми законом Био-Савара. Криволинейные участки обмотки аппроксимировались ломаной кривой, включающей в себя шесть прямолинейных отрезков. Программа MSTORS включает в себя алгоритм вычисления суммарного поля от всех токонесящих областей магнита. В дальнейшем условие разбиения криволинейных участков на ряд прямолинейных отрезков должно согласовываться с условием достижения необходимой точности вычислений магнитного поля в окрестности этих участков.

2.2. Магнитное поле спектрометра

В процессе исследования были рассмотрены два варианта сверхпроводящего безжелезного магнита, из которых состоит весь комплекс тороидального спектрометра и характеристики которых представлены в таблице 1.

Распределения азимутальной составляющей магнитного поля по радиусу при различных углах φ в медианной плоскости ($z = 0$) для двух вариантов модулей представлены на рис.7—8.

Видно, что азимутальная неоднородность поля на радиусах вблизи токовых проводников достигает значительной величины. Это обстоятельство приведет к затруднению обработки экспериментальной информации и, соответственно, увеличит затраты компьютерного времени на одно событие.

Простой способ улучшения однородности азимутальной составляющей поля — это увеличение числа обмоток. Расчет показывает, что дисперсия поля при переходе от 8 к 12 обмоткам может быть снижена на 25—50 % для азимутальной составляющей (среднее ее значение остается практически неизменным) и на 20—30 % для радиальной составляющей (с соответствующим уменьшением ее среднего значения). Однако стремление к сохранению максимального значения аксептанса спектрометра и минимизации стоимости магнитной системы побуждает ограничиться восемью обмотками.

Пространственное распределение составляющих поля B_φ и B_r в медианной плоскости для первого типа модуля можно видеть на рис.9—10. Заметная неоднородность явно прослеживается в областях, непосредственно примыкающих к токовой обмотке.

Наиболее неоднородные участки распределения составляющих магнитного поля присутствуют в краевых областях модулей, что можно видеть на рис.11—13. Так как само конструктивное присутствие обмотки уменьшит рабочую область спектрометра на 10 градусов, то эти рисунки соответствуют началу этой рабочей области по φ .

Что же касается поля вне модуля, то оно довольно резко спадает как по радиусу по всей длине магнита, так и по оси z его торцевой части. Это можно видеть на рис.14—15.

Согласно [2], калибровка поля должна быть выполнена с точностью, лучшей, чем $3 \cdot 10^{-4}$. Поэтому вычисления окончательной карты поля для обработки экспериментальной информации должны быть выполнены с двойной точностью. Если иметь в виду получение полной карты поля всего спектрометра, включающего все три модуля, то для этого необходимо затратить порядка 90 часов машинного времени на ЭВМ VAX-8350.

А на рис.16—17 приведены интегральные характеристики B_φ — составляющей поля (поворотная сила) для различных сечений по φ и по z .

2.3. Расчет действующих на обмотку пондеромоторных сил

Расчет действующих на обмотку пондеромоторных сил производился как определением суммарной силы от всех шин, входящих в эту обмотку, так и из представления всего сечения обмотки в виде сплошной сверхпроводящей шины.

Такой подход оправдан и при определении основных характеристик распределения составляющих магнитного поля, так как качественный характер распределений всех компонент поля и действующих суммарных пондеромоторных сил от этого не изменится, а реальное рабочее поле в любом случае должно определяться с необходимой точностью с целью устранения источников систематических ошибок.

Значения пондеромоторных сил, действующих на единицу длины прямолинейных аксиальных и радиальных участков обмотки, выражены в единицах [МН/м] и представлены в таблице 4 для случая, когда расстояние между модулями равно 0,3 м. Места возникновения этих сил и их направления изображены на схеме взаимного расположения трех модулей магнита спектрометра на рис.18.

Таблица 4

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
0,51	0,19	1,02	0,35	0,37	0,332	0,331	0,35

Что касается радиальных частей обмоток, то они испытывают неравномерное усилие по всей длине этого отрезка, что непосредственно связано с неоднородным распределением поля по радиусу модуля. Как правило, на краях радиальных прямолинейных участков шины эти усилия возрастают приблизительно на 40—80 % по

сравнению с усилиями в центре этих участков обмотки. В таблице 4 для радиальных участков указаны усредненные по длине значения сил на единицу длины этих отрезков.

Наиболее напряженными с точки зрения возникающих пондеромоторных усилий являются криволинейные участки, где максимальные значения этих сил в 1,37 раз выше тех значений, которые возникают в центре прямолинейных аксиальных участков. Существующие при этом значения напряженности поля для ближайшего к оси аксиального участка первого типа модуля следующие: а) на наружной поверхности шины со стороны оси — 1,773 Тл; б) на поверхности шины с противоположной стороны обмотки — 3,129 Тл.

При соответствующем порядке рассмотрения действующих сил для криволинейного участка, прилегающего к этому аксиальному отрезку этого же типа модуля, все будет выглядеть так: а) на наружной поверхности обмотки — 1,65 Тл; б) на внутренней поверхности обмотки — 3,341 Тл.

Для аксиального участка второго типа модуля аналогичные характеристики будут соответствовать значениям 1,27 Тл и 3,72 Тл.

Эти величины (особенно максимальное по модулю значение напряженности магнитного поля 3,72 Тл) необходимы для выбора критического значения тока в сверхпроводнике, с чем связан непосредственный выбор необходимого количества сверхпроводника для обмотки. Для внутреннего аксиального участка обмотки максимальное по модулю значение составляющей поля внутри токовой зоны можно оценить из рис.19.

Так как модули всего комплекса спектрометра расположены друг за другом на расстоянии 0,3—0,7 м, то между ними заметно ощущается влияние поля одного модуля на поле другого, что приводит к ослаблению величин действующих пондеромоторных сил в этом пространстве. Все это приводит к эффекту отталкивания одного модуля от другого.

При увеличении зазора между модулями до величины 0,5 м эффект отталкивания ослабляется приблизительно в 3 раза.

Кроме того, равнодействующие сил, действующих на внешний и внутренний прямолинейные аксиальные участки, направлены к центру и равны соответственно 3,33 МН для первого типа модуля и 8,63 МН для второго типа модуля.

2.4. Оценка возникающих усилий при наличии конструктивных погрешностей

Что же касается сил азимутального характера, действующих на обмотку, то из-за симметрии модулей они равны нулю. При расчете предполагалось наличие идеальной намотки слоев обмотки, что автоматически также приводит к отсутствию азимутальных сил. Но если все же смещение хотя бы одного слоя шины, принадлежащего любому (верхнему или нижнему) аксиальному участку обмотки первого типа модуля, и произойдет на величину порядка 0,002 м, то это вызовет появление азимутальной силы 0,0629 МН. Необходимо отметить, что появившиеся в процессе сборки магнита отклонения от симметрии также автоматически приведут к появлению азимутальных сил. В наиболее напряженном состоянии находится нижний прямолинейный ак-

сиальный участок обмотки, расположенный в непосредственной близости от оси. В зависимости от характера отклонений возможны следующие ситуации:

1) при смещении плоскости обмотки вокруг оси магнита на $\alpha = 0,1^\circ$ (рис.20б) максимальное отклонение нижнего участка обмотки от его идеального состояния составит $1,45 \cdot 10^{-3}$ м и возникшая азимутальная сила будет равна $1,2 \cdot 10^{-3}$ МН/м;

2) при изгибе нижнего аксиального участка обмотки вокруг своей оси на $\beta = 1^\circ$ (рис.20в) максимальное отклонение будет уже равно $2,42 \cdot 10^{-3}$ м и величина азимутальной силы соответственно будет равна $0,8 \cdot 10^{-3}$ МН/м;

3) при совместном присутствии впереди рассмотренных отклонений (рис.20г) максимальное смещение нижнего аксиального участка обмотки составит $3,87 \cdot 10^{-3}$ м и величина возникшей азимутальной силы практически суммируется — $2,06 \cdot 10^{-3}$ МН/м.

Всякие другие возможные комбинации отклонений (рис.20д и 20е) практически также приводят к суммированию действия азимутальных сил.

Всевозможные отклонения при сборке конструкции магнита приведут к появлению помимо нежелательных сил азимутального характера и к изменению величины магнитного поля во всем пространстве магнита. Желательно оценить степень изменения составляющих магнитного поля ($\eta = dB_\varphi/B_\varphi$) в свете особо жестких требований, предъявляемых к точности вычисления самого магнитного поля. Предварительные оценки показывают, что наибольшие изменения в магнитном поле вызывают отклонения, связанные с нижним аксиальным участком обмотки. В первом приближении величины изменения магнитного поля пропорциональны величинам отклонений и по своему характеру их можно классифицировать в следующем порядке:

1) Увеличение радиального размера обмотки на величину $2 \cdot 10^{-3}$ м. Характер относительного изменения поля в области магнита в этом случае представлен на рис.21, а количественные величины этих изменений можно оценить из рис.22—23;

2) Смещение нижнего аксиального участка обмотки по радиусу на величину $2 \cdot 10^{-3}$ м (рис.20а). Степень относительного изменения поля представлена на рис.24, количественные оценки этих изменений видны на рис.25—26;

3) Сдвиг плоскости обмотки на угол $\alpha = 0,135^\circ$ (рис.20б), что соответствует максимальному смещению края нижнего участка обмотки на величину $2 \cdot 10^{-3}$ м. Характер относительного изменений состояния поля представлен на рис.27, количественно все это можно оценить из рис.28—29;

4) Изгиб нижнего прямолинейного аксиального участка обмотки вокруг своей оси на угол $\beta = 0,744^\circ$ (рис.20в), что соответствует максимальному смещению края этого участка обмотки на величину $2 \cdot 10^{-3}$ м. Картина возникших относительных изменений в поле представлена на рис.30, количественно все это отображено на рис.31—32;

5) Случай непараллельности верхнего и нижнего прямолинейных аксиальных участков обмотки, когда смещение одного края относительно другого составляет $2 \cdot 10^{-3}$ м. Общая картина относительного изменения поля в медианной плоскости магнита представлена на рис.33, характерные количественные оценки этих изменений можно видеть на рис.34—35.

2.5. Аппроксимация магнитного поля STORS

При использовании магнита необходимо знать поле в произвольной точке рабочей области магнита. Исходная программа расчета дает некоторую пространственную сетку значений поля, причем время счета каждой точки порядка 10 секунд. Поэтому

необходимо найти точную аппроксимацию магнитного поля по дискретной пространственной сетке значений с целью быстрого нахождения поля в любой точке. Опробованы методы аппроксимации с помощью полиномов Чебышева и интерполяция кубическими сплайнами. Написаны рабочие программы вычисления магнитного поля в произвольной точке рабочей области магнита спектрометра APRSTOR и SPLSTOR. Проведены также оценки точности и время вычисления поля для одной (произвольной) точки.

2.5.1. Пространственная сетка поля

Исходные данные аппроксимации представляют собой вычисленные значения трех компонент поля B_x , B_y и B_z на трехмерной неравномерной сетке φ, z, r (угол, смещение вдоль оси и смещение по нормали к оси). Эти данные хранились упакованными в шестерки чисел ($\varphi, z, r, B_x, B_y, B_z$) в формате F10.3 для φ, z, r и в формате E16.6 для тройки B_x, B_y, B_z . На оси z узлы сетки были расположены следующим образом:

$$z = 0 \div 4,9; 4,9 \div 5,4; 5,4 \div 6,0 \text{ (м)}.$$

Шаг по z составлял $h=0,7$ м для интервала $0 \text{ м} \leq z < 4,9 \text{ м}$, $h = 0,25$ м для интервала $4,9 \text{ м} \leq z < 5,4 \text{ м}$ и $h = 0,05$ м для интервала $5,4 \text{ м} \leq z \leq 6,0 \text{ м}$.

Сетка была составлена для значений φ , представленных в виде следующей последовательности:

$$\varphi = 0^\circ; 0,25^\circ; 0,5^\circ; 1,0^\circ; 1,5^\circ; 2,0^\circ; 2,5^\circ; 5,0^\circ; 7,5^\circ; 12,5^\circ; 17,5^\circ \text{ и } 22,5^\circ.$$

По радиусу для модуля первого типа шаг разбиения сетки был переменным и в зависимости от азимута менялось число интервалов разбиений по схеме:

1) для $0^\circ \leq \varphi \leq 2,5^\circ$ имели

I	$0,3 \text{ м} \leq r < 1,0 \text{ м}$,	шаг 0,01 м;
II	$1,0 \text{ м} \leq r < 1,8 \text{ м}$,	шаг 0,10 м;
III	$1,8 \text{ м} \leq r < 2,1 \text{ м}$,	шаг 0,05 м;
IV	$2,1 \text{ м} \leq r \leq 2,5 \text{ м}$,	шаг 0,01 м;

2) для $5^\circ \leq \varphi \leq 22,5^\circ$ имели

I	$0,3 \text{ м} \leq r < 1,0 \text{ м}$,	шаг 0,02 м;
II	$1,0 \text{ м} \leq r < 1,8 \text{ м}$,	шаг 0,10 м;
III	$1,8 \text{ м} \leq r \leq 2,5 \text{ м}$,	шаг 0,02 м.

2.5.2. Аппроксимация поля полиномами Чебышева

Аппроксимация магнитного поля проводилась поэонно. На рис.36 представлена типичная зависимость магнитного поля B_y от радиуса. На графике можно легко выделить три пикообразные области. При аппроксимации всей области определения поля единственным чебышевским многочленом, в этих областях наблюдается наибольшая погрешность. Поэтому при аппроксимации каждая пикообразная область обрабатывается отдельно. Поле, за исключением этих областей, сглаживается и представляет собой еще одну область для обработки. Такой способ представления по сравнению с

разбиением на последовательные области дает экономию памяти вместе с неубывающей точностью. Кроме ограничения по радиусу, области ограничивались также по еще одной координате — углу, так как при больших углах ($7^\circ \div 22,5^\circ$) пики сглаживаются. Аналогичный способ обработки применялся и для поля B_x (рис.37) — в этом случае можно выделить две пикообразные области. Поле B_x (рис.38) разбивалось на две последовательные области, причем область плато представлялась низкостепенным разложением — это позволило сгладить ошибки предыдущего счета (пульсации поля на уровне нуля).

При оценке требуемой степени разложения для заданной относительной погрешности наибольшую трудность вызывает зависимость поля от радиуса. Для различных степеней разложения всей области определения поля по радиусу за исключением пиков были получены следующие результаты. Для степени разложения 20 относительная погрешность аппроксимации порядка $10^{-1} \div 10^{-2}$, для степени 40 — $10^{-2} \div 10^{-3}$, для степени 70 — порядка 10^{-4} .

2.5.3. Точность аппроксимации и время счета

Для нахождения скорости счета программы использовалось разложение Чебышева со степенями $0 \div 15$, $0 \div 15$ и $0 \div 35$ соответственно по первой, второй и третьей координате. Полученное время счета для одной точки в трехмерном пространстве порядка 0,35 секунды.

В результате проделанной работы можно заключить, что при заданной относительной погрешности порядка 10^{-4} время счета одной точки будет примерно 3,5 секунды (исходя из требования количества коэффициентов разложения $0 \div 35$, $0 \div 35$, $0 \div 70$). Аналогичное время для программы интерполяции кубическими сплайнами составляет 2,5 секунды. Количество хранимой информации — девять областей с наборами $36 \times 36 \times 71$.

3. ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСТИМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИЛОВОМ КАРКАСЕ И ОБМОТКЕ

Детали силового каркаса (ложементы и рамы) предполагается изготовить из алюминиевого сплава марки АМг6 с пределом прочности при температуре 4,2 К $\sigma_b = 560$ МПа и пределом текучести $\sigma_{0,2} = 200$ МПа^[4]. В общем машиностроении приняты коэффициенты запаса прочности конструкции, по сравнению с величиной $\sigma_{0,2}$, $n \approx 1,5$ ^[5]. Тогда средняя величина допустимого напряжения $\sigma_d = \sigma_{0,2}/n \approx 130$ МПа. Деформация каркаса вызывает напряжение в обмотке, которая состоит из сверхпроводящих проводов, стабилизирующей шинки из алюминия высокой чистоты, электрической изоляции и пропитывающего компаунда. При этом напряжения в элементах обмотки не должны превышать рассматриваемые ниже допустимые пределы.

3.1. Сверхпроводник

Растягивающее напряжение в проводе с ниобий-титановыми жилами и медной матрицей снижает критический ток. Однако это становится ощутимым при больших

напряжениях. Например, для многожильного провода при индукции 4 Тл и напряжении 500 МПа уменьшение критического тока составляет около 5 %^[6]. Автор работы^[6] считает разумным максимумом рабочих напряжений для ниобий-титанового провода 500 МПа.

3.2. Матрицы шины

В качестве стабилизирующего материала шины используется алюминий высокой чистоты (например, 99,995 %). Удельное электрическое сопротивление такого алюминия при температуре 4,2 К в отсутствие магнитного поля и деформации $\rho \approx 5 \cdot 10^{-11}$ Ом · м^[7]. Соотношение удельных сопротивлений

$$RRR = \rho(300K)/\rho(4,2K) \approx 2,8 \cdot 10^{-8}/5 \cdot 10^{-11} = 560.$$

Однако величина ρ зависит от степени деформации и, например, при относительной деформации $\epsilon = 0,07$, $\rho \approx 1,2 \cdot 10^{-11}$ Ом · м^[7]. Такой величине ϵ соответствует напряжение $\sigma \approx 100$ МПа^[7]. Это значит, что для сохранения степени стабильности шины нужно увеличить ее сечение в 2,4 раза. Если считать допустимым 25 % рост величины ρ , то нужно обеспечить в конструкции деформацию $\epsilon \approx 0,03$, что соответствует величине $\sigma \approx 50$ МПа^[7].

Указанные напряжения и деформации находятся в области пластичности. После большого числа циклов пластической деформации предел текучести алюминия несколько возрастает^[6], но по-прежнему остается весьма низким. Причем электросопротивление значительно увеличивается^[7].

Для более чистого алюминия (соотношение RRR = 2000) резкий рост сопротивления начинается уже при $\epsilon \approx 0,003$, но после многократного циклирования (рис.39)^[6].

3.3. Электрическая изоляция и пропитывающий обмотку компаунд

Для изоляции проводника и пропитки обмотки широко используют стекловолно и эпоксидные смолы, в результате витки проводника оказываются замоналичеными в композите, аналогичном стеклотекстолиту. Механические свойства такого композита находятся, по-видимому, на уровне обычных стеклотекстолитов. Например, разрушающее напряжение при статическом изгибе перпендикулярно слоям для листов стеклотекстолита марки СТ толщиной 0,01 м и более при комнатной температуре по основе ткани равно 125 МПа, по утку ткани — 95 МПа. В то же время у листов марки СТЭФ-1 эти величины соответственно равны 360 и 300 МПа. Разрушающее напряжение при растяжении для СТ равно 90 и 70 МПа^[9]. Модуль упругости при изгибе стеклотекстолита колеблется в широком диапазоне в зависимости от исходных материалов и технологии изготовления и составляет, например, величины (15,6—32) ГПа при различном соотношении количества стекловолно и эпоксидного связующего^[10].

3.4. Обсуждение и выводы

Определим напряжения в ложементе, при которых обеспечивается допустимый рост электрического сопротивления в алюминиевой матрице шины. Причем, как это делалось выше, считаем допустимым относительное удлинение шины при совместном

изгибе ложемент и обмотки $\epsilon = 0,03$. Величина нормальных напряжений при изгибе ложемент меняется по его сечению по линейному закону. Поскольку соотношение высот сечений ложемент и обмотки равно 450/300=1,5, то на краю ложемент допустима величина $\epsilon = 1,5 \times 0,03 = 0,045$. По закону Гука напряжение в этой точке

$$\sigma = E \cdot \epsilon = 80 \cdot 10^4 \times 0,045 = 3,6 \text{ ГПа},$$

где E — модуль упругости алюминиевого сплава. Очевидно, что реальные напряжения в ложементе будут более чем на порядок меньше, следовательно, во столько же раз будут меньше и деформации в обмотке. Даже если ориентироваться на алюминий с отношением сопротивлений 2000, то при $\epsilon = 0,003$ допустима величина $\sigma = 360$ МПа. Таким образом, алюминиевая матрица не является препятствием для существенного нагружения ложемент.

Более слабым звеном может оказаться электрическая изоляция и пропитка обмотки. Если ориентироваться на минимальную величину разрушающего напряжения при растяжении стеклотекстолита СТ в 70 МПа и принять произвольно коэффициент запаса 1,4, то допустимое напряжение в изоляции обмотки составит $\sigma_{до} = 50$ МПа. При одинаковой степени деформации изоляции и ложемент, напряжение в последнем составит $\sigma_{лож} = \sigma_{до} \cdot \frac{E_{дож}}{E_{до}}$.

Примем $E_{до} = (15,6 + 32)/2 \approx 24$ ГПа, тогда на расстоянии 0,15 м от центра сечения ложементов $\sigma_{лож} = 50 \cdot 80/24 \approx 170$ МПа, а на краю ложемент (0,225 м от центра) $\sigma_{лож} \approx 250$ МПа.

Подводя итог, можно сказать, что при выборе величины допустимых напряжений в силовом каркасе данной конструкции можно руководствоваться нормами общего машиностроения, т.к. негативные явления в обмотке возникают при существенно больших напряжениях.

4. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СТОРС

4.1. Расчет на прочность и жесткость конструктивных элементов магнита

Все детали холодной части магнита изготавливаются из алюминиевого сплава АМг6. Ложемент фиксирует обмотку, охватывая ее со всех сторон двумя Г-образными в сечении половинками. Одна часть ложемент используется в качестве формы для навивки самой обмотки (рис.40). Для фиксации ложементов относительно друг друга используются 8-угольные рамы (рис.41).

4.1.1. Ложемент

Для проверки конструкции на прочность и жесткость необходимо знать величину максимального напряжения, возникающего в сечении ложемент, величину прогибов обмотки на прямолинейных участках и деформацию стержней соединительных рам магнита.

Из рис.42 видно, что максимальная величина распределенной нагрузки на внутренний прямолинейный участок обмотки магнита 1-го типа модуля равна 510 кН/м, для

второго типа — 1020 кН/м, на внешний участок обоих типов модулей — 190 кН/м, на радиальный участок — 370 кН/м.

Для предохранения конструкции от разрушения ложементы установлены на 11 опорах, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга для первого типа модулей и на 14 опорах через 0,8 м для 2-го типа.

Площадь сечения ложемента $F = 2,26 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ (рис.40).

Осевой момент инерции:

$$J_x = bh^3/12 - b_1h_1^3/12, \quad J_x = 3,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления сечения:

$$W_x \approx 2J_x/h, \quad W_x = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

На рис.43 представлена эквивалентная схема нагружения прямолинейного внутреннего и внешнего участков обмотки. Эти участки рассматриваются как многопролетные балки с распределенной нагрузкой q . При расчете на прочность и жесткость этих балок изгибающие моменты, опорные реакции и прогибы неразрезных балок с равными пролетами длиной l находились по формулам работы^[11] с коэффициентами из табл.13^[11].

При расчете принимается, что крайние пролеты опираются на подвижную опору, а все промежуточные пролеты жестко закреплены по концам.

1-й тип модулей:

$q = 510 \text{ кН/м}$, балка опирается на 11 опор, $l = 1 \text{ м}$.

Изгибающие моменты:

$$M_{1,10} = 0,08ql^2, \quad M_{1,10} = 420 \cdot 10^3 \text{ МН} \cdot \text{м}, \quad M_{2+9} = 0,025ql^2, \quad M_{2+9} = 130 \cdot 10^3 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = M_x/W_x, \quad \sigma_{\max 1,10} = 26,6 \text{ МПа}, \quad \sigma_{\max 2+9} = 8,4 \text{ МПа}$$

Максимальные прогибы:

$$f_{1,10} = 0,0068ql^4/EJ_x, \quad f_{1,10} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \quad f_{2+9} = 0,0005ql^4/EJ_x, \quad f_{2+9} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

где E — модуль Юнга, для АМг6 — $E = 7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

2-й тип модулей:

$q = 1020 \text{ кН/м}$, балка опирается на 14 опор, $l = 0,8 \text{ м}$.

Изгибающие моменты:

$$M_{1,13} = 0,08ql^2, \quad M_{1,13} = 550 \text{ МН} \cdot \text{м}, \quad M_{2+12} = 0,025ql^2, \quad M_{2+12} = 170 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max 1,13} = 35,7 \text{ МПа}, \quad \sigma_{\max 2+12} = 10,9 \text{ МПа}.$$

Максимальные прогибы:

$$f_{1,13} = 0,0068ql^4/EJ_x, \quad f_{1,13} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \quad f_{2+12} = 0,0005ql^4/EJ_x, \quad f_{2+12} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Внешний участок обмотки любого типа модулей с нагрузкой $q=190 \text{ кН/м}$ и опирающийся на 11 опор, $l = 1 \text{ м}$.

Изгибающие моменты:

$$M_{1,10} = 0,08ql^2, \quad M_{1,10} = 150 \text{ МН} \cdot \text{м}, \quad M_{2+9} = 0,025ql^2, \quad M_{2+9} = 50 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max 1,10} = 9,8 \text{ МПа}, \quad \sigma_{\max 2+9} = 2,6 \text{ МПа}.$$

Максимальные прогибы:

$$f_{1,10} = 0,0068ql^4/EJ_x, \quad f_{1,10} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad f_{2+9} = 0,0005ql^4/EJ_x, \quad f_{2+9} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Радиальные части обмотки магнита имеют длину прямолинейного участка $l=1,2 \text{ м}$ с распределенной нагрузкой 370 кН/м . Эквивалентная схема нагружения представлена на рис.44, концы балки жестко зашпелены.

Изгибающий момент:

$$M \approx ql^2/8, \quad M = 760 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Максимальное напряжение:

$$\sigma_{\max} = 49 \text{ МПа}.$$

Максимальный прогиб:

$$f = 5ql^4/384EJ_x, \quad f = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м} [12, \text{ стр.53, табл.10}].$$

Из расчета на прочность и жесткость конструкции видно, что максимальное значение напряжения в ложементах обмотки $\sigma = 49 \text{ МПа}$ возникает на радиальных участках обмотки.

В материале, из которого изготавливаются детали холодной части магнита (АМг6), возможны скрытые дефекты, отклонения в технологии изготовления и другие факторы, влияющие на прочность конструкции. Поэтому необходимо задаться коэффициентом запаса прочности n .

Выбор значения n , показывающего, во сколько раз допускаемое напряжение $\sigma_{\text{доп}}$ меньше опасного, зависит от состояния материала (хрупкое, пластичное), характера приложения нагрузки (статическая, динамическая, повторно-переменная), а также от неоднородности материала, неточности в задании внешних нагрузок, приближенности расчетных схем и формул. Для пластичных материалов при статической нагрузке опасное напряжение приравнивается к пределу текучести материала $\sigma_o = \sigma_T$ и принимают $n_T = 1,4 \div 1,6$. Иногда для пластичных материалов допускаемое напряжение определяют по временному сопротивлению $\sigma_{\text{доп}} = \sigma_B/n_B$. Т.к. $\sigma_T = (0,5 \div 0,7)\sigma_B$, то $n_B = 2,4 \div 2,6$. Предел текучести АМг6 $\sigma_T = 320 \text{ МПа}$, временное сопротивление $\sigma_B = 160 \text{ МПа}$. Примем $n_B = 2,5$, тогда $\sigma_{\text{доп}} = 130 \text{ МПа}$ и максимальное напряжение, возникающее в ложементах обмотки, $\sigma_{\max} = 49 \text{ МПа}$ меньше $\sigma_{\text{доп}}$ в 2,6 раза.

Величина коэффициента запаса прочности $n_B = 320/49 = 6,5$ превышает необходимую величину $n_B = 2,5$. При более детальной конструкторской проработке можно будет оптимизировать размеры стенок ложемента.

4.1.2. Внутренняя рама

Для первого типа модулей рама представляет собой 8-гранник (рис.41), гранью которого является стержень радиусом r и длиной $l=0,35 \text{ м}$. На стержень действует сила $P_1 = P/2\sin\alpha$, где $P=510 \text{ кН}$ и $\alpha = 22,5^\circ$, откуда $P_1 = 683 \text{ кН}$. Эквивалентная схема нагружения представлена на рис.45.

При этом уменьшается длина стержня на

$$\Delta l = P_1/EF \quad (1).$$

Зададимся допустимой величиной перемещения $\Delta l = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Площадь сечения стержня определим из формулы (1): $F = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, откуда $r=0,08 \text{ м}$.

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = P_1/F$, $\sigma_{\max} = 34 \text{ МПа}$.

Для второго типа модулей рама имеет стержни длиной $l=0,09 \text{ м}$. На стержень действует сила $P_2 = 1383 \text{ кН}$. Сокращение длины стержней принимаем $\Delta l = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, тогда $F = 1,82 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $r=0,76 \text{ м}$ и максимальное значение $\sigma_{\max} = 79 \text{ МПа}$.

Второй вариант — внутренняя рама представляет собой кольцо (рис.46), средний радиус которого $R=0,11 \text{ м}$, сечение $b=0,1 \text{ м}$, $h=0,085 \text{ м}$, площадь сечения $F=0,0085 \text{ м}^2$.

Момент инерции сечения кольца:

$$J = bh^3/12, \quad J = 5,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления:

$$W = bh^2/6, W = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

На кольцо передаются усилия от обмоток магнита, каждое из которых равно 1020 кН.

Изгибающий момент:

$$M = ql^2/8, M = 135 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Максимальное напряжение:

$$\sigma_{\max} = 112 \text{ МПа}.$$

Радиальное перемещение точек поверхности в местах приложения силы:

$$\delta = PR_{\text{ср}}^2 \left[\frac{2}{\alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} - \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \right] / 2EJ, \text{ где } \alpha = 22,5^\circ, [13, \text{ табл.36, стр.386}],$$

$$\delta = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

4.1.3. Внешняя рама

Рама также представляет собой 8-угольник (рис.41), состоящий из стержней радиусом r и длиной $l=1,9$ м. Сила P , действующая на стержень, равна $P_3 = P/2\sin\alpha$, где $\alpha = 22,5^\circ$, $P_3 = 245$ кН. Эквивалентная схема нагружения представлена на рис.45.

Принимаем допустимое значение $\Delta l = 4 \cdot 10^{-4}$ м, тогда площадь сечения

$$F = P_3 l / E \Delta l, F = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2, r = 0,07 \text{ м}.$$

Максимальное напряжение: $\sigma_{\max} = 14,9$ МПа.

Приведенные оценочные расчеты позволяют сделать вывод, что данная конструкция модуля способна сохранить форму обмоток и их положение относительно друг друга неизменными.

Общий вес холодной части модуля:

$$Q_{\text{о.б.}} = 8Q_1 + 12Q_2 + 12Q_3 + 8Q_4, \text{ где}$$

Q_1 — вес ложементов обмотки, равный 17,2 кН;

Q_2 — вес внутренней рамы модуля 1,56 кН;

Q_3 — вес внешней рамы модуля 6,7 кН;

Q_4 — вес обмотки с охлаждающей трубкой 6,8 кН.

$$Q_{\text{о.б.}} = 32 \text{ кН}.$$

4.1.4. Вакуумный кожух СП-магнита

Вакуумный кожух состоит из короба (рис.47), охватывающего обмотку модуля по всему периметру, и соединительных труб, устанавливаемых в местах крепления опор к ложементу.

Для обеспечения гелиевой температуры в обмотке модуля необходимо в вакуумном кожухе создать разрежение, равное $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. При этом на стенки кожуха будет действовать распределенная по всей площади нагрузка, равная $q = 0,1$ МПа.

Определим толщину стенки h .

Эквивалентная схема нагружения представлена на рис.48. Здесь рассматривается свободно опертая по всем четырём сторонам плита размером $a=0,5$ м, $b=12$ м. Величина прогиба определяется из соотношения $\omega = K_{\omega} qa^4 / Eh^3$, где E — модуль упругости легированных сталей $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, K_{ω} — коэффициент, взятый из таблицы, равный 0,1422^[11]. Из этой формулы можно определить величину h , задавшись величиной прогиба $\omega = 0,005$ м, $h = 0,009$ м.

Примем толщину стенки вакуумного кожуха $h = 0,01$ м.

Максимальное напряжение:

$$\sigma_{\max} = K_{\sigma} qa^2 / h^2, \sigma_{\max} = 190 \text{ МПа}.$$

4.2. Компьютерное моделирование возникающих напряжений и перемещений в конструкции СТОРС

Для компьютерного моделирования использовалась программа FSTORS, которая, используя метод конечных элементов, позволяет определить напряжения и перемещения конструкции под действием ponderомоторных сил.

Решая систему уравнений вида:

$$[K]\{V\} = \{f\},$$

где $[K]$ — матрица жесткости конструкции, $\{V\}$ — вектор узловых перемещений, $\{f\}$ — вектор приложенных нагрузок^[14], конечный результат работы программы выдается как в числовом виде, так и путем визуализации вида конструкции после приложения к ней соответствующих нагрузок.

Были рассчитаны отдельно оба модуля конструкции (рис.1). Данные для расчетов были взяты из табл.1 и рис.40.

Для первого типа модуля были получены следующие результаты:

а) для внутреннего прямолинейного участка ложементов максимальный прогиб составил $1,3 \cdot 10^{-4}$ м, а максимальное напряжение ≈ 25 МПа;

б) для внешнего прямолинейного участка ложементов максимальный прогиб составил $3 \cdot 10^{-5}$ м, максимальное напряжение ≈ 2 МПа;

в) для криволинейного участка максимальный прогиб составил $2 \cdot 10^{-4}$ м, максимальное напряжение ≈ 60 МПа.

Для второго типа модуля были получены следующие результаты:

а) для внутреннего прямолинейного участка ложементов максимальный прогиб составил $1 \cdot 10^{-4}$ м, а максимальное напряжение ≈ 36 МПа;

б) для внешнего прямолинейного участка ложементов максимальный прогиб составил $3 \cdot 10^{-5}$ м, максимальное напряжение ≈ 2 МПа;

в) для криволинейного участка максимальный прогиб составил $3,2 \cdot 10^{-4}$ м, максимальное напряжение ≈ 160 МПа.

На рис.49—50 показана картина деформирования ложементов модулей первого и второго типов соответственно (пунктиром показаны недеформированные ложементы; масштаб прогибов не соблюден).

Таким образом, полученные результаты подтверждают выводы, представленные в разделе 4.1.

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено эскизное проектирование СПМС установки СТОРС, в процессе которого выбраны основные параметры обмотки и деталей конструкции магнита. Для расчета индукции магнитного поля во всем пространстве спектрометра создан алгоритм программы, учитывающей в том числе взаимное влияние модулей магнита.

Также рассчитаны изменения поля при отклонениях в пределах допусков на изготовление размеров обмотки. Выполнены проверочные расчеты на прочность и жесткость несущих элементов конструкции. Определены допустимые напряжения в элементах обмотки. Показано, что эти напряжения достаточно велики и не являются препятствием для выбора высокого уровня напряжений в силовом каркасе.

В результате настоящей работы можно сделать вывод о возможности создания сверхпроводящего тороидального магнита выбранной конфигурации и заданных размеров. В ходе рабочего проектирования необходимо провести окончательную оптимизацию параметров и размеров магнита.

Расчеты также показали, что необходимы измерения и контроль магнитного поля во многих точках, особенно вблизи внутренних частей обмоток, где сильно влияние отклонений размеров обмоток от заложенных в программу расчета.

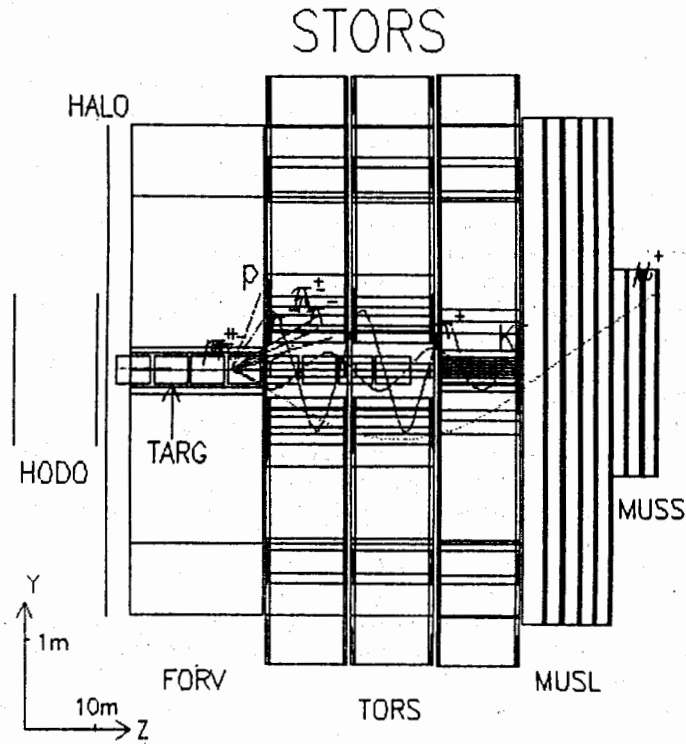


Рис.1.Общий вид установки STORS (вид сбоку):

HODO - годоскопические сцинтилляционные плоскости;
 HALO - годоскопическая сцинтилляционная плоскость для защиты от гало пучка;
 TARG - мишени (твердые и жидкие);
 FORV - передний спектрометр;
 TORS - тороидальный магнитный спектрометр;
 MUSL, MUSS - мюонные идентификаторы.

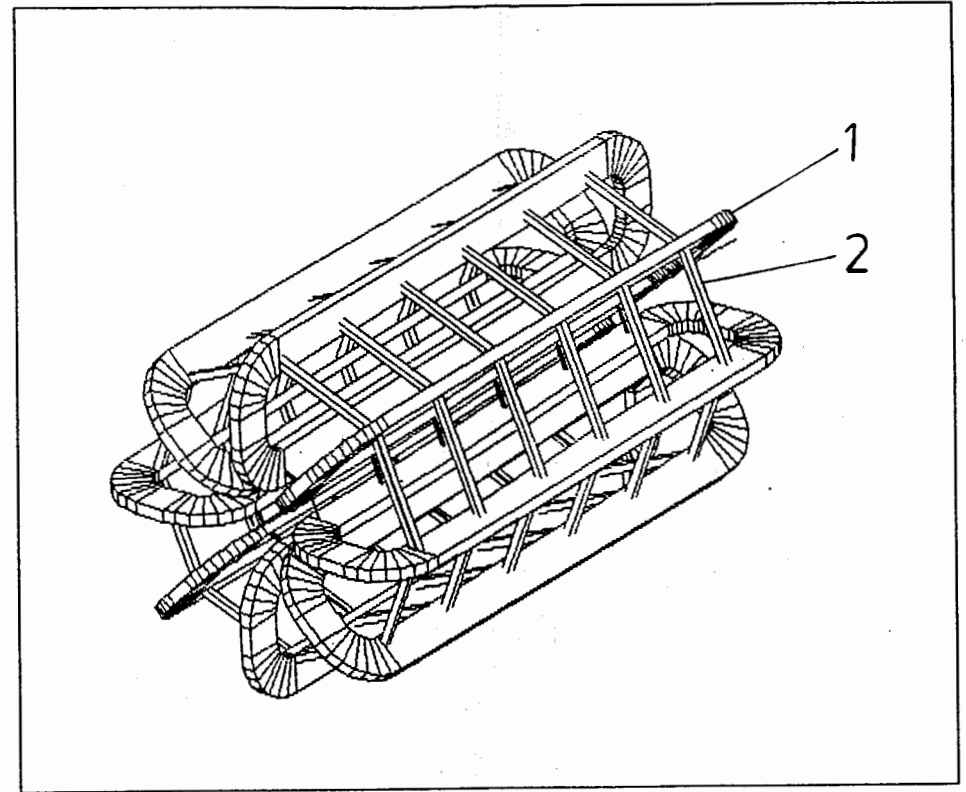


Рис.2.Передний модуль сверхпроводящего магнита установки STORS:

1 — обмотки в вакуумных кожухах,
 2 — силовые тяги

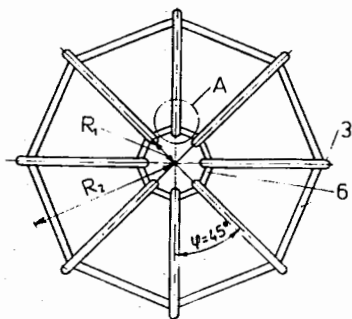


Рис.3а. Вид на модуль с торца:

3 — вакуумный кожух, 6 — силовые тяги в вакуумных кожухах, R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы обмоток.

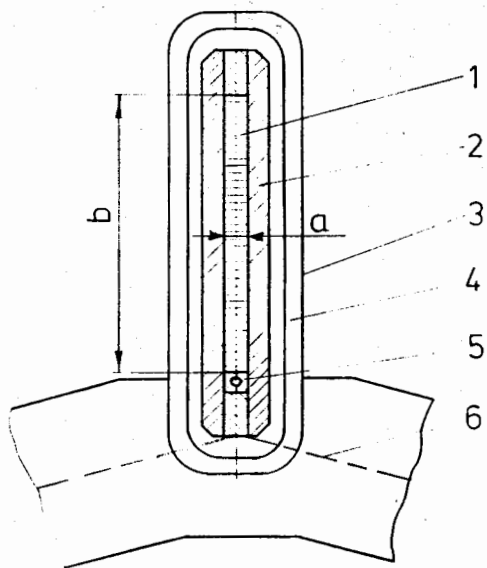


Рис.3б. Поперечное сечение магнита (место А, рис.3а):

1 — обмотка, 2 — каркас, 3 — вакуумный кожух, 4 — тепловая изоляция, 5 — трубка для жидкого гелия, 6 — силовые тяги в вакуумном кожухе, а — ширина, б — высота обмотки.

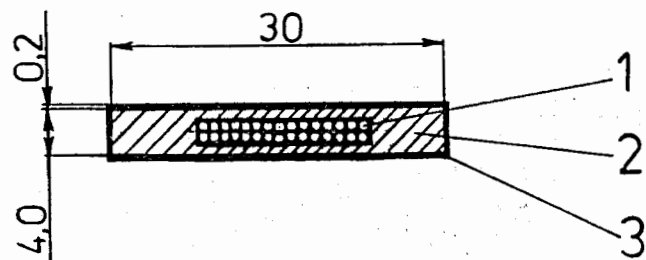


Рис.4. Поперечное сечение шины:

1 — сверхпроводящий провод диаметром $8,5 \cdot 10^{-4}$ м, 2 — стабилизирующая алюминиевая шина, 3 — электрическая изоляция

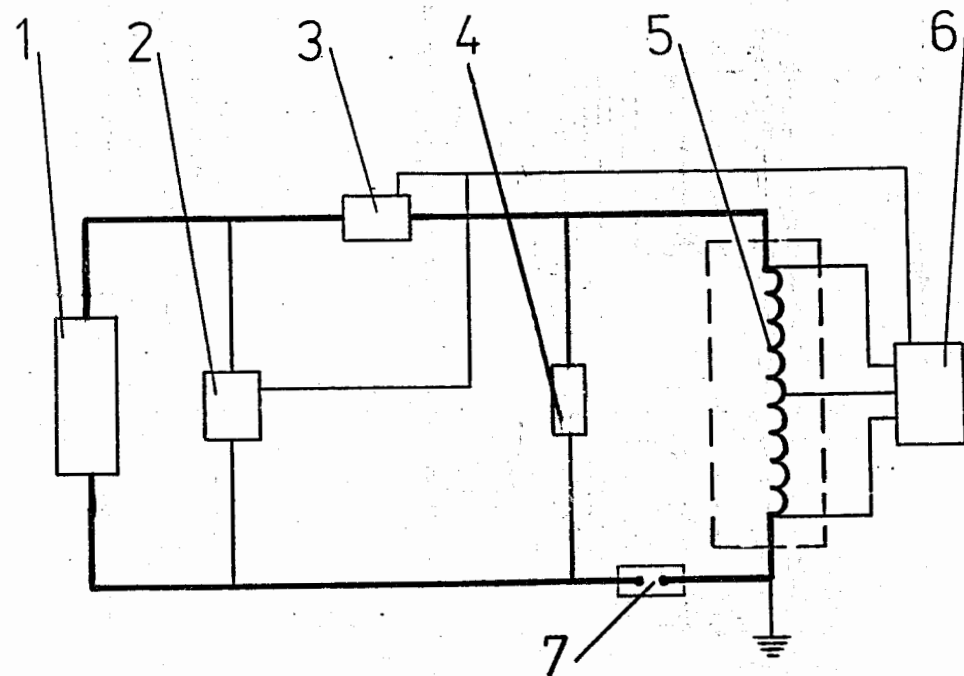


Рис.5. Принципиальная электрическая схема питания и защиты модуля сверхпроводящего магнита:

1 — источник питания, 2 — закорачивающий ключ (нормально закрытый), 3 — аварийный ключ (нормально открытый), 4 — гасительное сопротивление, 5 — сверхпроводящая обмотка, 6 — детектор нормальной зоны, 7 — измерительный шунт

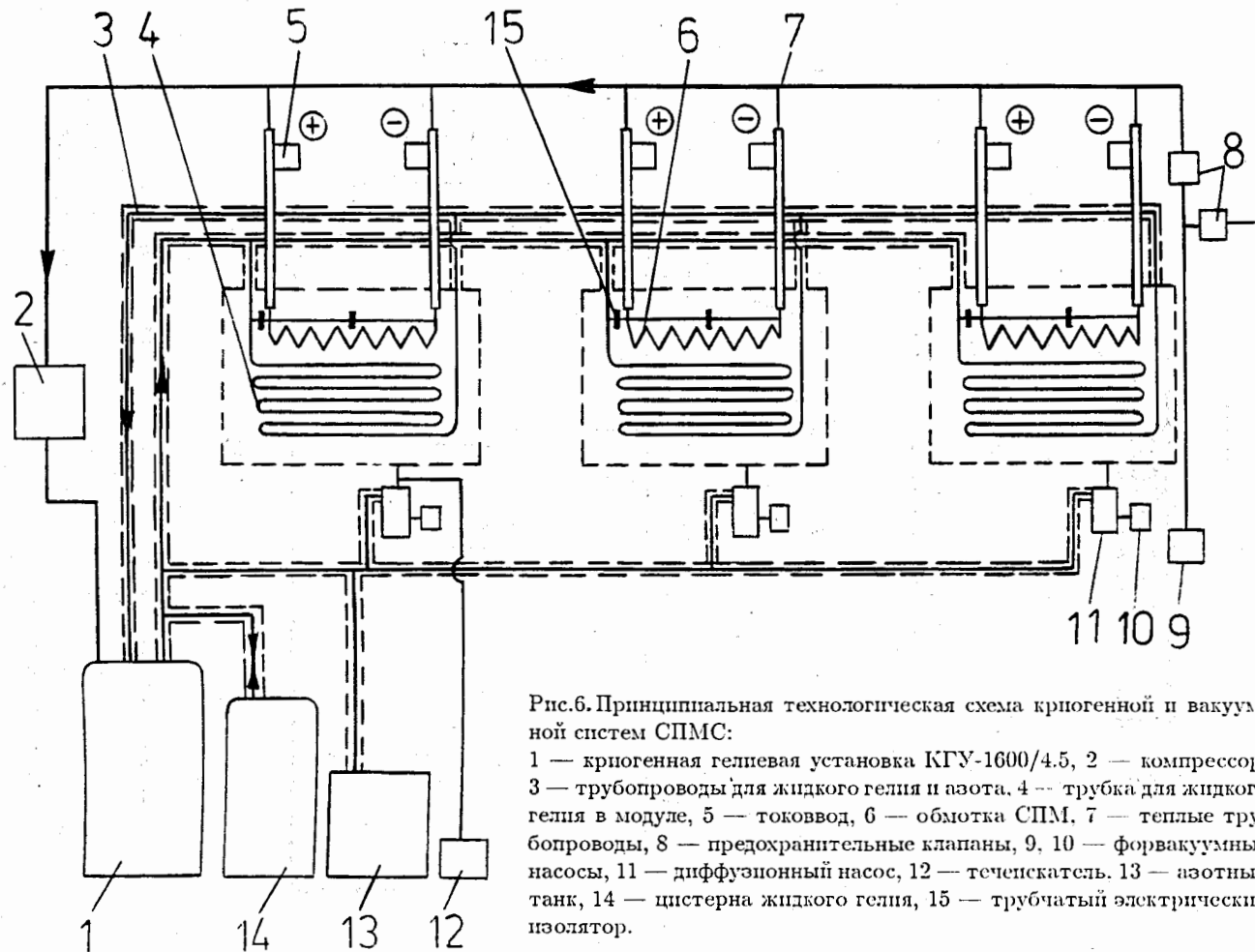


Рис.6. Принципиальная технологическая схема криогенной и вакуумной систем СПМ:

1 — криогенная гелиевая установка КГУ-1600/4.5, 2 — компрессор, 3 — трубопроводы для жидкого гелия и азота, 4 — трубка для жидкого гелия в модуле, 5 — токовод, 6 — обмотка СПМ, 7 — теплые трубопроводы, 8 — предохранительные клапаны, 9, 10 — форвакуумные насосы, 11 — диффузионный насос, 12 — теченсатель, 13 — азотный танк, 14 — цистерна жидкого гелия, 15 — трубчатый электрический изолятор.

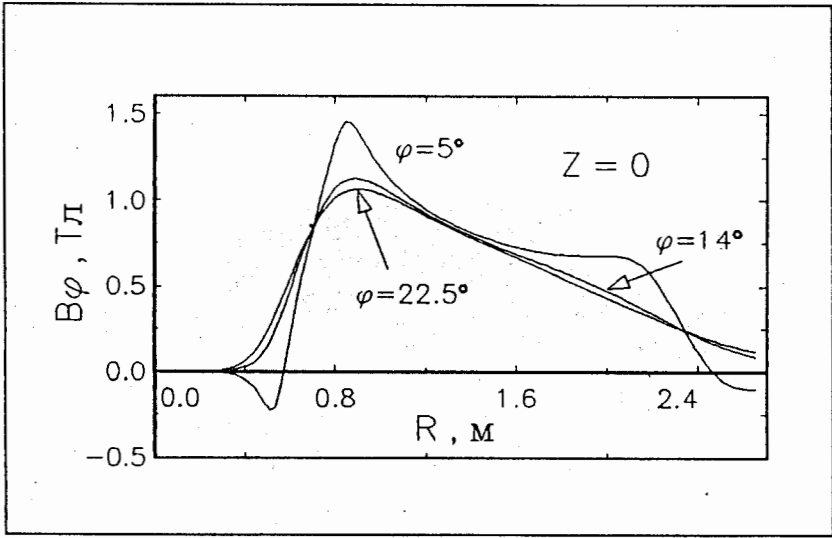


Рис.7. Распределение азимутальной компоненты поля в медианной плоскости для первого типа магнита

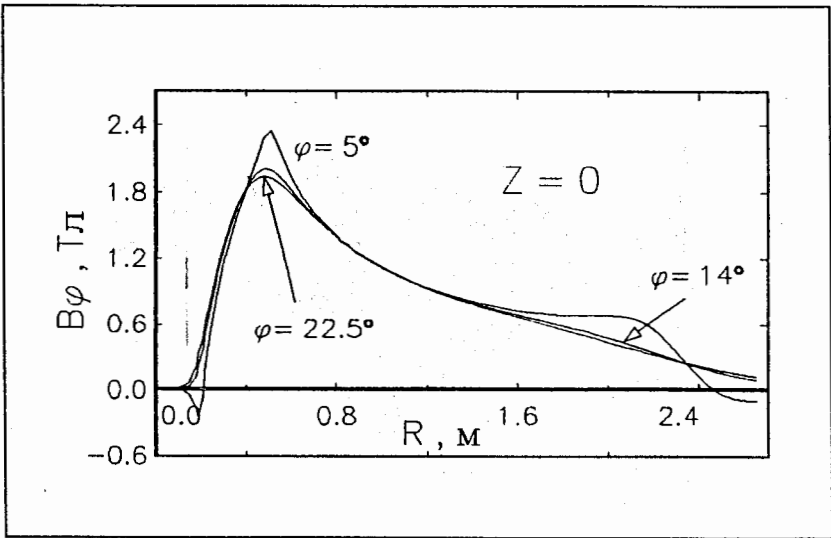


Рис.8. Распределение азимутальной компоненты поля в медианной плоскости для второго типа магнита

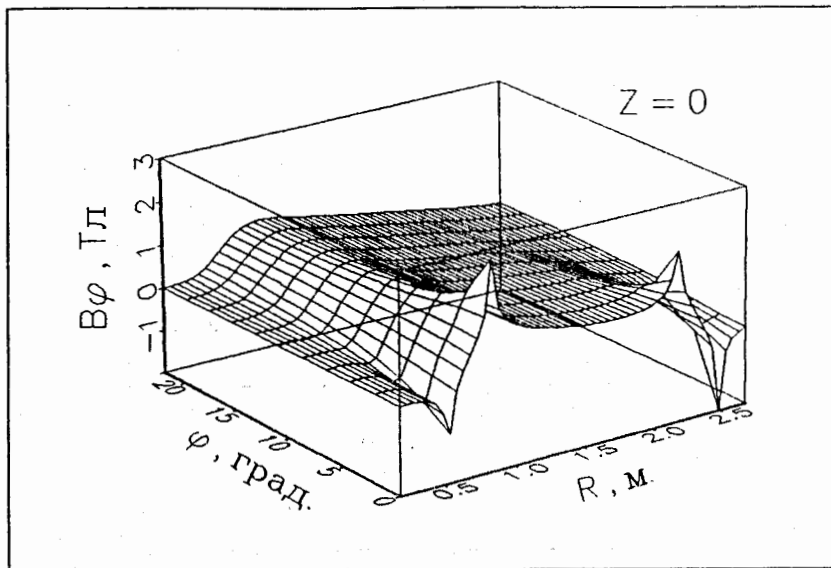


Рис.9. Пространственное распределение азимутальной компоненты поля в медианной плоскости

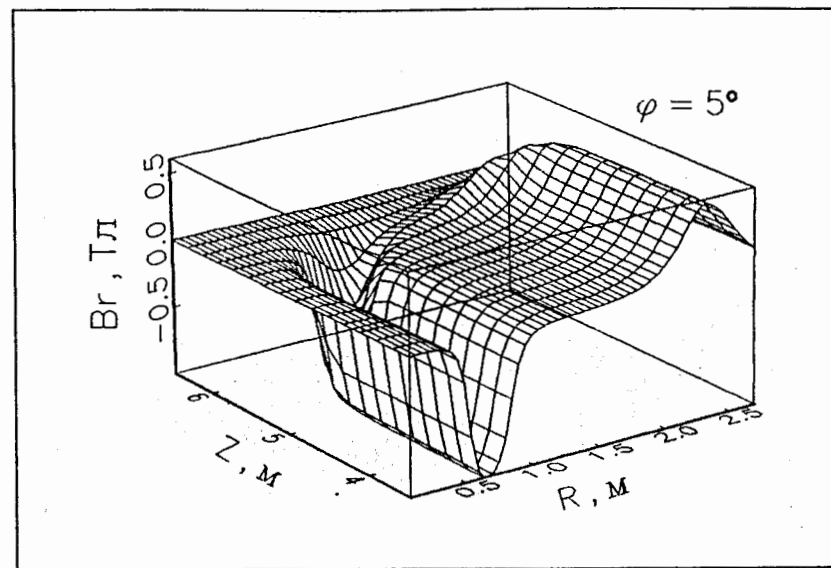


Рис.11. Пространственное распределение радиальной компоненты поля в краевой области магнита

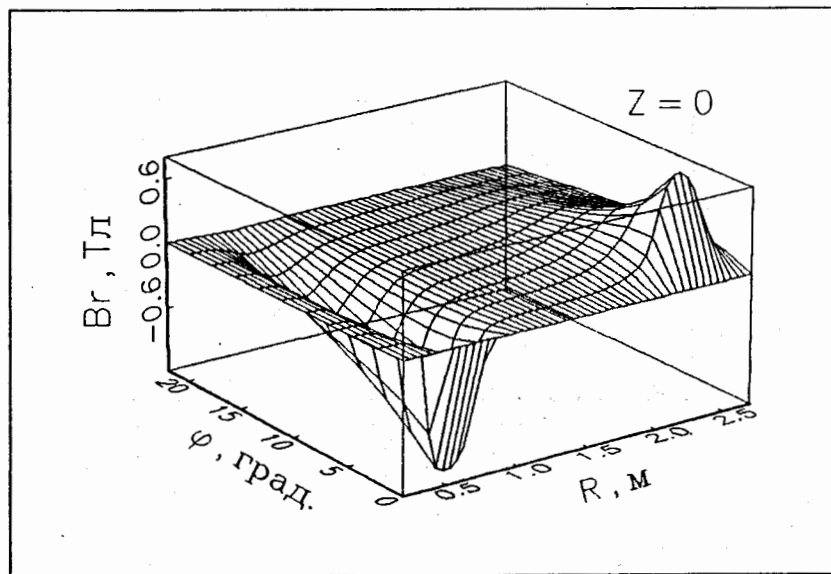


Рис.10. Пространственное распределение радиальной компоненты поля в медианной плоскости

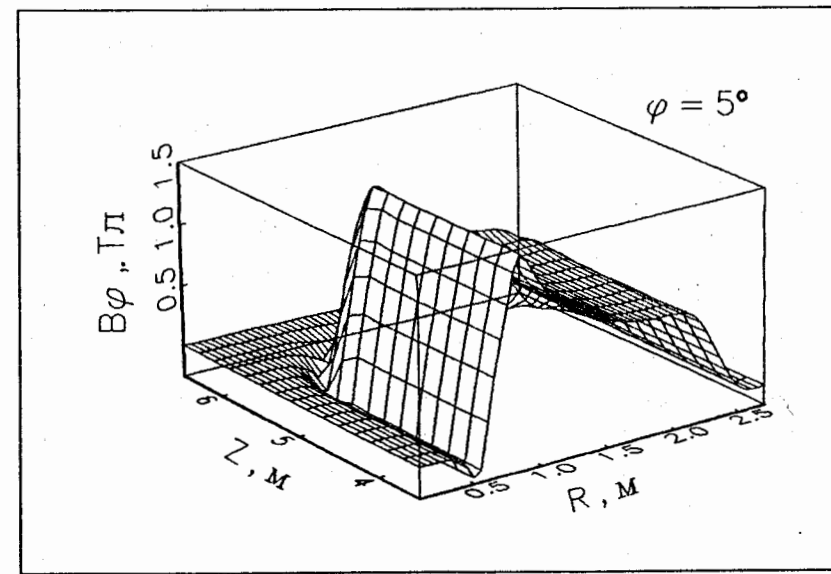


Рис.12. Пространственное распределение азимутальной компоненты поля в краевой области магнита

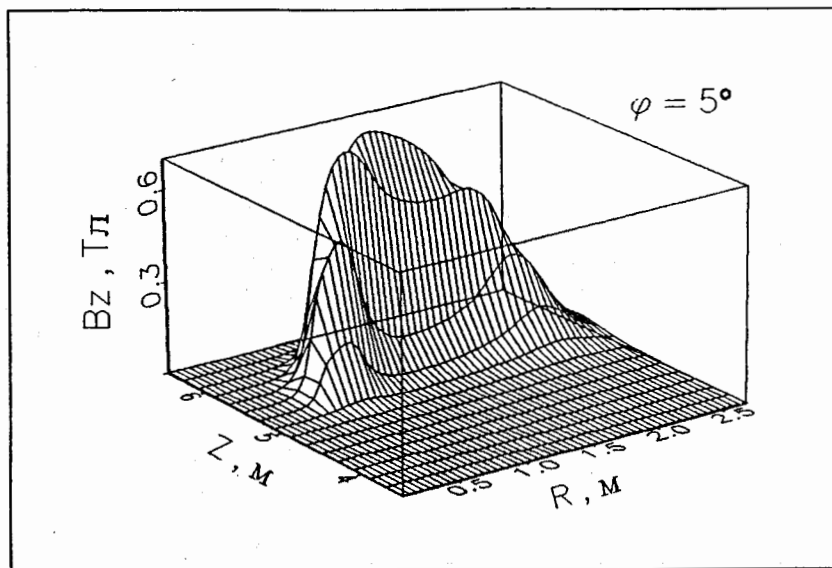


Рис.13. Пространственное распределение аксиальной компоненты поля на краю магнита

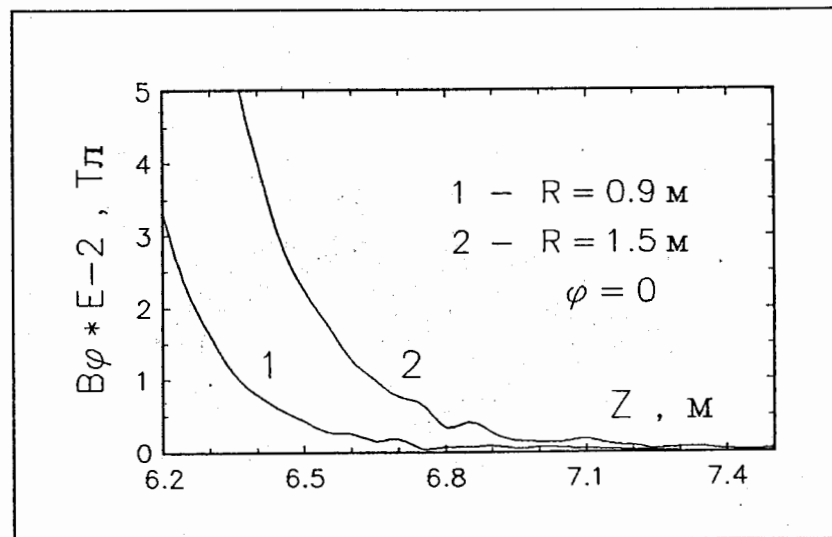


Рис.14. Распределение поля в торцевой области магнита

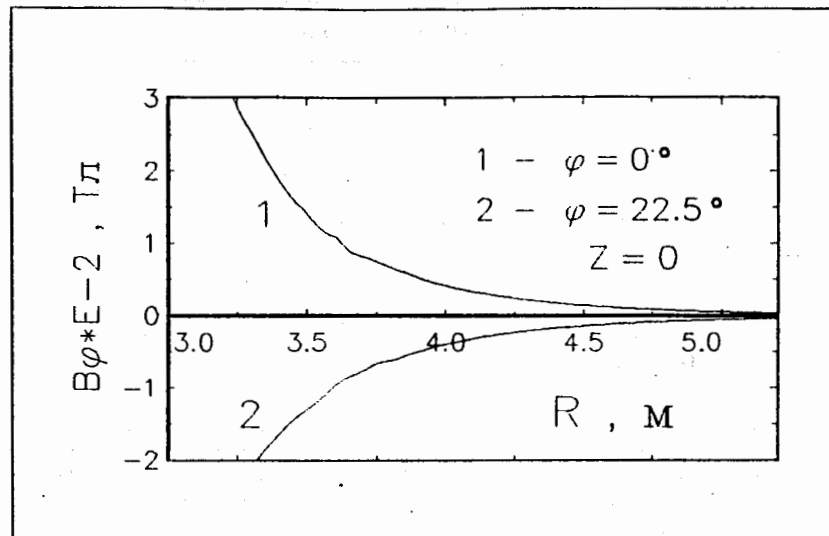


Рис.15. Распределение поля во внешней области магнита

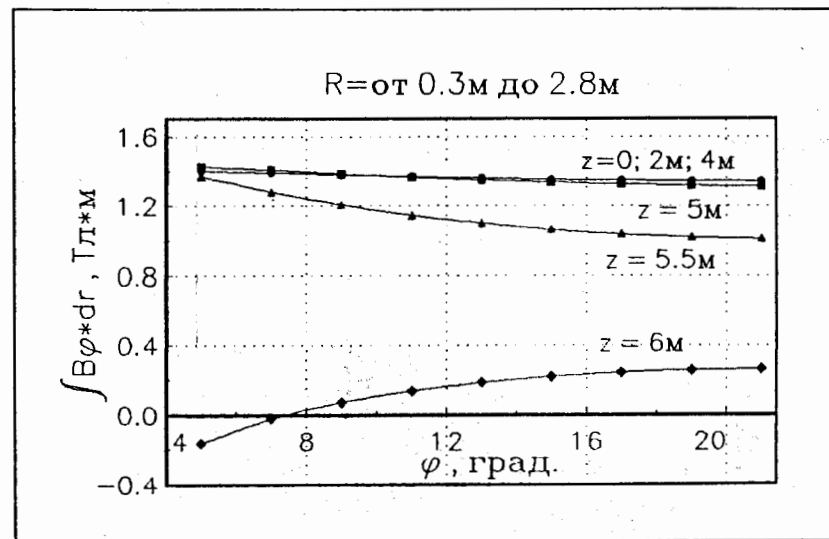


Рис.16. Интеграл азимутальной компоненты поля по радиусу для z=const

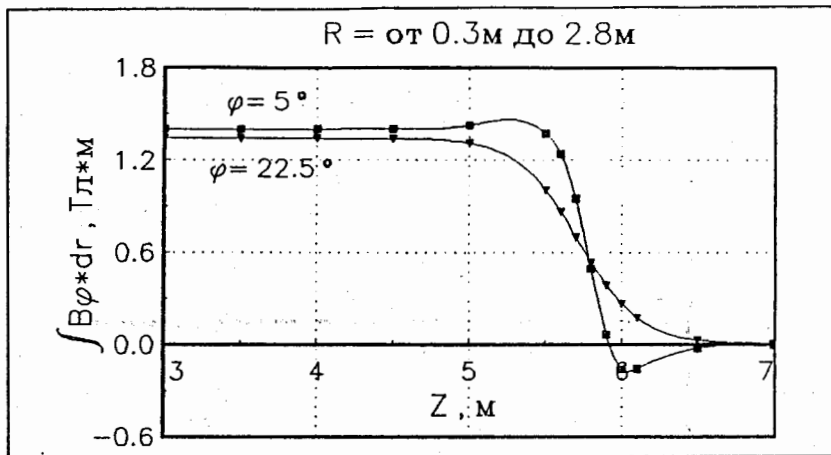


Рис.17. Интеграл азимутальной компоненты поля по радиусу для $\varphi = const$

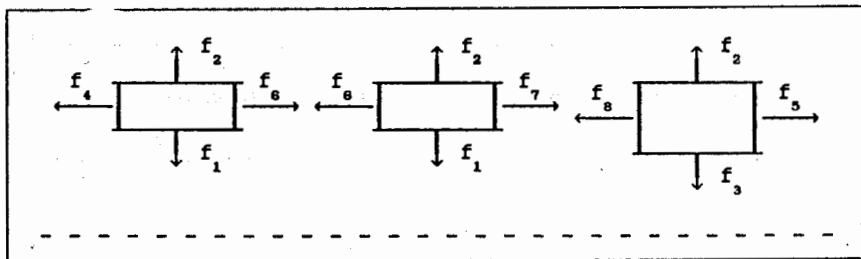


Рис.18. Схематический вид сил, действующих на обмотки магнитов спектрометра

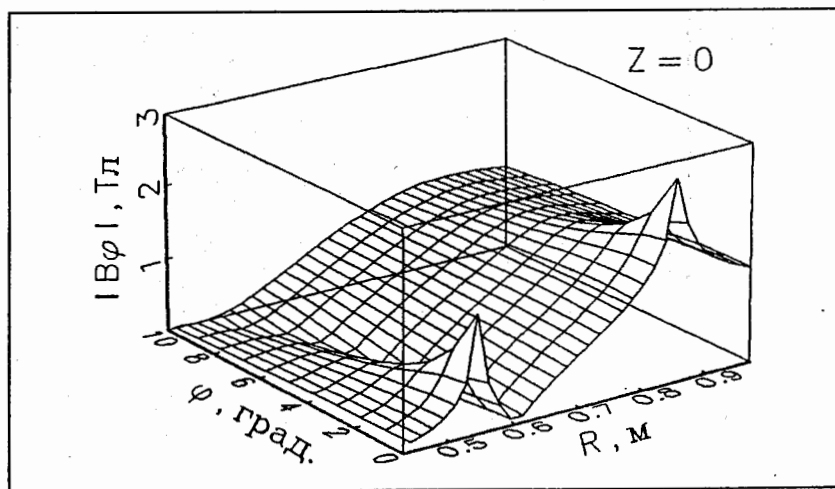


Рис.19. Распределение поля (по модулю) в токовой зоне обмотки

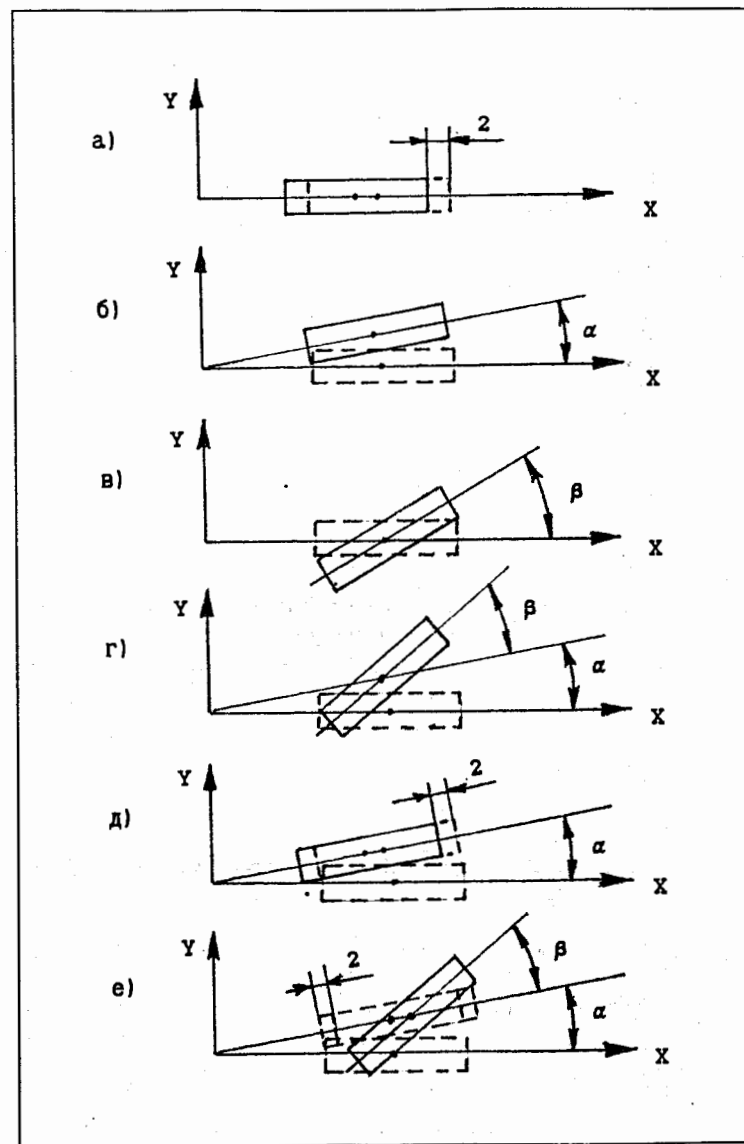


Рис.20. Варианты возможных отклонений в конструкции модуля

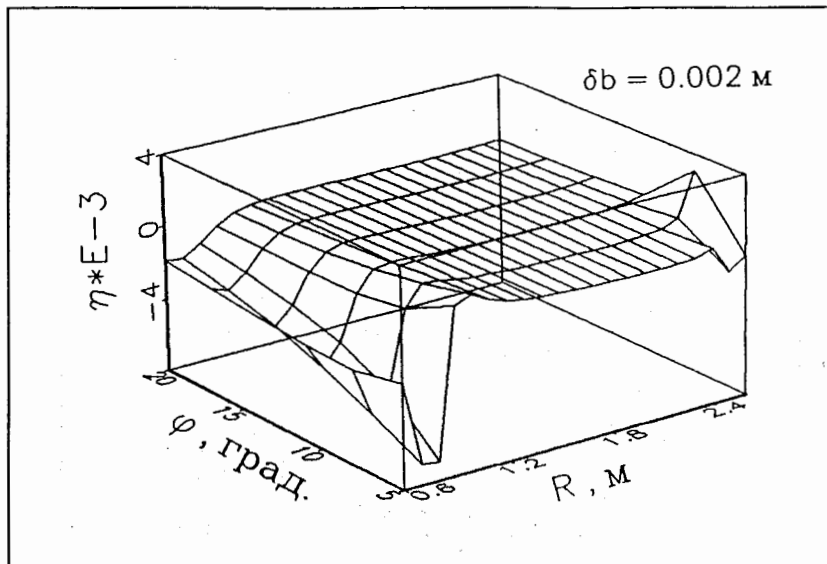


Рис.21. Относительное изменение поля в случае изменения размера обмотки по радиусу на величину δb

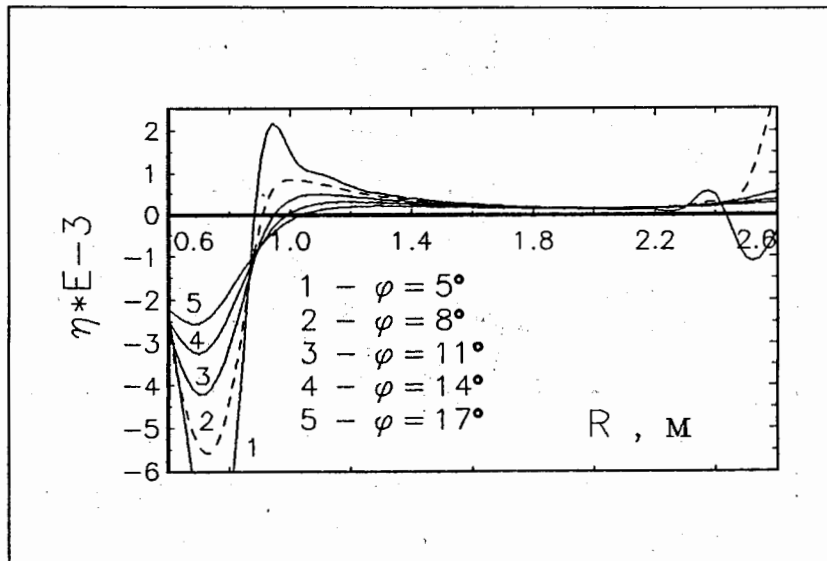


Рис.22. Зависимость относительного изменения поля от радиуса для случая, приведенного на рис.21

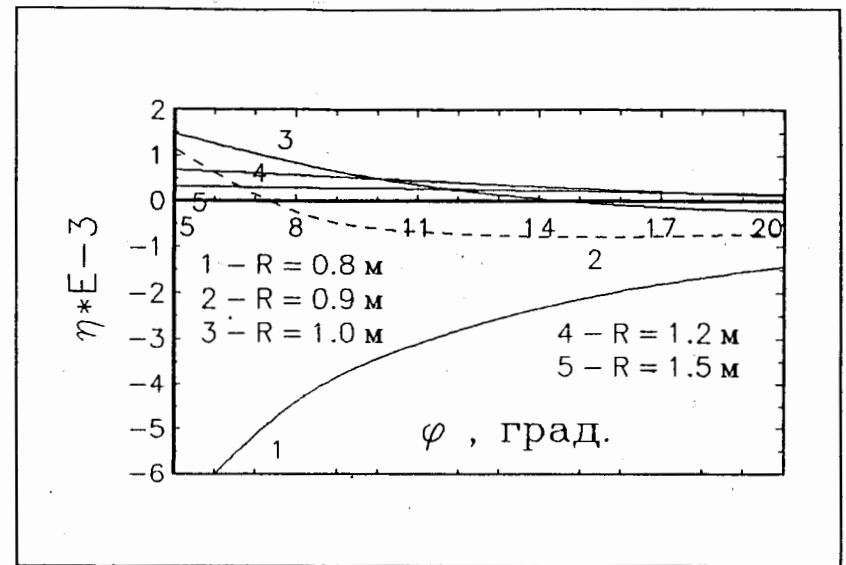


Рис.23. Зависимость относительного изменения поля от азимута для случая, приведенного на рис.21

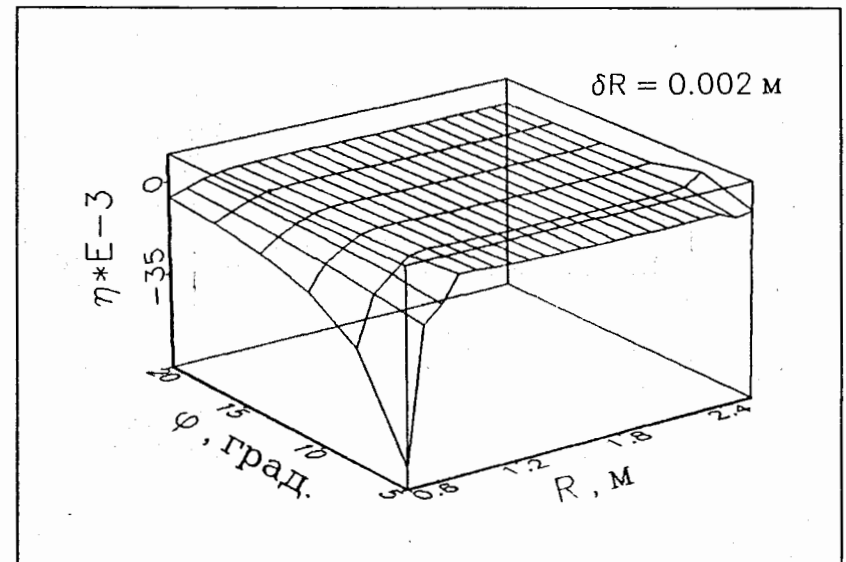


Рис.24. Относительное изменение поля в случае смещения обмотки по радиусу на величину δR

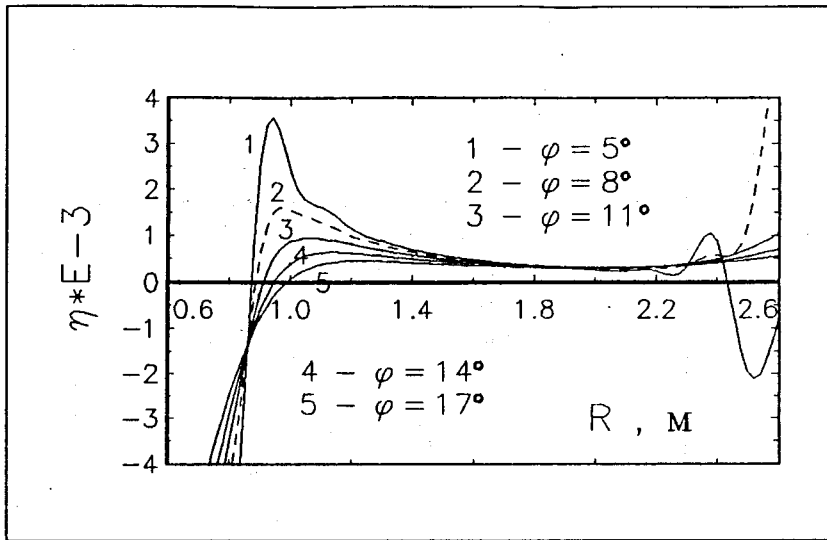


Рис.25. Зависимость относительного изменения поля от радиуса для случая, приведенного на рис.24

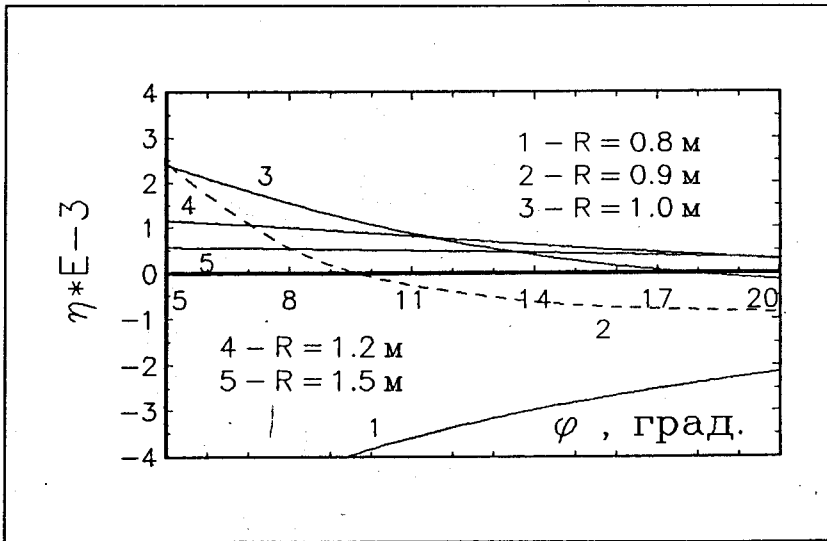


Рис.26. Зависимость относительного изменения поля от азимута для случая, приведенного на рис.24

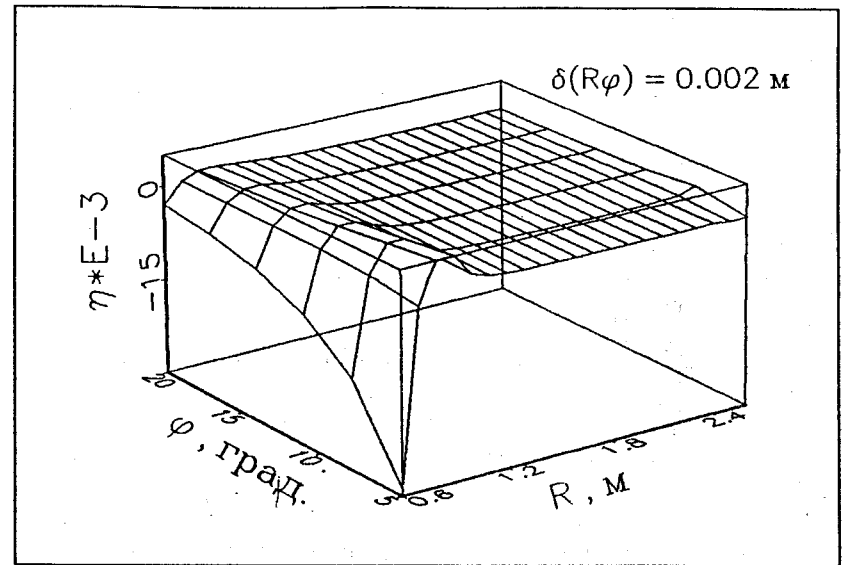


Рис.27. Относительное изменение поля в случае углового смещения плоскости обмотки на величину $\alpha = 0, 135^\circ$

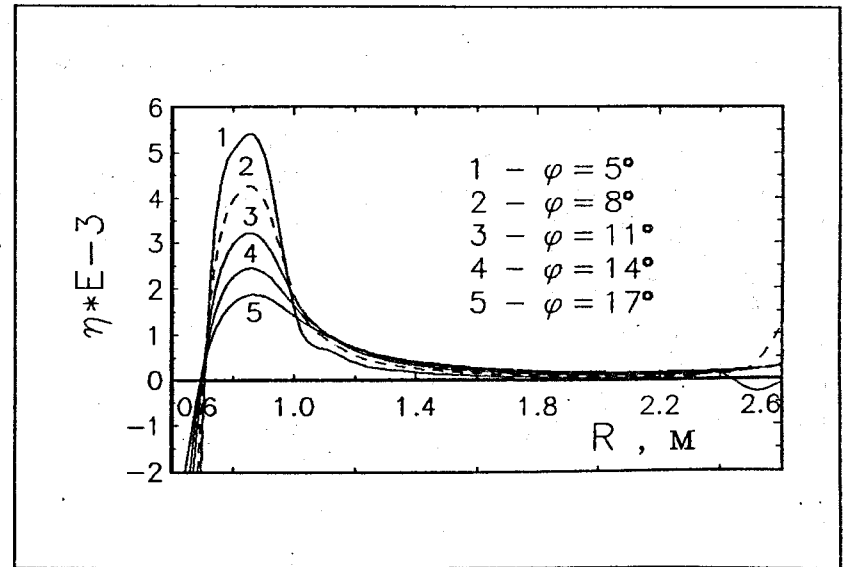


Рис.28. Зависимость относительного изменения поля от радиуса для случая, приведенного на рис.27

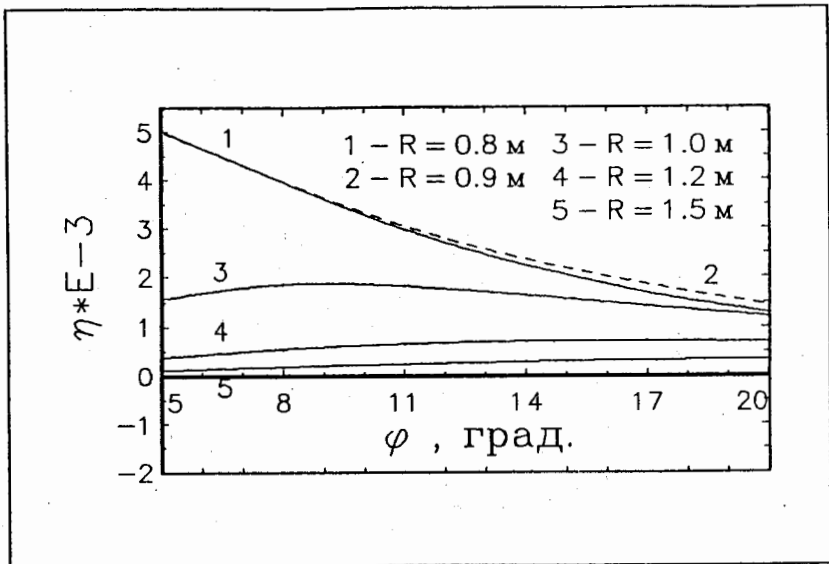


Рис.29. Зависимость относительного изменения поля от азимута для случая, приведенного на рис.27

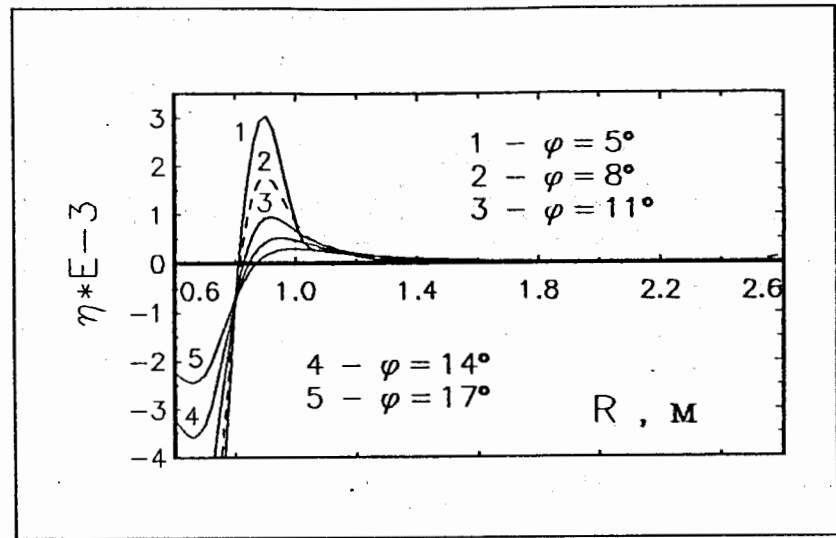


Рис.31. Зависимость относительного изменения поля от радиуса для случая, приведенного на рис.30

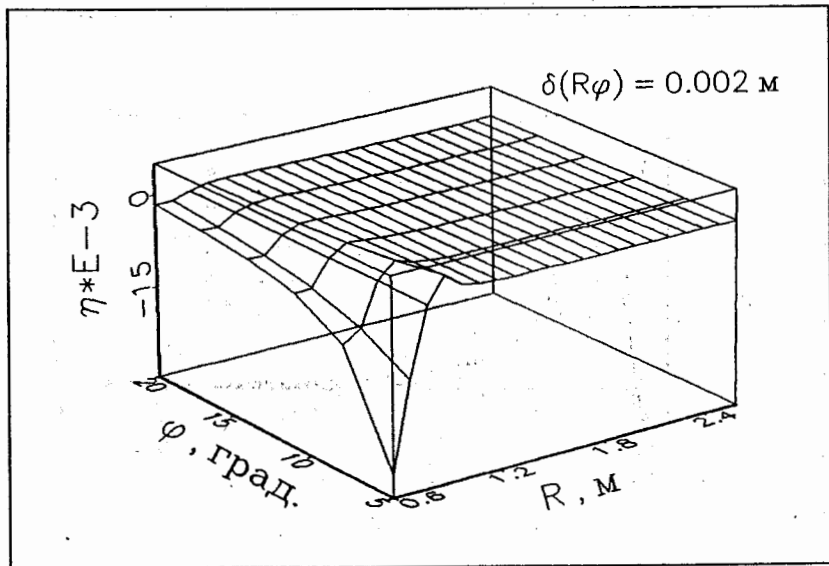


Рис.30. Относительное изменение поля в случае углового изгиба обмотки вокруг своей оси на величину $\beta = 0,744^\circ$

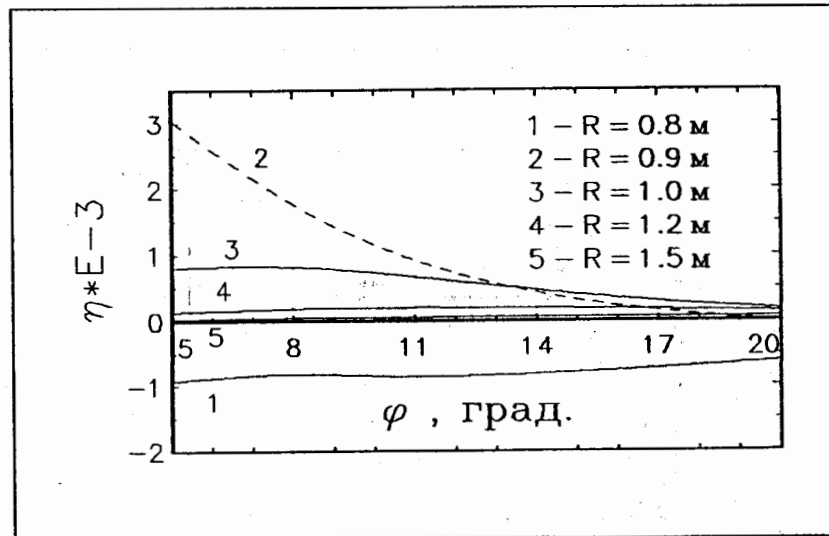


Рис.32. Зависимость относительного изменения поля от азимута для случая, приведенного на рис.30

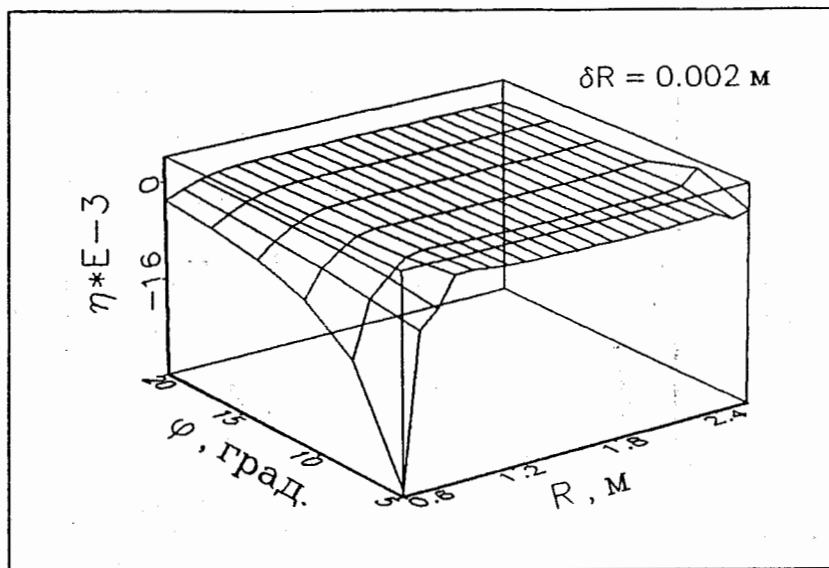


Рис.33. Относительное изменение поля в случае непараллельности аксиальных участков обмотки на величину δR

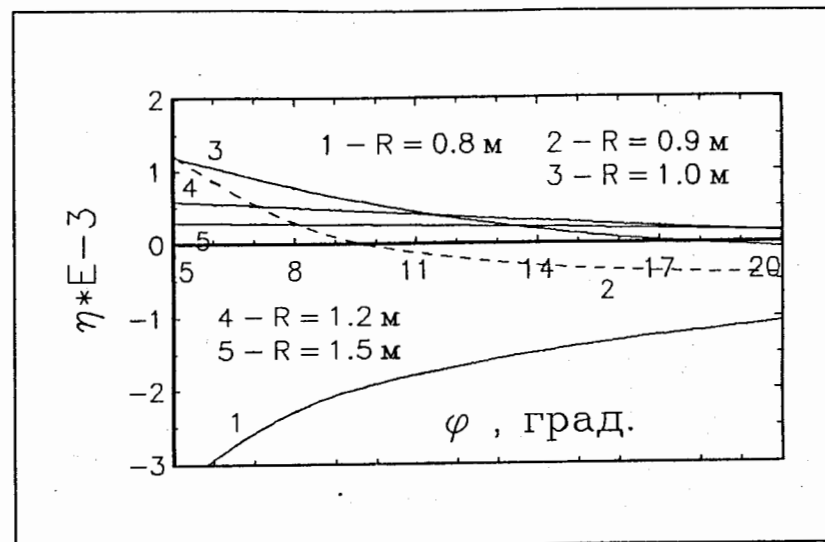


Рис.35. Зависимость относительного изменения поля от азимута для случая, приведенного на рис.33

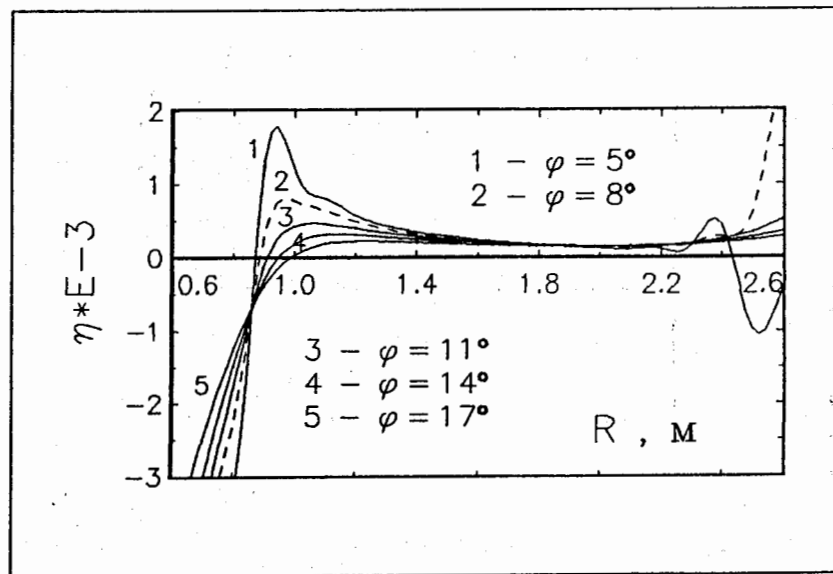


Рис.34. Зависимость относительного изменения поля от радиуса для случая, приведенного на рис.33

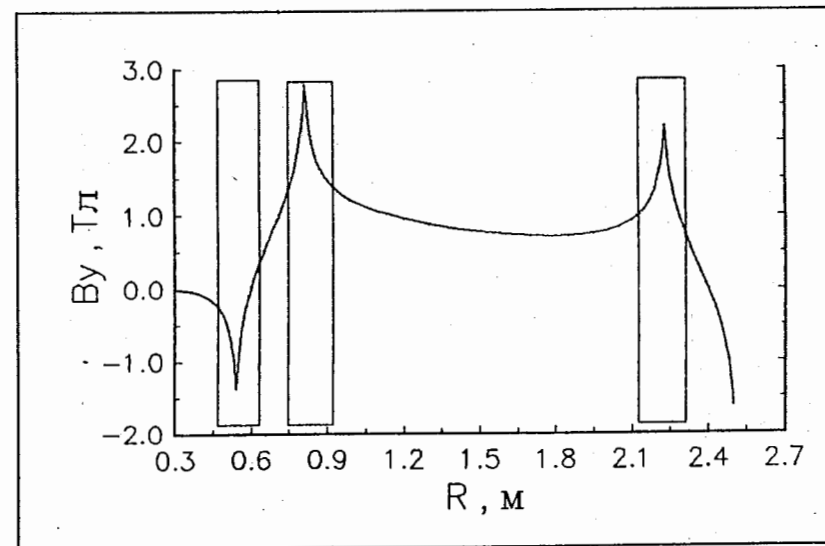


Рис.36. Характерный вид поля V_y от радиуса при малых углах.

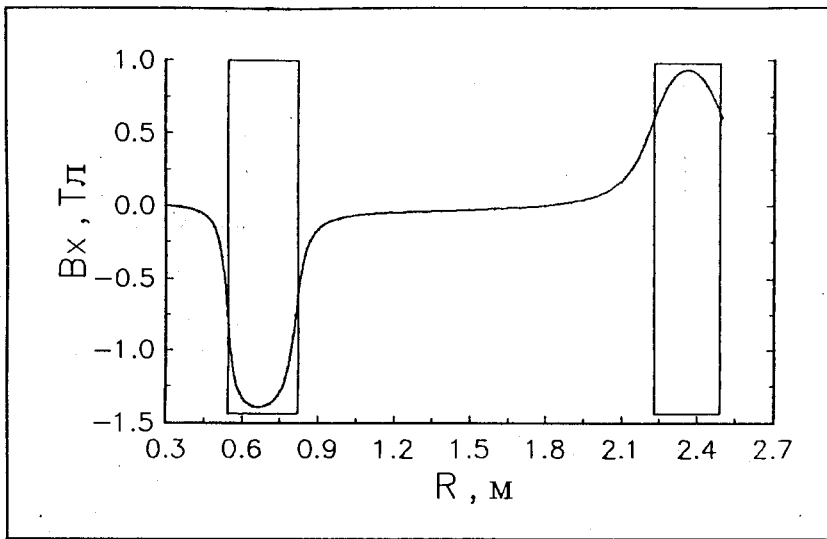


Рис.37. Характерный вид поля B_x от радиуса при малых углах

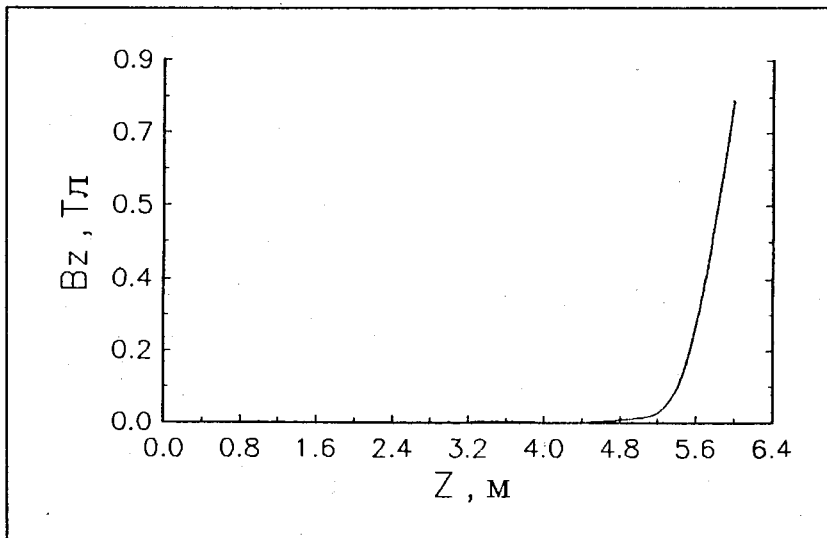


Рис.38. Характерный вид поля B_z от z

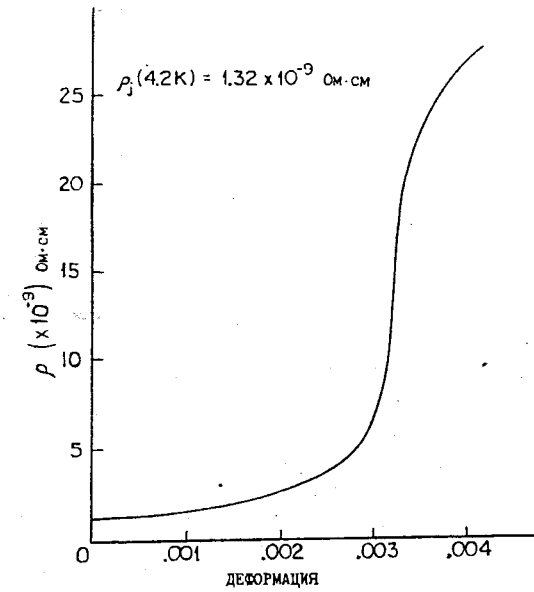


Рис.39. Удельное сопротивление после 1000 циклов нагружения в зависимости от величины относительной деформации алюминия высокой чистоты. Начальное RRR алюминия равно 2000^[8]

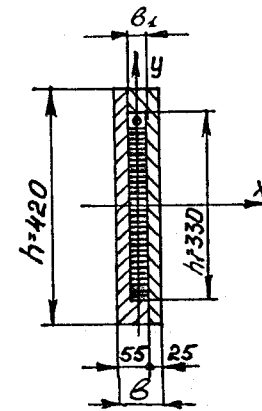


Рис.40. Сечение ложмента

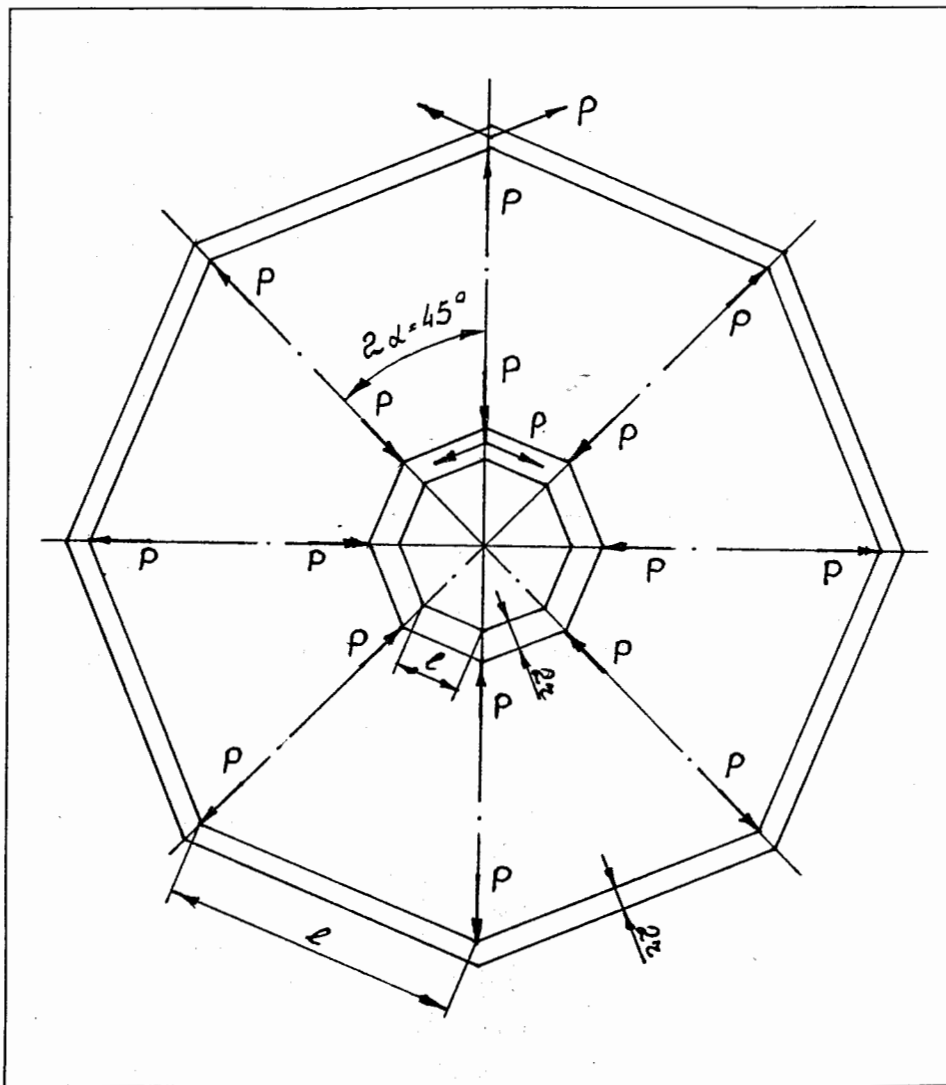


Рис.41. Внешняя и внутренняя рамы модуля и действующая нагрузка на них

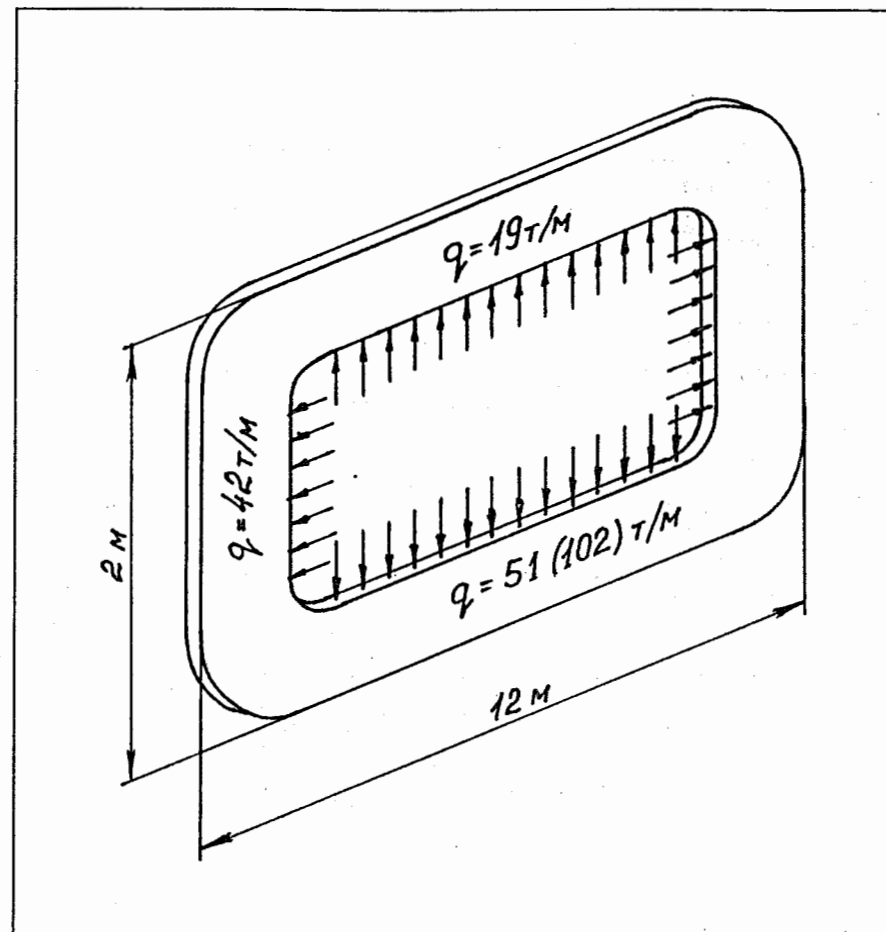


Рис.42. Габариты обмотки и нагрузка, действующая на ее участки

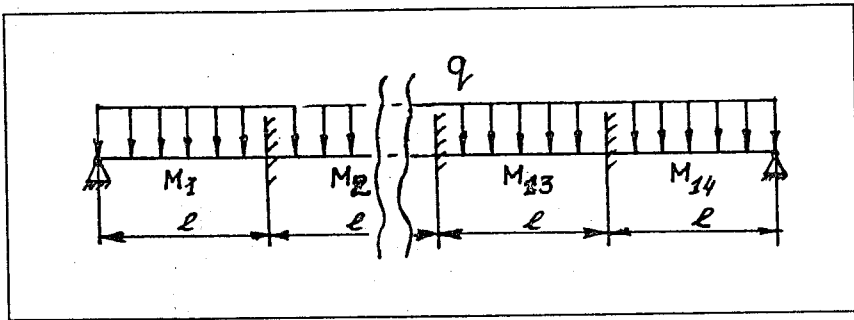


Рис.43.Эквивалентная схема нагружения прямолинейного внутреннего и внешнего участков обмотки

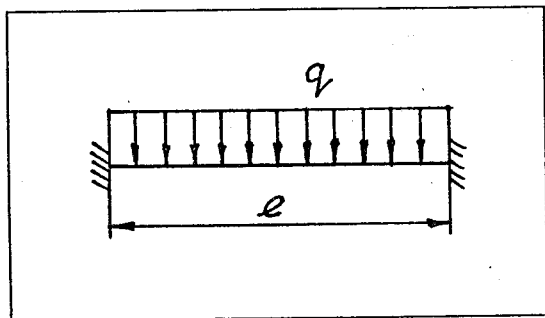


Рис.44.Эквивалентная схема нагружения прямолинейного вертикального участка обмотки

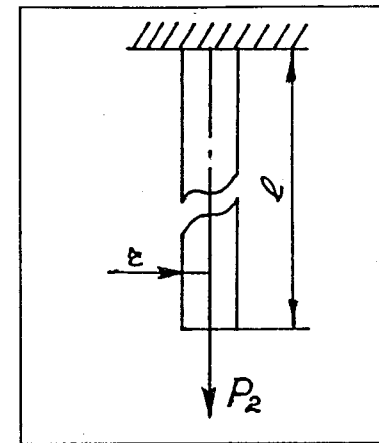


Рис.45.Эквивалентная схема нагружения стержней рам магнита

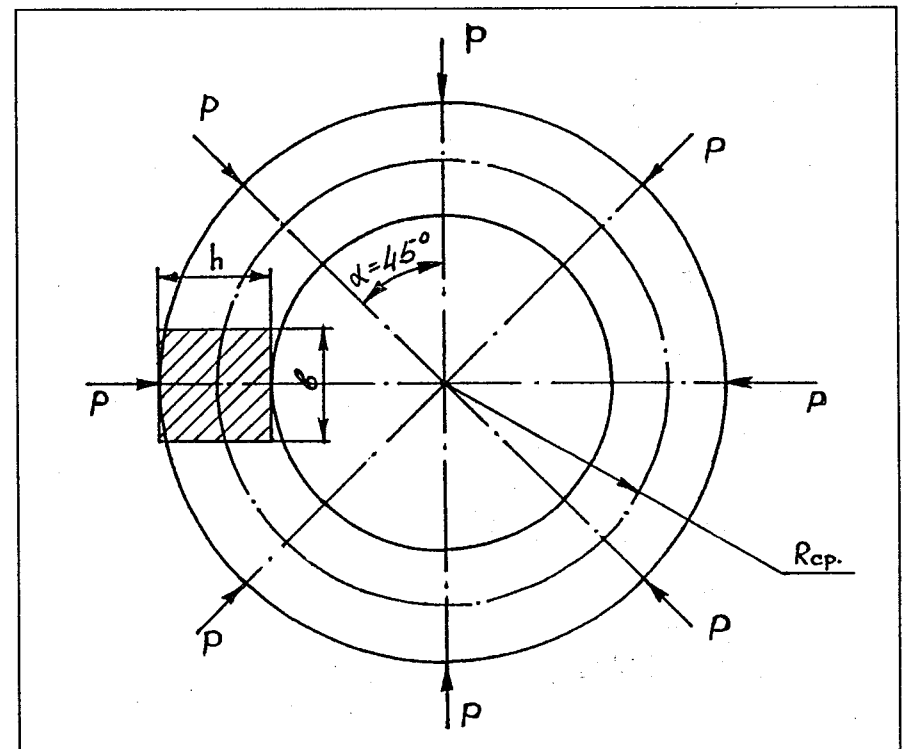


Рис.46.Внутренняя рама 2-го типа (кольцо) и ее схема нагружения

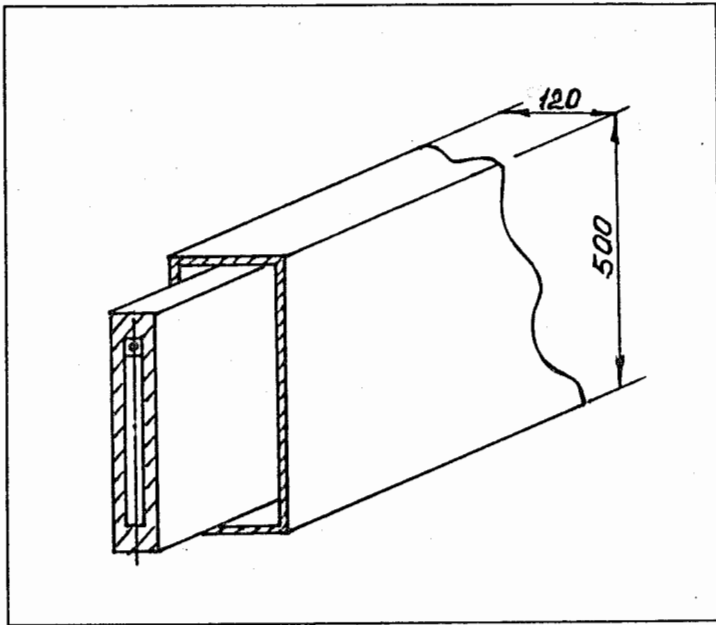


Рис.47. Вакуумный кожух обмотки

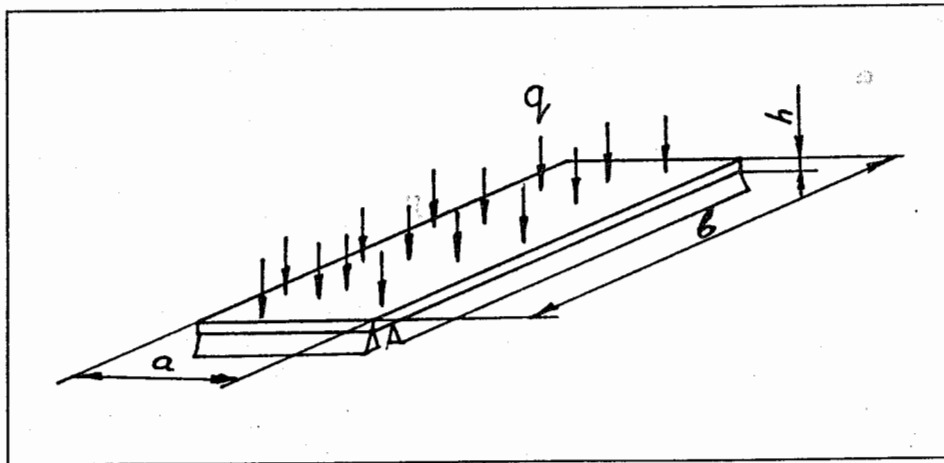


Рис.48.Эквивалентная схема нагружения участка вакуумного кожуха

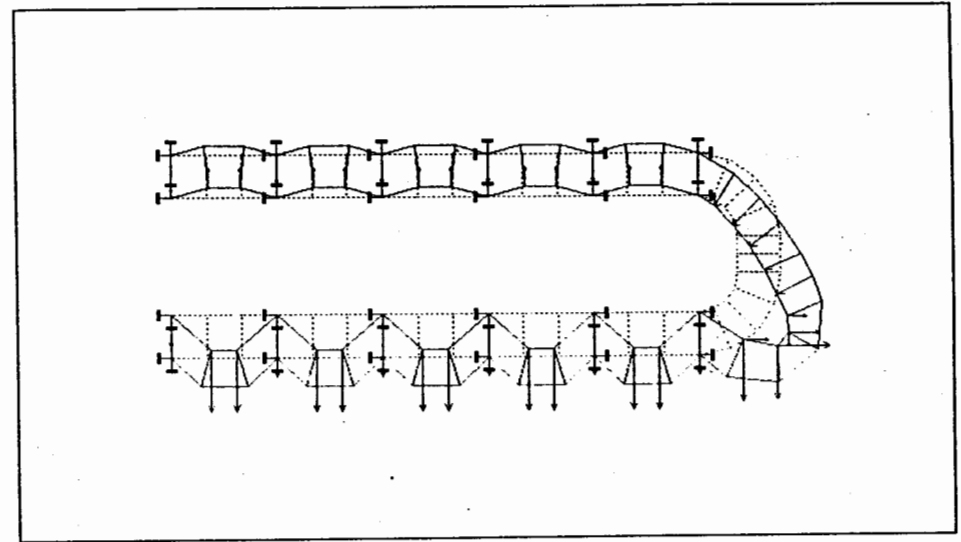


Рис.49.Картина деформирования ложеента модуля первого типа

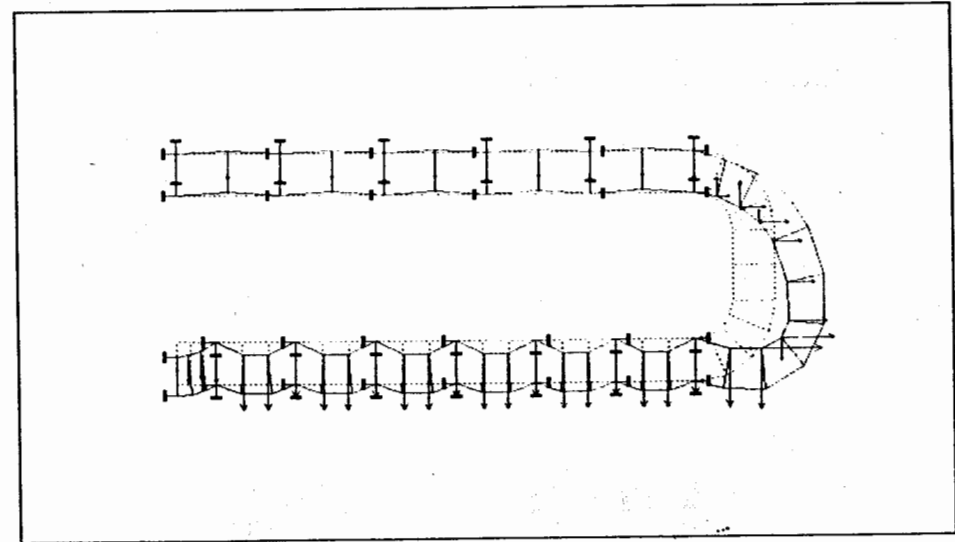


Рис.50.Картина деформирования ложеента модуля второго типа

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. D.Bollini et al. A High Luminosity Spectrometer for Deep Inelastic Muon Scattering Experiments, NIM 204 (1983), 333.
- [2]. Guoyot G., Genchev V., Golutvin I.A. et al. Study of Deep Inelastic Scattering Using a Superconducting Toroidal Spectrometer (STORS); STORS / Note 91, May 1991, Letter of Intent, Geneva, 1991.
- [3]. З.В.Борисовская, С.Б.Ворожцов и др. MAGSYS — комплекс программ по расчету трехмерных магнитостатических полей для циклотронных и синхротронных магнитных систем. ОИЯИ, Б1-9-85-232, Дубна, 1985.
- [4]. П.Ф.Кошелев. "Механические свойства сплавов для криогенной техники". Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1971.
- [5]. П.И.Орлов. "Основы конструирования". Кн.1. М.: Машиностроение, 1988.
- [6]. М.Уилсон. "Сверхпроводящие магниты". М.: Мир, 1985.
- [7]. Г.Брехна. "Сверхпроводящие магнитные системы". М.: Мир, 1976.
- [8]. H.R.Segal. Reinforced Aluminum as a Superconducting Magnet Stabilizer. IEEE Trans. on Mag., Vol. Mag-13, p.109,1977.
- [9]. Электротехнические материалы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- [10]. Справочник по композиционным материалам. Кн.1 М.: Машиностроение, 1988.
- [11]. И.А.Биргер, Б.Ф.Шорр, Г.Б.Носилевич. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1979.
- [12]. А.П.Яковлев, В.В.Матвеев, Г.С.Пискаленко. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988.
- [13]. В.Л.Агаиров, А.А.Амель, Л.Е.Андреева. Справочник машиностроителя, М.: Машгиз, 1962.
- [14]. Л.А.Розин. Основы метода конечных элементов в теории упругости. Л.,1972.

Андреев С.В. и др.
Сверхпроводящая магнитная система
тороидального спектрометра СТОРС.
Результаты расчетов

P1-92-379

В данной работе для проведения прецизионных измерений структурных функций в пучках мюонов представлены: расчет конструкции магнита, расчеты магнитной индукции и сил, действующих на элементы магнита, требования к прочности и жесткости несущих элементов конструкции магнита и соответствующие расчеты.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Andreev S.V. et al.
Superconducting Magnetic System
of Toroidal Spectrometr "STORS"

P1-92-379

In this paper for a providing of a precise measuring of the structure functions in muon beams it is presents: calculation of the magnet construction, calculation of the magnet induction and forces influencing the elements of the magnet, requirements to the reliability and rigidity of the carrying elements of the magnet construction and corresponding calculations.

The investigation has been performed at the Particle Physics Laboratory, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992

дел