

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Г.С. Виллевалд, В.Н. Карасюк,  
Г.И. Сильвестров, Т.В. Соколова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
СИЛЬНОПОЛЕВЫЕ ПОВОРОТНЫЕ МАГНИТЫ

ИЯФ 2006-5

Новосибирск  
2006

## **Экспериментальные сильнополевые поворотные магниты**

*Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк,  
Г.И. Сильвестров, Т.В. Соколова*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

### **Аннотация**

Описываются варианты сильнополевых (5 Тл) одновитковых магнитов для малогабаритного протонного синхротрона на энергию 200 МэВ. Приводятся результаты измерений магнитных полей, корректировки полей, результаты ресурсных испытаний. Описывается способ изготовления вакуумных камер к магнитам, а также приспособление для измерения геометрических размеров в труднодоступных местах, в частности, в глубине апертуры поворотных магнитов.

Описывается конструкция, расчет и результаты ресурсных испытаний септум - магнита с предельно тонким ножом (фольга толщиной 0.1 мм) и полем 5 Тл.

---

## 1. Одновитковые поворотные магниты

Для решения ряда прикладных задач с использованием ускорителей заряженных частиц средних энергий актуальной является разработка компактных, относительно дешевых ускорителей, пригодных для серийного производства [1,2]. Одним из направлений в решении этой проблемы представляется использование ведущих импульсных магнитных полей величиной 4 – 5 Тл [3]. В ИЯФ накоплен богатый опыт конструирования и исследования сильнополевых магнитов, различных их прототипов, моделей, а также отдельных фрагментов, например: исследование поведения токоведущих поверхностей при магнитных полях до 20Тл [4], исследование работоспособности контактных пар из различных материалов при больших плотностях тока [5] и др. В предлагаемой работе подробно рассматриваются только те конструкции, которые связаны с выбором оптимального варианта протонного синхротрона, разрабатывавшегося в ИЯФ [1]. Это, в первую очередь, одновитковые поворотно-фокусирующие магниты с насыщающимся железом [3], обеспечивающие минимум габаритов, веса и потребляемой энергии. С насыщением железа область однородного поля в апертуре уменьшается и, хотя в процессе ускорения частиц и адиабатического уменьшения размера пучка область требуемой однородности поля также уменьшается, эти два процесса не согласованы, поэтому исследовалась возможность повышения степени однородности поля с помощью корректирующих витков.

Наиболее ответственным элементом конструкций магнитов является токоведущая шина. Места перехода шины в закорачивающий их фланец и в токоподвод являются местами концентрации механических напряжений, поэтому соединение этих мест пайкой может существенно снизить прочность конструкции. Во избежание этого, шина изготавливается цельнофрезерованной совместно с закорачивающим фланцем и участком перехода шины к достаточно широкому токоподводу. Перед фрезеровкой заготовка

проверялась дефектоскопом, а затем подвергалась ковке для уплотнения и улучшения структуры материала. Чтобы шина не изменяла размеры после механической обработки, производились межоперационные отжиги материала. Механическая обработка шины производилась в специальном приспособлении, которое использовалось также для хранения готовой шины до сборки.

С точки зрения долговечности работы магнитов, как при механических нагрузках, так и при значительных радиационных нагрузках, наиболее слабым элементом в сильнополевых конструкциях оказывается электрическая изоляция. Поэтому в основу конструкций магнитов положена схема с жесткой фиксацией токоведущих шин в шихтованном магнитопроводе без изоляционных прокладок между ними. Благодаря этому сводится к минимуму нарушение однородности поля в углах апертуры (за счет исключения изоляционных зазоров [6]), а перенос изоляции за магнитопровод, который существенно шире шины, обеспечивает значительное снижение нагрузки на изоляцию. Однако в этом случае магнитопровод оказывается под потенциалом токоведущих шин, поэтому вводится дополнительный зазор  $\sim 100$  мк между половинками магнитопровода (обычно в зазоре помещается полиимидная пленка). Зазор такой величины не вносит существенных искажений в топографию магнитного поля в апертуре магнита. Изоляционная пленка не несет механических нагрузок, эту роль выполняет дополнительный изолятор, условия работы которого рассмотрены ниже.

При нагружении конструкции силами магнитного поля возможно раскрытие стыков между сопряженными элементами конструкции, что может привести к возникновению ударных нагрузок. С этой точки зрения в силовой конструкции нежелательно использование болтовых соединений, имеющих малую жесткость и склонных к снижению усилий затяжки в процессе работы. С целью решения задачи нераскрытия стыков, конструкции магнитов обеспечивают предварительную напряженность стыков. Это достигается путем сжатия стыков усилием, превышающим усилия, возникающие в конструкции при нагружении силами магнитного поля. Исследовались три способа выполнения этого условия. На короткой прямой модели предварительное сжатие конструкции можно обеспечить с помощью упругого биндажа. Перед посадкой биндаж нагревается до  $\sim 500^\circ\text{C}$ , а толщина его стенки выбирается такой, чтобы

после охлаждения обеспечить усилия в конструкции в нужных пределах. Короткий магнит, изготовленный по такой технологии, был испытан при поле 5 Тл на 7 млн. циклов нагружения импульсами тока длительностью  $\tau = 0.5$  мс.

Другой способ предварительного нагружения конструкции рассмотрим на примере монолитного варианта магнита. В этом магните шихтованный магнитопровод разделен на две части. Одна из них, внутренняя, представляет собой полукольца, напрессованные на шину. Другая, внешняя, силовая, выполнена в виде колец, охватывающих полукольца с шиной и воспринимающих нагрузки от сил магнитного поля. В результате силовая часть оказывается простой и жесткой, а корпус воспринимает, в основном, разгибающие усилия и служит основанием магнита. Предварительное напряжение конструкции достигается за счет пропитки изоляции эпоксидным компаундом под давлением 200 атм. и полимеризации компаунда при этом давлении в специальном автоклаве [7]. Чтобы апертура магнита, определяемая положением формирующих поле шин и шихтованного железа, напрессованного на них, имела достаточно точные размеры (с точностью до 0.05 мм), не изменяла своей формы и не заполнялась компаундом, при сборке и пропитке использовались специальные оправки.

Ввиду значительной трудоемкости изготовления поворотного магнита, а также с целью упрощения исследования характеристик магнита (топография магнитного поля, влияние вакуумной камеры на распределение поля в апертуре, эффективность корректировки магнитного поля и др.) было решено проверить технологию изготовления и работоспособность этого варианта магнита на сравнительно короткой (25 см) прямой модели, конструкция которой показана на Рис. 1. Полукольца шихтованного магнитопровода 4 изготовлены из конструкционной стали марки Сталь 08КП штамповкой. Поверхность их покрыта изоляционной окисной пленкой, полученной в результате специального отжига. Полукольца напрессовываются на шину и дополнительно закрепляются на ней шпонками 5. Окончательное положение полуколец относительно шин устанавливается путем обжатия специальной оправкой, чем сводятся к минимуму неровности плоскостей железа, ограничивающих апертуру магнита. При этой операции изолятор 12 заменяется металлической фольгой такой же толщины, которая после опрессовки удаляется и устанавливаются изоляторы 12 и 6. Изолятор 12

изготовлен из полиимидной пленки, а изоляторы 6 и 11 из листового стеклотекстолита марки СТЕФ. Каркас изоляции 8 изготовлен путем намотки стеклотенты на магнитопровод 4. Наружный магнитопровод 7 изготовлен из фосфатированной стали Э420. После полной сборки модели и установки в апертуру оправки из фторопласта производится пропитка и полимеризация в автоклаве под давлением 200 атмосфер. Пропитка под давлением позволила заполнить компаундом все имеющиеся пустоты и зазоры, а полимеризация под давлением решает задачу ее предварительного напряжения.

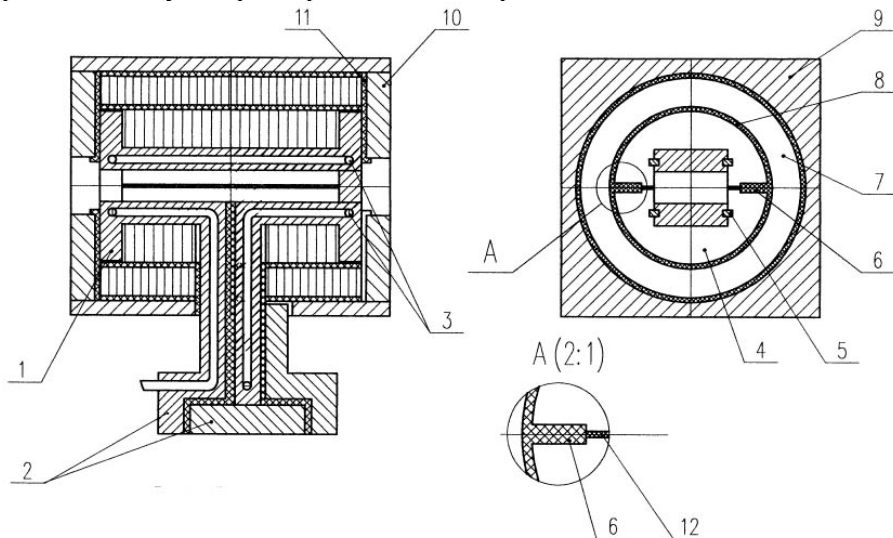


Рис. 1. Прямая модель магнита.

1 - шина, 2 - токоподводы, 3 - каналы охлаждения, 4 - внутренний магнитопровод, 5 - шпонки, 6,8,11,12 - изоляторы, 7 - наружный магнитопровод, 9 - корпус, 10 - фланец.

Модель была запитана током  $I = 186$  кА, соответствующим полю в центре апертуры  $H = 5$  Тл, длительность импульса тока  $\tau = 2.8$  мс, частота следования импульсов 5 Гц. Произведено 2 млн. импульсов. Дальнейшее испытание модели признано нецелесообразным и было решено изготовить поворотный магнит с максимальным полем 5 Тл для протонного синхротрона на энергию 200 МэВ [1] (средний радиус магнита  $R = 430$  мм).

В отличие от модели в конструкции и технологии изготовления поворотного магнита имеется ряд особенностей. Чтобы при сборке и пропитке не изменялся размер между шинами, а апертура не

заполнялась компаундом, полость апертуры заполнялась специальным сплавом индия с оловом, представляющим собой эвтектику с критической температурой  $117^{\circ}\text{C}$  [сплав не плавится при полимеризации компаунда ( $95 - 100^{\circ}\text{C}$ ) и еще не нарушаются свойства компаунда]. Перед заливкой сплава производился контроль размеров апертуры с помощью обычных мерительных инструментов, а также специально изготовленного приспособления с электроконтактным датчиком, которое позволяет с точностью  $\sim 0.04$  мм проверить радиальные размеры апертуры на любом уровне по вертикали и в любом сечении по длине магнита, а также проконтролировать радиусы кривизны шин. Конструкция его будет описана ниже. Заполнение апертуры сплавом производилось в специальном приспособлении. Шины с приспособлением перед заливкой прогревались до температуры  $\sim 110^{\circ}\text{C}$  для лучшего заполнения (без пор) полости апертуры и получения минимального усадочного зазора между сплавом и шиной. После заливки и отвердения сплава вновь контролировались наружные размеры шины и её радиус.

В связи с тем, что магнитопровод представляет собой тор, каркас изоляции изготавливается путем намотки на магнитопровод стеклоленты по специальной технологии, обеспечивающей одинаковую толщину каркаса по всему периметру магнитопровода. После изолирования магнитопровод в специальном приспособлении помещается в автоклав, где под давлением 200 атм. производится пропитка и полимеризация компаунда. Введение промежуточной пропитки вызвано необходимостью проверки качества изоляции перед сборкой внешнего магнитопровода, а специальное приспособление предотвращает изменение формы шины с магнитопроводом при пропитке, а также формирует посадочную поверхность перед очередной операцией сборки магнита. После пропитки и полимеризации производится удаление сплава из апертуры путем его расплавления (с помощью прогрева трубок, вложенных в апертуру перед заливкой). После остывания магнита специальной прошивкой зачищалась апертура от остатков сплава, а затем проводился повторный контроль размеров апертуры. В результате проведенных измерений установлено, что максимальное отклонение образующих шин от параллельности (на одном и том же азимуте) не превышает 0.04 мм, а максимальное отклонение радиуса по всей длине магнита не превышает 0.35 мм.

Обладая рядом преимуществ, монолитный магнит имеет существенные недостатки. Во-первых, неразборность усложняет установку вакуумной камеры и практически исключает возможность ремонта и, тем более, замены элементов конструкции. Кроме того, усилия предварительного напряжения в значительной степени неопределенны и неконтролируемы. По этим причинам был разработан разборный вариант магнита, в котором предварительное нагружение обеспечивается с помощью клиньев. Поперечное сечение магнита изображено на Рис.2. Эта конструкция так же, как и монолитная, обладает достаточной жесткостью, поскольку в ней отсутствуют болтовые соединения, воспринимающие усилия от магнитного поля.

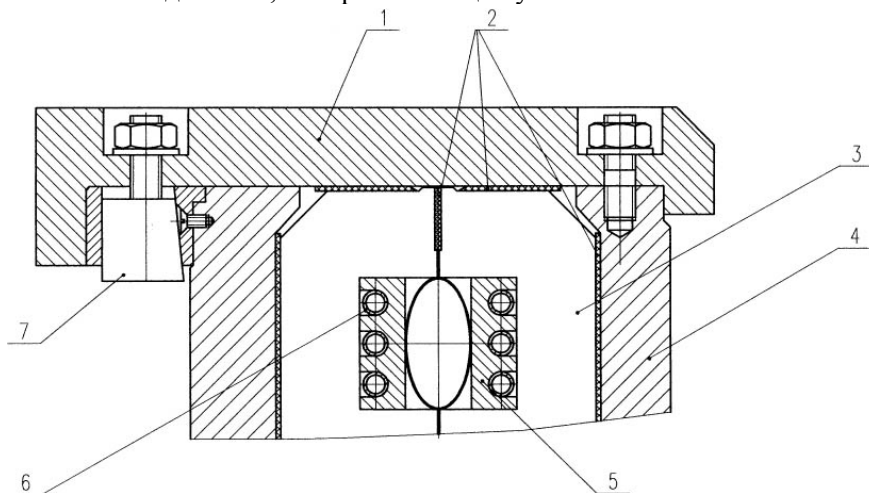


Рис. 2. Вариант разборного магнита.

1 - скоба, 2 - изоляторы, 3 - пластина магнитопровода, 4 - опорная стойка, 5 - шина, 6 –трубка охлаждения, 7 - клин.

Для определения величин усилий и соответствующих им напряжений, действующих в деталях, необходимо знать параметры механической колебательной системы магнита и соответствующую величину коэффициента динамичности. Определение параметров системы производится при следующих условиях:

1. Магнит запитывается одиночным униполярным синусоидальным импульсом тока длительностью  $\tau = T/2$ .
2. Колебательная система без затухания, но ко времени действия очередного импульса тока в ней нет остаточных колебаний. (Решение задачи при затухающем токе и с учетом остаточных колебаний приведено в работах [4,8]).



При протекании по шинам синусоидального тока на систему действуют силы (без учета затухания) вида

$$P_0 \cdot \sin^2 \omega t .$$

Вынужденные колебания системы под воздействием этой силы описываются уравнением:

$$m\ddot{y} + cy = P_0 \cdot \sin^2 \omega t ,$$

решение которого при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y = \frac{P_0}{m p} \int_0^t \sin^2 \omega \tau \cdot \sin p(t - \tau) d\tau ,$$

где  $P_0$  – максимальное значение вынуждающей силы,  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний,  $m$  – масса,  $c$  – жесткость системы,  $p$  – угловая частота собственных колебаний

$$p = \sqrt{\frac{c}{m}} .$$

Интегрирование дает следующее значение для перемещений:

$$y = \frac{P_0}{m p^2} \left[ \frac{\sin^2 \omega t - k^2 \sin^2 \frac{\omega}{k} t}{1 - k^2} \right] ,$$

где  $k = 2\omega / p$  – параметр динамичности. Максимальное значение выражения в скобках представляет собой коэффициент динамичности “ $\eta$ ”, зависимость которого от параметра динамичности “ $k$ ” показана на Рис. 3. На рисунке приведены также коэффициенты остаточных колебаний “ $\eta_0$ ”, определяющие амплитуды колебаний после снятия нагрузки (одиночного униполярного синусоидального импульса).

Максимальное перемещение  $y_{\max} = y_{\text{stat}} \cdot \eta$  ,

где  $y_{\text{stat}} = \frac{P_0}{m p^2} = \frac{P_0}{c}$  – перемещение под воздействием статической

силы  $P_0$ . Поскольку система работает в области упругих деформаций, для действующей силы  $P_\phi$  можно записать:  $P_\phi = P_0 \cdot \eta$ . В зависимости от соотношения частот собственных и вынужденных колебаний из графика на Рис. 3 можно выделить области значений  $\eta$ , соответствующие трем видам нагружения:

1. Статическое, при  $\eta = 1$  ( $2\omega < p$ ).
2. Динамическое, когда  $\eta$  возрастает от 1 до  $\sim 1.7$ , а затем падает, устремляясь к 0.
3. Динамическое с весьма коротким импульсом возмущающей силы ( $\omega \gg p$ ), где коэффициент динамичности  $\eta \ll 1$  и для определения усилий, возникающих в нагружаемой системе, можно воспользоваться методом расчета с использованием импульса возмущающей силы  $p \cdot \tau = m \cdot v$ .

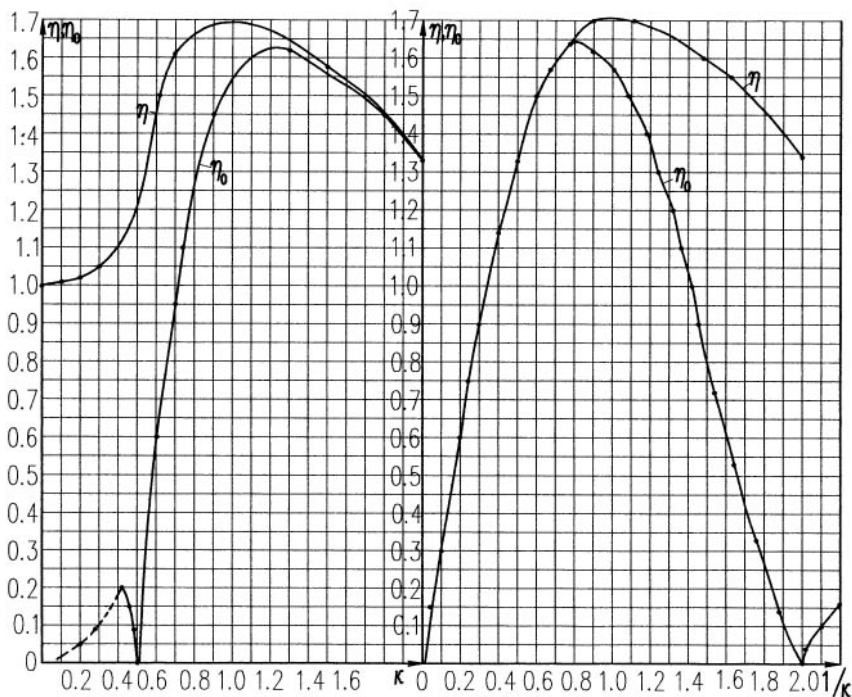


Рис. 3.

$\eta$  - коэффициенты динамичности,  $\eta_0$  - коэффициенты остаточных колебаний,  $k$  - параметры динамичности,  $k = 2\omega/p$ .

При расчете рассматриваемых вариантов магнитов используются первые два вида нагружения, третий вид используется при расчете септум - магнита, описываемого ниже.

В предварительном расчете, когда точные детали магнита неизвестны (поэтому неизвестны и собственные частоты колебаний в магните), рассматривается случай резонансного нагружения одно-

кратно действующей силой. В этом случае  $\eta \approx 1.7$ , а действующая сила  $p_{\delta} = p_{\mathcal{M}} \cdot \eta$ . Сила магнитного поля  $P_{\mathcal{M}}$ , нагружающая шину, равна:  $P_{\mathcal{M}} = p_{\mathcal{M}} \cdot b_{ш} \cdot l_{ш}$ , где  $p_{\mathcal{M}}$  – давление магнитного поля,  $b_{ш}$  – ширина шины,  $l_{ш}$  – длина шины. Поскольку шина нагружена вдоль магнита одинаково, при расчете деталей магнита (опорные стойки, стяжные скобы, см. Рис. 4) рассматривается не вся их длина, а полоска единичной длины  $l_{ш} = 1$  см. В этом случае  $P_{\mathcal{M}} = p_{\mathcal{M}} \cdot b_{ш}$ , а действующее усилие

$$P_{\delta} = p_{\mathcal{M}} \cdot \eta \cdot b_{ш}. \quad (1)$$

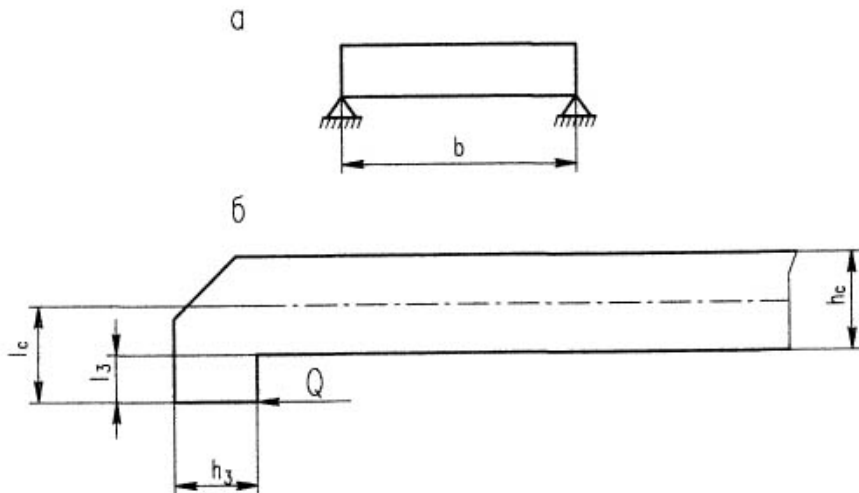


Рис. 4. Расчетные схемы.  
а – опорная стойка, б – скоба.

При изгибе опорной стойки (Рис. 4,а) под действием распределенного усилия имеем:

$$M_u = \frac{P_{\delta} \cdot b}{8}, \quad W = \frac{l_{ш} \cdot h^2}{6} = \frac{h^2}{6},$$

где  $h$  – толщина стойки.  $\sigma = \frac{M_u}{W} = \frac{P_{\delta} \cdot b \cdot 6}{8h^2} = \frac{3P_{\delta} \cdot b}{4h^2}$ , отсюда следует

$$h = \sqrt{\frac{3P_{\delta} \cdot b}{4\sigma}}. \quad (2)$$

Усилие, действующее на стяжную скобу (Рис. 4,б):  $Q = P_{\delta} / 2$ .

Изгиб зацепа:  $M_u = Q \cdot l_3$ ,  $W = \frac{l_{uu} \cdot h_3^2}{6} = \frac{h_3^2}{6}$ ,  $\sigma = \frac{M_u}{W} = \frac{Q \cdot l_3 \cdot 6}{h_3^2}$ ,

откуда

$$h_3 = \sqrt{\frac{6Q \cdot l_3}{\sigma}}. \quad (3)$$

Смятие зацепа:  $\sigma = \frac{Q}{l_{uu} \cdot l_3} = \frac{Q}{l_3} \leq [\sigma]$ .

Толщина скобы из условия изгиба:  $M_u = Q \cdot l_c$ ,  $W = \frac{l_{uu} \cdot h_c^2}{6} = \frac{h_c^2}{6}$ ,  
 $\sigma = \frac{6Q \cdot l_c}{h_c^2}$ , откуда

$$h_c = \sqrt{\frac{6Q \cdot l_c}{\sigma}}. \quad (4)$$

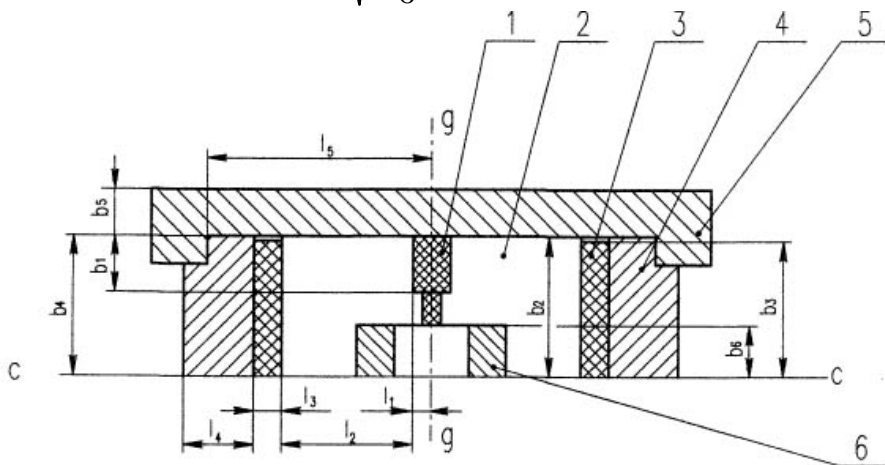


Рис. 5. Схема магнита.

1,3 - изоляторы, 2 - магнитопровод, 4 - опорная стойка, 5 - стяжная скоба, 6 - токоведущая шина.

Для нахождения величин, определяющих магнит, как колебательную систему ( $c$ ,  $m$ ,  $p$ ), представим магнит в виде, показанном на Рис. 5. Конструкция магнита симметрична относительно оси "с-с" поэтому на рисунке изображена одна половинка магнита. Магнит нагружается симметрично относительно оси "а-а", ось остается неподвижной, поэтому ее можно рассматривать как абсолютно жесткую стенку, а

расчетную схему можно представить в виде Рис.6,а, или, обозначив жесткости участков, в виде Рис. 6,б. Из предварительно определенных конструктивных размеров видно, что основной массой обладают детали 2 и 4, а большей жесткостью детали 2, 3, и 4, поэтому схему можно преобразовать к виду Рис. 6,в, где  $c_5$  – жесткость детали 5 (скобы),  $c_1$  – жесткость изолятора,  $M$  – суммарная масса деталей 2, 4

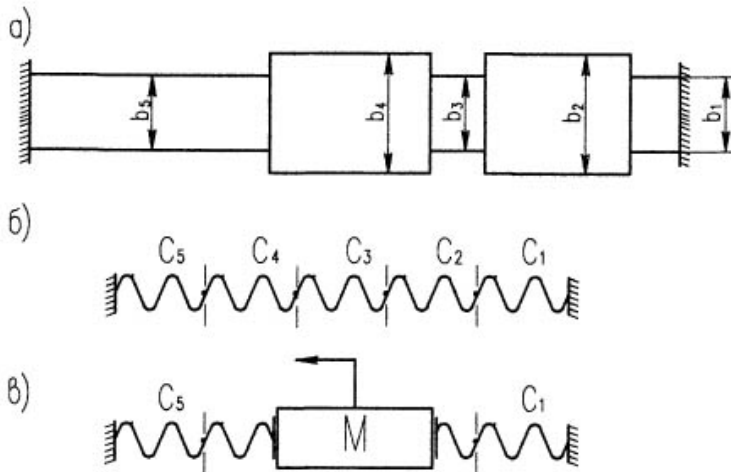


Рис. 6.

а, б, в – элементы колебательной системы.

и приведенной массы детали 5. В такой системе суммарная жесткость определится как жесткость параллельного соединения [9],  $c = c_1 + c_5$ ,

тогда угловая частота собственных колебаний:  $p = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{c}{M}}$ , где

$$M = m_2 + m_4 + \frac{1}{3}m_5, \text{ или}$$

$$M = [(l_2 + l_4)b_2 + \frac{1}{3}l_5 \cdot b_5] \cdot \gamma \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

$$c = c_1 + c_5 = \frac{b_1 \cdot E_1}{l_1} + \frac{b_5 \cdot E_5}{l_5}. \quad (6)$$

Полупериод собственных колебаний магнита

$$\tau_c = T/2 = \pi/p = \pi \sqrt{\frac{M}{c}}. \quad (7)$$

Задавшись временем действия возмущающей силы  $\tau_g$ , получаем

частоту возмущающей силы  $\omega = \pi / \tau_e$  и параметр динамичности

$$k = \frac{2\omega}{p} = \frac{2\tau_c}{\tau_e}. \quad (8)$$

Далее находится коэффициент динамичности  $\eta$  (Рис. 3) и проводится расчет элементов конструкции.

Введем некоторые обозначения:

1. При состоянии равновесия:  $S_1$  – усилие предварительного сжатия деталей 1,2,3,4,  $S_5$  – усилие предварительного растяжения детали 5. Поскольку система в равновесии,  $S_1 = S_5$ .
2. После перемещения влево от равновесного состояния под действием сил  $P_\partial = P_m \cdot \eta$  при полной остановке системы:  $S_1'$  – остаточное усилие в детали 1, необходимое для выполнения условия нераскрытия стыка в плоскости “а–а”,  $S_5'$  – максимальное усилие в детали 5 (а так же в деталях 2,3,4),  $S_5' = P_\partial + S_1'$ .
3. После перемещения вправо под действием инерционных сил при остановке системы:  $S_5''$  – величина остаточного усилия в детали 5, обеспечивающая нераскрытие стыка между деталями 4 и 5,  $S_1''$  – максимальное усилие в детали 1 (и деталях 2,3,4),  $S_1'' = S_5'' + P_\partial$ ,  $S_5'' = S_1'' - P_\partial$ .

Детали системы, деформированные предварительно усилием  $S_1 = S_5$ , после приложения силы  $P_\partial$  изменяют величину своей деформации. Сила, вызывающая изменение деформации в детали 1, равна  $S_1 - S_1'$ , а соответствующая ей деформация  $(S_1 - S_1') / c_1$ . Сила, вызывающая изменение деформации в деталях 2,3,4,5, равна  $S_5' - S_1 = S_1' + P_\partial - S_1$ , а соответствующие ей деформации в деталях  $(S_1' + P_\partial - S_1) / c_i$ , где  $i = 2,3,4,5$  соответствуют номерам деталей. Жесткости деталей соответственно равны  $c_i = b_i \cdot E_i / l_i$ . Чтобы не раскрылся стык в сечении “а–а” после действия сил  $P_\partial$  и перемещения системы в крайнее левое положение (система остановилась и находится в равновесном состоянии), должно соблюдаться условие равенства изменения деформации детали 1 сумме изменений деформаций деталей 2,3,4 и 5, т.е.,

$$(S_1 - S_1') / c_1 = (S_1' + P_\partial - S_1) \left( \sum_{i=2}^{i=5} 1 / c_i \right),$$

$$S_1 - S_1' = P_\partial \left[ \left( \sum_{i=2}^{i=5} 1 / c_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{i=5} 1 / c_i \right) \right] = P_\partial \cdot A,$$

$S_1 = S_1' + P_\partial \cdot A$ , где  $A$  – отношение сумм в квадратных скобках.

Минимальное усилие предварительного нагружения из условия нераскрытия стыка будет при  $S_1' = 0$ , т.е.  $S_1^{\min} = P_\partial \cdot A$ , тогда  $S_1 = S_1^{\min} + S_1'$ . В случае статического нагружения ( $\eta = 1$ ) усилие предварительного нагружения определится:  $S_1^{ctam} = S_1' + P_\partial \cdot A$  или  $S_1^{ctam} = S_1^{\min ctam} + S_1'$ .

При перемещении элементов системы слева направо сила, вызывающая изменение деформации в детали 5, равна  $S_5' - S_5''$ , а соответствующая ей деформация  $(S_5' - S_5'') / c_5$ . Сила, вызывающая изменение деформаций в деталях 1,2,3,4, равна  $S_1'' - S_1'$ , а соответствующие ей деформации в деталях  $(S_1'' - S_1') / c_i$ . Чтобы не раскрылся стык между деталями 4 и 5 при движении системы вправо, необходимо, чтобы при остановке системы в крайнем правом положении изменение деформации детали 5 равнялось сумме изменений деформаций деталей 1 ÷ 4:

$$(S_5' - S_5'') / c_5 = (S_1'' - S_1') \left( \sum_{i=1}^{i=4} 1 / c_i \right).$$

С учетом того, что  $S_5' = P_\partial + S_1'$ , а  $S_5'' = S_1'' - P_\partial$ ,

$$(2P_\partial + S_1' - S_1'') / c_5 = (S_1'' - S_1') \left( \sum_{i=1}^{i=4} 1 / c_i \right).$$

$$S_1'' - S_1' = 2P_\partial / \left[ c_5 \left( \sum_{i=1}^{i=5} 1 / c_i \right) \right],$$

$$S_1'' = S_1' + 2P_\partial / \left[ c_5 \left( \sum_{i=1}^{i=5} 1 / c_i \right) \right].$$

Задавая остаточное усилие в деталях 1 или 5 ( $S_1'$  или  $S_5''$ ), по приведенным формулам можно найти усилия, возникающие в любой детали, а затем и соответствующие механические напряжения. Если было задано значение  $S_1'$ , то находится величина остаточного усилия  $S_5''$  (и наоборот). Величины  $S_1'$  и  $S_5''$  не могут иметь отрицательных значений, это бы означало, что в процессе перемещений произошло раскрытие стыков ( $S_1' = 0$  или  $S_5'' = 0$ ). Если в результате расчета одно из значений остаточных усилий получилось отрицательным, необходимо повторить расчет, увеличив усилие предварительного сжатия деталей, либо подкорректировать жесткости деталей, определяющих величины остаточных усилий.

Прочностной расчет механической системы проводился при следующих условиях. Амплитуда магнитного поля  $B = 5$  Тл, длительность импульса тока  $\tau = 2$  мс, ширина токоведущей шины  $b_{ш} = 4$  см. Величины модулей упругости  $E_1 = E_3 = 2 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>,  $E_2 = E_4 = E_5 = 2 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>. Задаваясь напряжениями в деталях 4 и 5 ( $\sigma_{4,5} = 800$  кг/см<sup>2</sup>), по формулам 1÷4 определялись размеры деталей 4 и 5, затем по формулам 5÷8 находились величины  $M, c, \tau_c, k$ . Как показали расчеты, коэффициент динамичности  $\eta$  при  $\tau = 2$  мс близок к 1, т.е. нагружение статическое. Полученные величины напряжений не превышают допусковых величин и в случае  $\eta = 1.7$ , что позволяет надеяться, что магниты будут работать достаточно надежно.

Размеры магнитов, изготовленных для малогабаритных синхротронов, можно найти в чертежах, имеющихся в архивах ИЯФ: по протонному синхротрону – чертежи ЦЭ.469, 19.05.1983г. (5 Тл, 200 кА, 10 Гц,  $\tau = 4$  мс) и ЦЭ.504, декабрь 1989г. По электронному синхротрону – ЦЭ.495, 17.01.1989г. (2 Тл).

С целью проверки работоспособности магнитов был проведен ряд исследований.

- 1) При последовательно соединенных четырех магнитах при поле в них 4 Тл произведено  $10^6$  импульсов. Параллельно оптимизировалась силовая пусковая и коммутирующая аппаратура, совершенствовалась система охлаждения (в процессе испытаний в двух магнитах от перегрева распаялись токоподводы) и др.



- 2) Проведена большая серия измерений магнитных полей внутри апертуры и на краях магнита, с вакуумной камерой и без нее, на различных длительностях импульсов тока и в различных фазах поля.
- 3) Исследовалась возможность корректировки магнитных полей с помощью корректирующих катушек.

Остановимся подробнее на измерениях магнитных полей. Измерения проводились с помощью индукционных датчиков, как одиночных, перемещаемых в апертуре магнита с помощью координатного механизма, приводимого в действие шаговыми двигателями, так и с помощью матриц, перемещение которых в кривых моделях магнитов обеспечивалось гибкой тягой. Для измерений без камеры использовалась прямоугольная матрица с 25-ю датчиками, установленными на координатах:  $r = 0, \pm 0.375, \pm 0.75$  (см),  $z = 0, \pm 0.73, \pm 1.46$  (см). Измерения с камерой проводились с эллиптической матрицей с 17-ю датчиками на координатах:  $r = 0, \pm 0.21, \pm 0.63$  (см),  $z = 0, \pm 0.65, \pm 1.3$  (см). Отдельный датчик использовался как опорный, на который нормировались различные измерения. Датчики наматывались медным проводом диаметром 40 мк на капроновый каркасик с внешним диаметром 3.5 мм и высотой 3 мм, число витков 1300, активное сопротивление  $\sim 180$  Ом. Матрицы калибровались в специальном магните с точностью поля  $10^{-4}$ . Сигналы с датчиков через сопротивление  $\sim 150$  кОм посылались на интегратор, управляемый компьютером.

Таблица 1

$z \setminus r$	-0.75	-0.375	0	0.375	0.75
1.46	0.9822	0.9488	0.9393	0.9496	0.9813
0.73	1.0005	0.9923	0.9879	0.9921	1.0020
0	1.0107	1.0037	1	1.0025	1.0108
-0.73	1.0002	0.9917	0.9886	0.9915	1.0034
-1.46	0.9873	0.9546	0.9411	0.9494	0.9842

В Таблице 1 представлены результаты измерения полей в апертуре, отнесенные к полю в центре ее ( $r = z = 0$ ), при амплитуде поля 5 Тл и длительности импульса  $\tau = 2.5$  мс.

Корректирующие катушки представляют собой по 3 витка, соединенные последовательно. Координаты продольных осей проводов, образующих витки,  $r = \pm 0.27, \pm 0.55, \pm 0.88$  (см),  $z = \pm 1.88, \pm 1.75, \pm 1.45$  (см). Диаметр провода витков не более 1.4 мм. Как видно

из Рис. 7, витки располагаются за вакуумной камерой. Катушки запитываются от отдельного генератора. Исследовалась возможность корректировки поля в широком диапазоне, от фазы инжекции частиц в ускоритель до фазы  $90^\circ$  – вывода частиц.

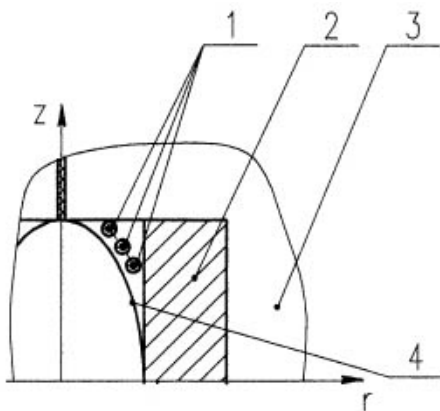


Рис. 7.

1 - корректирующая катушка, 2 - токовая шина, 3 - магнитопровод, 4 - вакуумная камера.

Таблица 2

$z \setminus r$	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6
1.3				0.998			
1.2				0.997			
0.9			0.994	0.9952	0.9948		
0.6		0.9956	0.9963	0.9964	0.9963	0.9968	
0.3	1.0004	0.9982	0.9983	0.9985	0.9984	0.9985	0.9997
0	1.0016	1.0014	0.9998	1	0.9997	1.0006	1.0026
-0.3	1.0013	1.0011	1.0000	0.9998	1.0010	1.0011	1.0026
-0.6		1.0000	0.9986	0.9986	1.0000	0.9988	
-0.9			0.9973	0.9974	0.9989		
-1.2				0.9967			
-1.3				0.9976			

В этой таблице представлены результаты измерения полей с корректирующими катушками при амплитуде синусоидального импульса тока в них 2.5 кА и длительности импульса  $\tau = 100$  мкс, т.е. представлены результаты коррекции поля вблизи его максимума, перед выводом частиц (длительность основного поля в магните составляла  $\tau = 2.5$  мс).

Из таблиц видно, что корректирующие катушки весьма существенно улучшают равномерность поля. При увеличении длительности коррекции поля (например, от начала насыщения железа до максимума поля) эффективность коррекции синусоидальным импульсом снижается, поскольку возрастание искажения поля с насыщением железа, как и другие искажения, отличается от синусоидального закона.

Следует заметить, что провода корректирующих витков подвергаются действию значительных импульсных механических нагрузок, поэтому необходимо обеспечить их жесткое крепление.

## **2. Вакуумные камеры**

В магнитах используются наиболее простые и надежные в эксплуатации металлические камеры. Толщина стенки камер 0.2 мм. Как показано в работе [1], при использовании металлов с большим омическим сопротивлением (титан, сталь X18H10T) и длительности импульсов тока более микросекунды искажение магнитного поля в апертуре и нагрев камеры наводимыми в стенках вихревыми токами практически несущественны.

Камера изготавливается из трубы с необходимой толщиной стенки (или чуть больше, если периметр внутреннего диаметра трубы меньше периметра сечения камеры). В случае большего отличия (в меньшую сторону) через трубу протягивается специальная оправка (или несколько, последовательно, с промежуточными отжигами) до получения трубы нужных размеров. Затем через трубу протягивают оправку, определяющую профиль камеры (эллиптический). На Рис. 8 изображено приспособление для протяжки. С помощью винта 1, вращаемого приводом 3, по направляющим 2 поступательно движется ползун – гайка 4, на котором укреплен труба – штанга 5 с закрепленной на ней формирующей оправкой 6. Заготовка камеры 7 закрепляется в торцевом фланце 8.

Из полученных прямых заготовок камер формируются радиусные участки. Для сохранения эллиптической формы сечения камеры, перед гибкой прямая заготовка заливается пластичным легкоплавким сплавом (сплав индия с оловом с температурой плавления 117°C). По окончании гибки сплав выплавляют и из полученной оболочки изготавливают вакуумную камеру.

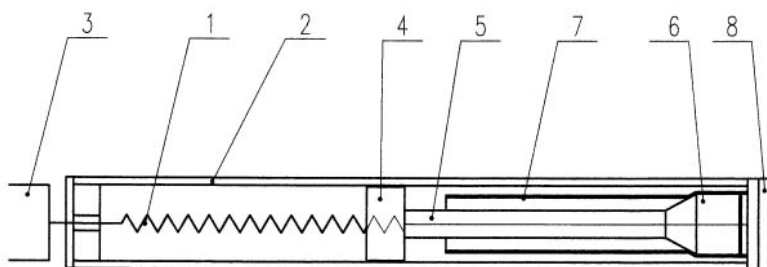


Рис. 8. Приспособление для протяжки.

1 - винт, 2 - направляющая, 3 - привод, 4 - ползун-гайка, 5 - штанга, 6 - оправка, 7 - заготовка камеры, 8 - торцевой фланец.

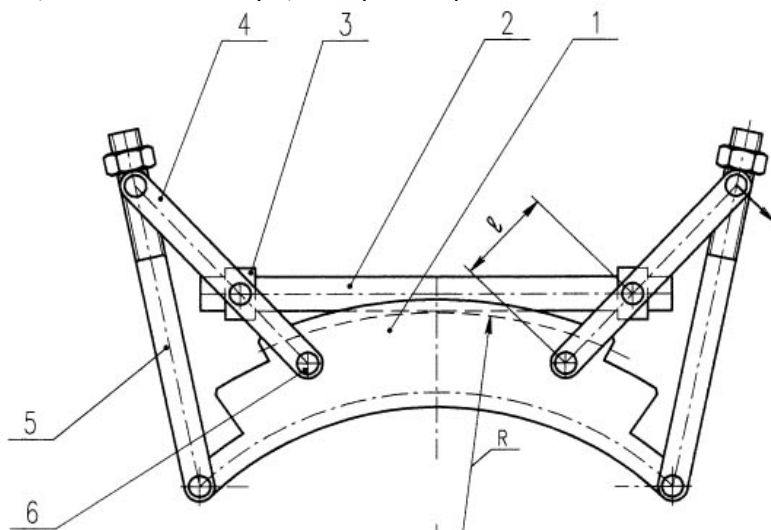


Рис. 9. Гибочное устройство.

1 - корпус, 2 - камера, 3 - сухарь, 4 - рычаг, 5 - винт, 6 - ось.

При гибке тонкостенных профилей в стенке на внутреннем радиусе возникают напряжения сжатия, которые могут привести к гофрированию стенки. Чтобы этого не произошло, разработано устройство, обеспечивающее одновременно с изгибом и продольное растяжение заготовки, полностью компенсирующее сжатие на внутреннем радиусе. Приспособление изображено на Рис. 9. Приспособление состоит из корпуса 1 с канавкой, соответствующей профилю камеры, по радиусу  $R$  которого происходит изгиб камеры 2. Концы камеры закреплены в сухарях 3, опирающихся своими осями на рычаги 4. Усилием винтов 5 рычаг 4 вращается вокруг оси 6,

изгибая камеру. Величина  $\ell$  рычага 4 и точка его закрепления на корпусе выбирается так, чтобы длина камеры на радиусе  $R$  при изгибе не уменьшалась, чем и предотвращается гофрирование. После снятия изгибающего усилия камера за счет упругих деформаций изменяет радиус изгиба (несколько выпрямляется), поэтому величина  $R$  подбирается так, чтобы после снятия усилий радиус камеры соответствовал радиусу магнита.

### 3. Устройство для механических измерений в магнитах

Устройство позволяет производить измерения с большой степенью точности в местах, где невозможно произвести измерения существующими стандартными измерительными инструментами. В основе устройства заложен электроконтактный датчик, характеризующийся небольшими усилиями, необходимыми для осуществления контакта с деталью при производстве измерений. Это условие позволяет значительно уменьшить вес устройства, а также производить высокоточные измерения внутри глубоких отверстий и, в том числе, с искривленной осью.

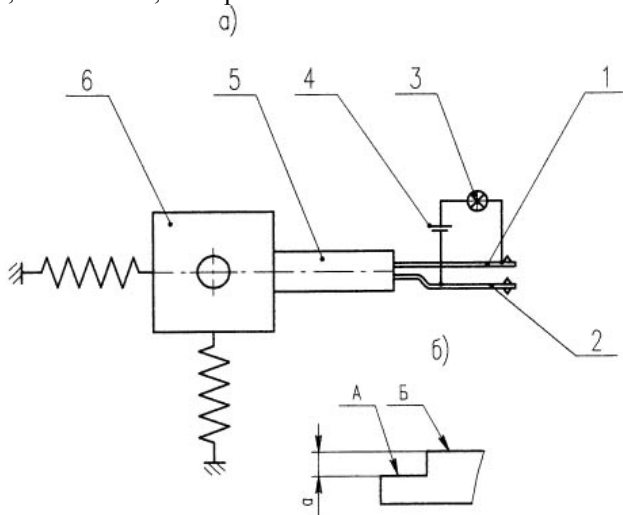


Рис. 10.

- а) Электроконтактный датчик: 1,2 - подпружиненные контакты, 3 - лампочка, 4 - гальванический элемент, 5 - кронштейн, 6 - механизм перемещения.  
 б) Пример измерения датчиком.

Один из простых вариантов измерительного устройства показан на Рис. 10,а. Контакты 1 и 2 изготовлены из устойчивых к коррозии материалов, например, медно-серебряного сплава. Лампочка 3 с

гальваническим элементом 4 обеспечивают индикацию замыкания контактов. Все элементы закреплены на кронштейне 5, укрепленном на механизме перемещения 6, движения которого контролируются стандартными измерительными приборами соответствующих классов точности. Малое усилие, необходимое для замыкания контактов, позволяет изготовить наконечники контактов с малым ( $\ll 1$  мм) радиусом, что повышает точность измерения деталей, имеющих искривленную поверхность. Принцип измерения таким датчиком следующий. При измерении размера “а” (Рис. 10,б) с помощью механизма перемещения подводят контакты датчика к поверхности “А”. При загорании лампочки делают отсчет по шкале стандартного измерительного устройства, регистрирующего движение механизма перемещения. Затем контакты отводят от поверхности “А”, перемещают и приводят в соприкосновение с поверхностью “Б” до загорания лампочки. Разность показаний измерительного устройства и дает искомый размер. При измерении устройством, изготовленным в лаборатории, где контакты сделаны из сплава ПСР-72, а перемещение регистрировалось индикатором часового типа с ценой деления 0.01мм, установлено, что контакты стабильно замыкаются при разбросе показаний индикатора 0.01 – 0.02 мм. В связи с тем, что для измерения размера необходимо сделать два прикосновения к измеряемым поверхностям, точность измерения размера 0.04 мм.

Устройство для измерения радиуса кривизны шин и расстояния между шинами магнита изображено на Рис.11. Основным элементом устройства является двоякий электроконтактный датчик 1 с контактами 2, 3, 4. Датчик установлен на кронштейне 5, укрепленном на механизме перемещения 6. Механизм позволяет производить следующие перемещения датчика:

1. По радиусу винтом 7, перемещение контролируется штангенциркулем и индикатором часового типа 8.
2. По высоте шины винтом 9, контролируется штангенциркулем.
3. По азимуту, перемещение контролируется градусной шкалой 10.

При производстве измерений по одной из координат перемещения по другим координатам могут быть жестко зафиксированы, чтобы избежать люфтов. Контакты датчика запитываются через лампочку 11 от батарейки 12.

Установка и настройка устройства производится следующим образом. Тягами 13 и 14 укрепляют измерительное устройство на корпусе магнита 15 таким образом, чтобы ось вращения механизма

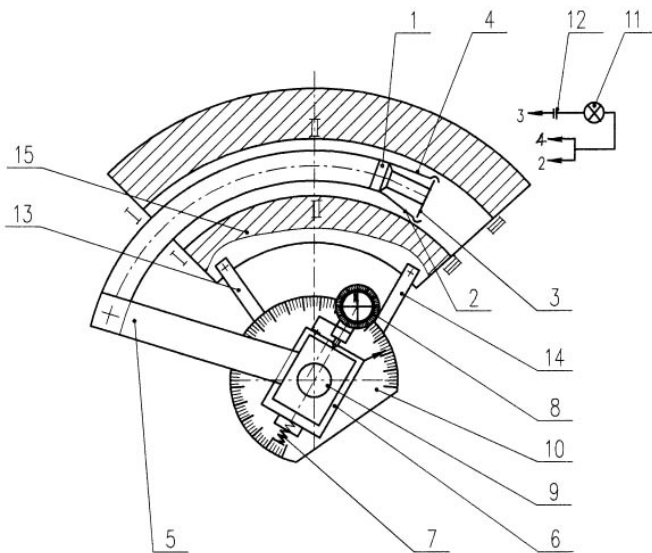


Рис. 11. Устройство для измерения в апертуре.

1 – электроконтактный датчик; 2,3,4 – контакты, 5 – кронштейн, 6 – механизм перемещения, 7,9 – винты, 8 – индикатор перемещения, 10 – шкала, 11 – лампочка, 12 – батарейка, 13,14 – тяги, 15 – магнит.

перемещения находилась в центре кривизны магнита. Для этого штангенциркулем измеряют расстояние от оси вращения до поверхности внутренней шины магнита, которое должно соответствовать величине радиуса кривизны внутренней шины. С помощью винта 9 устанавливают датчик на необходимом для измерения уровне по высоте шины и производят корректировку совмещения центра вращения механизма перемещения с центром кривизны магнита. При корректировке прикасаются контактами 2 – 3 поверхности внутренней шины магнита в сечениях I – I и III – III и, регулируя положение механизма перемещения с помощью тяг 13 и 14, добиваются одинаковых показаний индикатора в указанных сечениях.

На краю магнита (в сечении I – I) концевыми мерами длины производят измерения размера между шинами. Коснувшись контактами 2 – 3 внутренней поверхности шины, стрелку индикатора 8 совмещают с нулем шкалы. Перемещая датчик винтом 7, контактами 3 – 4 касаются поверхности внешней шины и по шкале индикатора находят перемещение датчика. Вычитая из размера между шинами, полученного при измерении концевыми мерами длины, величину перемещения датчика, находят базовый линейный размер

датчика. Необходимо заметить, что в этот размер входит сумма линейных размеров контакта 3, наконечников контактов 2 и 4, а также деформация кронштейна 5 под действием усилия, необходимого для замыкания контактов 2 – 3 и 3 – 4. Поворотом механизма перемещения 6 на соответствующий угол (отсчет производится по шкале 10) устанавливают датчик в нужном сечении магнита. Отклонение стрелки индикатора от нуля при касании контактами 2 – 3 внутренней шины покажет отклонение размера радиуса от истинного значения. Аналогично, по отклонению от ранее измеренного показания при касании контактами 3 – 4 внешней шины в сечении I – I, определяется отклонение радиуса внешней шины. Зная величину базового линейного размера датчика и отклонения размеров радиусов шин в данном сечении, находится истинный размер между шинами в этом сечении. Как показали проверки, точность измерения довольно высокая (0.02 – 0.04)мм.

Устройство с двумя односторонними контактными датчиками использовалось в лаборатории для проверки радиальных размеров параболических линз, Рис. 12,а. Датчики 1 и 2, установленные на кронштейнах 3, закреплены в суппорте 4 токарного станка. Индикатор 5, фиксирующий величину перемещения датчиков суппортом, установлен на станине станка. Линза 6 устанавливается в патроне 7 токарного станка. Кронштейны 3 с датчиками 1 и 2 устанавливаются так, чтобы обе точки касания датчиков лежали на линии, перпендикулярной оси линзы. В сечении I – I, доступном для измерения стандартными инструментами, измеряют наружный диаметр линзы и толщину стенки. С помощью винта подачи суппорта датчиками касаются внешних и внутренних поверхностей, фиксируя показания индикатора. Величину перемещения индикатора складывают с толщиной стенки линзы и получают базовый размер измерительного устройства. Касаясь последовательно в выбранных для измерений сечениях датчиками стенок линзы, находят по шкалам индикатора величину перемещения датчиков. Вычитая из величины базового размера измерительного устройства величину перемещения датчиков, находят толщину стенки линзы в выбранном сечении. Исходя из результатов измерений в сечениях I – I и II – II, можно вычислить и диаметр линзы в сечении II – II.

Приведем некоторые примеры контрольных измерений с помощью электроконтактных датчиков. На Рис. 12,б показаны способы измерения глубоких отверстий с расточкой. Измеряется



диаметр расточки и глубина расточки. На Рис. 12,б показаны также способы измерения в случае, когда диаметр расточки существенно больше диаметра входного отверстия. В этом случае с помощью тяги 1 обеспечивается поворот кронштейна с датчиками на  $90^\circ$  вокруг оси

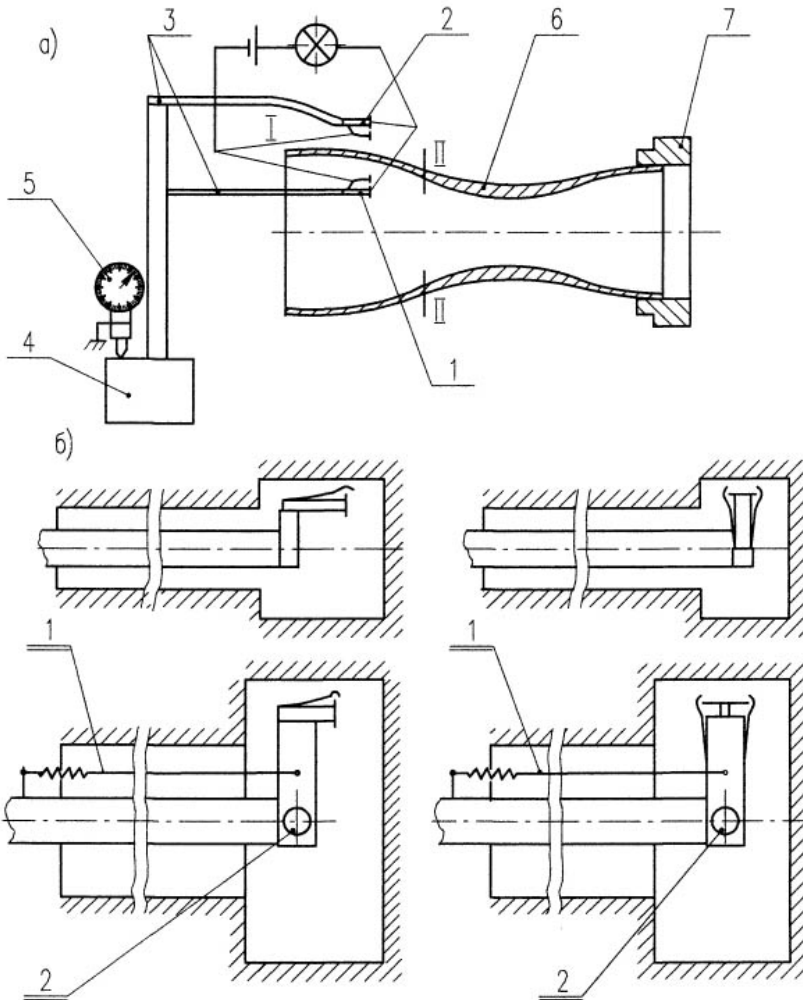


Рис. 12.

а) Устройство для измерения радиальных размеров конусных оболочек: 1,2 - датчики, 3 - кронштейны, 4 - суппорт токарного станка, 5 - индикатор, 6 - оболочка, 7 - патрон станка.

б) Примеры измерений в глубоких отверстиях с расточкой: 1 - тяга, 2 - ось вращения.

вращения, после чего проводятся измерения. Благодаря небольшой жесткости пружин датчики могут быть использованы для измерения толщины стенок длинных труб, толщины плит больших габаритов (датчик типа Рис.10) и др.

#### **4. Сильнополевой септум-магнит с предельно тонким ножом**

Одной из проблем в ускорительной технике является задача вывода частиц из апертуры ускорителя. В случае однооборотного вывода пучка необходимо вложить значительную мощность в кикер-магнит, что может оказаться достаточно сложным при высоких энергиях частиц. Задача существенно упрощается при многооборотном выводе, когда пучок смещается на нож септум-магнита и последний “срезает” слой частиц. При этом существенное значение имеет толщина ножа, т. к. частицы, попавшие на торец, погибают. По этой причине имеет место стремление использовать нож минимальной толщины.

С другой стороны, “срезанный” слой необходимо повернуть на достаточно большой угол, в то время как протяженность участка для размещения септум-магнита ограничена. Это обстоятельство приводит к необходимости использования в магните значительного по величине магнитного поля. Эти два фактора и оказывают основное влияние на выбор варианта магнита для многооборотного вывода частиц. Одним из вариантов может быть магнит с полем в апертуре 5 Тл, одна из шин которого изготовлена из фольги толщиной 0.1мм и на которую смещается пучок со скоростью  $\sim 1$  мм за оборот.

Принципиальную возможность изготовления и работы такого магнита было решено проверить на модели, принцип конструкции которой изображен на Рис. 13. Длительное воздействие магнитного поля 5 Тл, которому соответствует давление  $\sim 100$  атм, на фольгу толщиной 0.1 мм приведет к разрушению последней. По этой причине возможно лишь кратковременное нагружение фольги, при котором кинетическая энергия  $W_k$ , сообщаемая фольге, не превысит потенциальную энергию  $W_n$ , поглощенную фольгой при предельном отклонении фольги от нейтрального положения. Исходя из условия  $W_n = W_k$  и проводится расчет системы на механическую прочность. Поскольку фольга нагружена вдоль магнита одинаково, для упрощения расчета рассматривается полоска фольги,

перпендикулярная направлению тока, шириной  $b_n = 1$  см. В связи с тем, что толщина полоски значительно меньше ее длины, можно положить, что полоска представляет собой гибкую нить или струну, т.е. работает только на растяжение и у нее отсутствует изгибная жесткость, см. расчетную схему на Рис. 13.

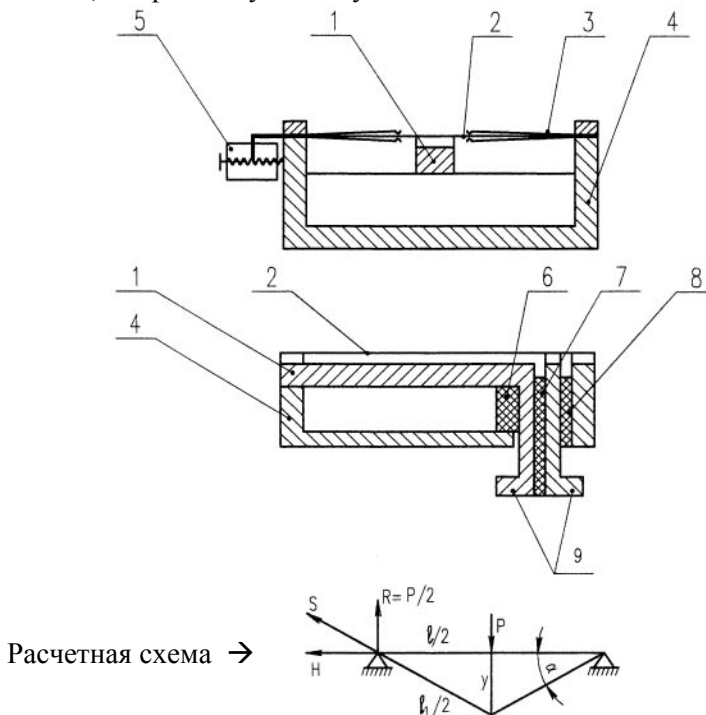


Рис. 13. Септум - магнит.

1 - шина, формирующая поле, 2 - шина из фольги, 3 - демпфирующее устройство, 4 - корпус, 5 - натяжное устройство, 6,7,8 - изоляторы, 9 - токоподводы.

Принятые обозначения:

- $P$  – сила электродинамического воздействия на шину, кг
- $H$  – распор, кг
- $S$  – натяжение, кг
- $l$  – длина полоски, см
- $\delta$  – толщина полоски, см
- $y$  – прогиб полоски в середине пролета, см

$\Delta l$  – удлинение полоски, см

$b_n$  – ширина полоски, 1 см

$b_{ш}$  – ширина токоведущей шины, формирующей поле, см

$A$  – поперечное сечение полоски, см<sup>2</sup>

$E$  – модуль упругости материала полоски, кг/см<sup>2</sup>

$\sigma$  – напряжение в материале полоски, кг/см<sup>2</sup>

$\gamma$  – вес единицы объема (плотность), г/см<sup>3</sup>

$G$  – вес единицы длины полоски, г/см

$\tau$  – время действия магнитного поля (половина периода), сек

$T$  – период собственных колебаний полоски, сек

$f$  – частота собственных колебаний полоски, Гц

$H_m$  – напряженность магнитного поля, Э

Из приведенной схемы следует:

$$y = \frac{l}{2} \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{2} \cdot \frac{P}{2H} = \frac{Pl}{4H}; \quad \frac{l}{2} = \frac{l_1}{2} \cos \alpha; \quad \cos \alpha = \frac{H}{S}.$$

Удлинение полоски под действием силы  $P$  определится:

а) из геометрических соотношений

$$\Delta l = l_1 - l = l \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right),$$

б) из закона Гука

$$\Delta l = \frac{S \cdot l}{E \cdot A} = \frac{\sigma \cdot l}{E}.$$

Приравнявая обе величины, получим:

$$\frac{\sigma \cdot l}{E} = l \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad \text{или} \quad \cos \alpha = \frac{E}{\sigma + E},$$

но т. к.  $\cos \alpha = \frac{H}{S}$ , а  $S = \sigma \cdot A$ , то  $H = \frac{\sigma \cdot A \cdot E}{\sigma + E}$

Связь между величинами  $P$  и  $H$  с учетом величины упругости

материала [10]  $P = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{E \cdot A}} \sqrt{H^3}$ , тогда

$$y = \frac{Pl}{4H} = \frac{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{H^3} \cdot l}{\sqrt{E \cdot A} \cdot 4H} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{2\sigma}{\sigma + E}},$$

но т. к.  $\sigma \ll E$ , то  $y \approx \frac{l}{2} \sqrt{\frac{2\sigma}{E}}$ .

Величина потенциальной энергии, запасенная в полоске при прогибе “у” и соответствующим ему растяжению “ $\Delta l$ ”, определяется выражением:

$$W_n = S \cdot \frac{\Delta l}{2},$$

но т.к.  $\Delta l = \frac{\sigma \cdot l}{E}$ ,  $S = \sigma \cdot A$ ,  $A = \delta \cdot b_n = \delta$ , имеем:

$$W_n = \frac{\sigma \cdot A \cdot \sigma \cdot l}{2E} = \frac{\sigma^2 \cdot \delta \cdot l}{2E}. \quad (1)$$

Величина кинетической энергии, полученной полоской в результате воздействия поля, определяется выражением

$$W_k = \frac{m \cdot V^2}{2}.$$

Для определения величины скорости, приобретенной полоской, при выполнении условия  $\tau \ll T$  можно воспользоваться выражением импульса силы  $P \cdot \tau = m \cdot V$ , откуда

$$V = \frac{P \cdot \tau}{m}. \quad (2)$$

Величиной времени  $\tau$  воздействия поля мы задаемся, а период  $T$  собственных колебаний можно найти по формуле периода собственных колебаний натянутой струны:

$$T = \frac{1}{f}, \text{ где } f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S' \cdot g}{A \cdot \gamma}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S' \cdot g}{G}}.$$

В вес единицы длины  $G$  (или в площадь поперечного сечения  $A$  при определении веса единичной длины) должны войти веса верхних или нижних, в зависимости от направления движения полоски, демпфирующих пружин, т.е.  $G = 2G_{пруж} + G_{пол} \approx 2G_{пол}$ . При  $\delta_{пруж} = \delta_{пол}$ ,  $A = 2A_{пол}$ . Величиной усилия предварительного натяжения можно задаться:  $S' = 0.3[S]$ , где  $[S] = [\sigma] \cdot A_{пол}$  – предельно допустимое усилие натяжения полоски. Тогда

$$T = 2l \sqrt{\frac{2\gamma \cdot 10^{-3}}{0.3[\sigma] \cdot g}}. \quad (3)$$

Величина действующей силы определится:

$$P = p \cdot b_{ш} \cdot b_n = p \cdot b_{ш}, \text{ т.к. } b_n = 1.$$

Здесь  $p$  – давление магнитного поля в  $\text{кг/см}^2$ .

$$p = \left( \frac{H_M}{5000} \right)^2. \quad (4)$$

Приведенную массу можно определить как сумму приведенных масс полоски фольги и двух демпфирующих пружин, противодействующих в данный момент силе  $P$ :  $m = m_{пол} + m_{пруж}$ ,

$$m_{пол} = \frac{1}{2} M_{пол}, \text{ где } M_{пол} \text{ – масса полоски,}$$

$$m_{пруж} = 2 \cdot 0.23 M_{пруж} \approx 0.5 M_{пруж}, \text{ где } M_{пруж} \text{ – масса пружины.}$$

Пружины изготавливаются из материала такой же толщины и плотности, как фольга, и длина двух пружин примерно равна длине полоски, поэтому, учитывая, что  $M_{пруж} = 0.5 M_{пол}$ , будем иметь:

$$m_{пруж} = 0.5 M_{пруж} \approx 0.25 M_{пол},$$

$$\text{тогда } m = 0.5 M_{пол} + 0.5 M_{пруж} = 0.75 M_{пол},$$

$$m = 0.75 l \cdot A \cdot \gamma \cdot 10^{-6} \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{см}} \right).$$

Используя формулу (2), можно записать выражение для кинетической энергии

$$W_k = \frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{P^2 \cdot \tau^2}{2m} = \frac{P^2 \cdot \tau^2}{2 \cdot 0.75 \cdot l \cdot A \cdot \gamma \cdot 10^{-6}}$$

или, при  $A = \delta \cdot b_n = \delta$ , имеем:

$$W_k = \frac{P^2 \cdot \tau^2}{1.5 l \cdot \delta \cdot \gamma} \cdot 10^6.$$

Приравнявая величины потенциальной энергии (1) и кинетической, находим длину полоски:

$$l = \frac{P \cdot \tau \cdot 10^3}{\sigma \cdot \delta} \sqrt{\frac{2E}{1.5\gamma}}. \quad (5)$$

При расчете элементов модели были использованы следующие данные:

- 1) материал шины – медная нагартованная фольга толщиной  $\delta = 0.1 \text{ мм}$ ,
- 2) материал демпфирующих пружин – бронза БрБ2 толщиной  $0.1 \text{ мм}$ ,

$$3) E = 10^6 \text{ кг/см}^2,$$

$$4) \gamma = 8.7 \text{ г/см}^3,$$

$$5) [\sigma] = \sigma_{-1} = 1100 \text{ кг/см}^2 \text{ (на базе } 10^8 \text{ циклов),}$$

$$6) H_M = 50 \text{ кЭ},$$

$$7) \tau = 3 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

$$8) b_{ш} = 1 \text{ см.}$$

Длина полоски (ширина шины из фольги) из формулы (5), используя (4),

$$l = \frac{(50 \cdot 10^3)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{(5 \cdot 10^3)^2 \cdot 1.1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6}{1.5 \cdot 8.7}} = 10.7 \text{ см.}$$

При ширине фольги 10 см магнит должен выдержать  $10^8$  циклов нагружений. С целью сокращения времени испытаний было решено изготовить модель с шириной  $l = 7.5$  см. При таком размере собственная частота колебаний шины из фольги с демпфирующими пружинами из формулы (3):

$$T = 2 \cdot 7.5 \sqrt{\frac{2 \cdot 8.7 \cdot 10^{-3}}{0.3 \cdot 1100 \cdot 10^3}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

При длительности действующей силы  $\tau = 3 \cdot 10^{-6}$  сек условие  $\tau \ll T$  выполняется, т.е. система подвержена динамическому нагружению и величины механических напряжений, возникающих в фольге, можно находить, используя формулу (5):

$$\sigma = \frac{P \cdot \tau \cdot 10^3}{\delta \cdot l} \sqrt{\frac{2E}{1.5\gamma}}.$$

Модель магнита с шириной фольги  $l = 7.5$  см, нагруженная полем  $H_M = 55$  кЭ, вызывающем в фольге напряжения  $\sigma = 1900$  кг/см<sup>2</sup>, выдержала  $2 \cdot 10^5$  циклов нагружения при длительности импульса  $\tau = 3 \cdot 10^{-6}$  сек и частоте их следования 3 Гц. Эти данные говорят о том, что можно изготовить надежно работающий магнит с ножом из фольги толщиной 0.1 мм.

## Литература

1. *И.И. Авербух и др.* Проект малогабаритного протонного синхротрона на энергию 200 МэВ. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1989г, т. II, с.305.
2. *И.И. Авербух и др.* Статус проекта компактной установки для протонной терапии. Европейская конференция по ускорителям частиц. Лондон, 1994г, с.184, на английском языке.
3. *В.В. Вечеславов и др.* Формирование поля в импульсном одновитковом магните с насыщающимся железом. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979г, т. I, с.181.
4. *Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров.* Экспериментальное исследование параболических линз с предельно допустимыми магнитными полями. ЖТФ, т.48, в.3, с.566. Ленинградское отделение “Наука”, 1978г.
5. *Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров.* Испытание контактных пар при больших плотностях импульсных токов. Препринт ИЯФ 77-35. Новосибирск, 1977г.
6. *Т.А. Всеволожская и др.* Формирование поля в импульсных одновитковых магнитах с шихтованным магнитопроводом. Препринт ИЯФ 79-89. Новосибирск, 1979г.
7. *Г.С. Виллевальд, Б.В. Иванов, В.Н. Карасюк, С.М. Мурашов, М.А. Олейников, Г.И. Сильвестров.* Высоковольтные электроизоляторы из стеклопластов. Препринт ИЯФ 89-29. Новосибирск, 1989г.
8. *Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк, Г.И. Сильвестров.* Исследование механических характеристик сильноточных параболических линз в режимах динамического нагружения. Препринт ИЯФ 75-98. Новосибирск, 1975г.
9. Справочник машиностроителя, т.3, М. 1956г.
10. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник, т.1, с.195, М. 1968г.



*Г.С. Виллевальд, В.Н. Карасюк,  
Г.И. Сильвестров, Т.В. Соколова*

**Экспериментальные  
сильнополевые поворотные магниты**

*G.C. Willevald, V.N. Karasyuk,  
G.I. Silvestrov, T.V. Sokolova*

**Experimental strongly-field tern magnets**

ИЯФ 2006-5

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 9.02. 2006 г.

---

Сдано в набор 10.02. 2006 г.

Подписано в печать 10.02.2006 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринтере ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*