

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

Р.М. Лапик П.В. Мартышкин А.М. Якутин

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ  
РАЗРАБОТКИ СИЛЬНОПОЛЕВЫХ  
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ

ИЯФ 2004-73

Novosibirsk  
2004

## **Некоторые вопросы разработки высокопольных импульсных магнитов**

*Р.М. Лапик П.В. Мартышкин А.М. Якутин*

Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера  
630090 Новосибирск, Россия

### **Аннотация**

В работе рассмотрены некоторые известные и новые принципы построения высокопольных импульсных магнитов. Рассмотрение проводится применительно к конверсионным быстроциклическим магнитам с большой апертурой и длительностью рабочего импульса, характерной для тиристорных коммутаторов. Экспериментально подтверждена возможность построения приемлемого магнита, принцип работы которого основан на сочетании формирующих свойств массивной импульсной спирали и диамагнитного экрана.

### **Some problems of high field pulsed magnets development**

*R. Lapik, P. Martyshkin, A. Yakutin*

### **Abstract**

Some famous and new approaches of high field pulsed magnet construction are considered. Consideration is applied only for fast cycling conversion magnets with large aperture and operation pulse duration typical for thyristor switch. Experimental results justify the opportunity of reasonable magnet construction, which combines the forming property of massive pulsed spiral coil and diamagnetic shield.

---

## 1. Введение

В системах электрон-позитронной конверсии для согласования эмиттанса позитронного пучка с акцептансом ускоряюще-фокусирующего канала используют согласующие устройства, размещаемые непосредственно после конверсионной мишени. Обычно такими устройствами являются импульсные магниты, типичный профиль которых и картина магнитного поля представлены на рис. 1. Радиус апертуры таких магнитов обычно  $r_0 \sim 3 \div 5$  мм, профильный угол внутреннего конуса  $\alpha \sim 10^{\circ} \div 20^{\circ}$ , а максимальное значение поля  $B_m \sim 5 \div 10$  Тл. В принципе, минимальная длина участка согласования может составлять всего  $5 \div 6$  см. [1-3], однако, по конструктивным соображениям, длина магнита обычно больше.

В идеализированном случае отсутствия потока рассеяния, закон спадаения продольного поля в конической полости такого магнита соответствует зависимости:

$$H_z(z) = \frac{H_m}{\left(1 + \frac{z}{r_0} \cdot \operatorname{tg} \alpha\right)^2}, \quad (1)$$

однако, в силу неизбежного рассеяния потока конуса магнита, поле спадает всегда медленнее (пунктирная кривая на рис. 1), что увеличивает требуемый ток и энергоемкость магнита.

Наряду с ухудшением энергетических характеристик, поток рассеяния создает проблему качества магнитного поля. Одновитковый магнит с плоской щелью создает поперечное поле на оси конуса, в результате чего сгусток позитронов приобретает смещение от продольной оси линака. Этот, так называемый kick-эффект, проявляется тем сильнее, чем больше продольное поле магнита и чем хуже качество этого поля [8]. При неблагоприятном стечении обстоятельств максимум захвата позитронов достигается уже при полях много меньше максимального и в дальнейшем только уменьшается при увеличении поля.

Для многовиткового магнита движение сгустка позитронов становится еще более сложным. Отсюда очевидно, что проблема качества поля согласующего магнита является важнейшей даже при средних полях порядка 50 кГс. В идеальном магните силовые линии поля как бы выходят из одной точки, расположенной на геометрической оси магнита (см. рис. 1), а

практически эта точка всегда смещается и расплывается в асимметричное пятно S.

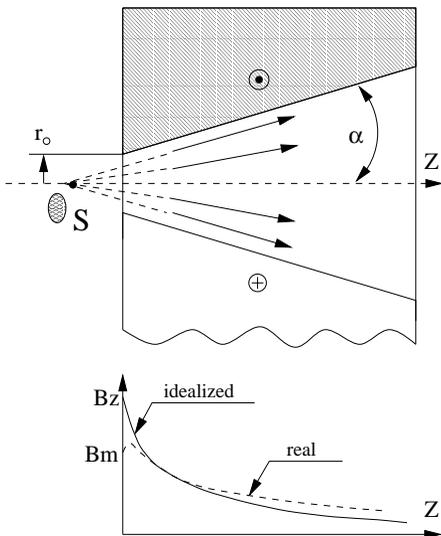


Рис. 1. Типичный конический профиль конверсионного магнита и продольное распределение магнитного поля.

С учетом краевых эффектов и потока рассеяния конуса магнита, на практике можно пользоваться простыми оценками основных параметров:

- требуемое суммарное значение тока

$$I_m = \oint H dl \approx 2H_m r_o / \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

- индуктивность системы полость-щель

$$L_o \approx \pi \mu_o r_o \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

- энергоемкость магнита

$$W_m \approx 2\pi \mu_o H_m^2 r_o^3 / \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

С учетом неизбежных активных потерь в разрядном контуре и его паразитных параметров, требуемая энергоемкость накопителя энергии обычно приблизительно вдвое больше энергоемкости магнита, следующей из (4). Добротность разрядного контура с низкоимпедансной нагрузкой обычно очень мала, поэтому при разряде емкостного накопителя к первому максимуму тока уже рассеивается 30÷40% накопленной энергии.

В технике сильных импульсных магнитных полей уже давно конкурируют две концепции в отношении выполнения формирователей сильного поля в виде одновиткового или многовиткового типов.

Применительно к конверсионным магнитам, в одновитковом варианте таких устройств проще решаются проблемы необходимой механической прочности и охлаждения, однако здесь требуется питающий генератор с очень большим током. Такой одновитковый формирователь сильного поля имеет довольно экзотические параметры – его индуктивность измеряется всего единицами нГн., а требуемый ток – сотнями кА.

В многовитковом варианте магнита автоматически решается проблема согласования такой нагрузки и питающего генератора, однако резко обостряются проблемы механической прочности устройства и его охлаждения. Быстроциклический режим работы такого конверсионного магнита с требуемой наработкой на отказ не менее  $10^9$  циклов исключает возможность применения межвитковой изоляции и механического крепления витков спирали. Другими словами, возможность увеличения жесткости конструкции путем наложения внешних механических связей исключается по причине быстрого износа изоляции в результате сухого трения и вибраций. Ресурс импульсных катушек с межвитковой изоляцией и механической стяжкой витков обычно составляет десятки тысяч импульсов [5÷7], т.е. на 5 порядков меньше требуемого. Известна лишь одна успешная реализация многовитковой конструкции быстроциклического сильнополевого конверсионного магнита, разработанная в SLAC. Причем ее успех объясняется именно отсутствием изоляции и крепления витков, которые удерживаются за счет инерции. Такая конструкция требует очень малой длительности рабочего импульса порядка нескольких микросекунд.

Существует потребность в разработке импульсного конверсионного магнита с радиусом апертуры около 5 мм. и магнитным полем 10 Тл. при частоте работы такого устройства порядка 100 Гц и ресурсе не менее  $10^9$  циклов. Обеспечить эти параметры, оставаясь в рамках концепции известного многовиткового варианта магнита, уже не представляется возможным, тем более, что естественное желание применить для питания такого магнита импульсный генератор с тиристорным коммутатором приводит к увеличению длительности рабочего импульса почти на порядок, что делает абсолютно невозможным инерциальное удержание витков простой импульсной спиралью.

При разработке такого импульсного конверсионного магнита необходимо решить ряд проблем, важнейшими из которых являются следующие:

- обеспечение приемлемой энергоемкости;
- хорошие оптические свойства;
- механическая прочность устройства;
- обеспечение необходимого охлаждения.

Уже беглого взгляда на проблемы разработки такого магнита достаточно чтобы осознать всю сложность задачи. Известные методы и решения здесь

или неприемлемы, или приводят к сложной, дорогой и неэффективной импульсной системе со средней потребляемой мощностью не менее 100 кВт.

В этой ситуации необходимо более подробно рассмотреть известные и возможные новые варианты построения подобного магнита.

## **2. Некоторые известные методы формирования сильных импульсных магнитных полей**

Рассмотрение означенных методов будет происходить лишь в контексте их возможного применения для решения поставленной конкретной задачи, поэтому такое краткое рассмотрение, разумеется, не охватывает всей широты проблем формирования сильных импульсных магнитных полей. Ниже мы будем иметь в виду лишь быстроциклические импульсные системы с энергоемкостью низкоимпедансной индуктивной нагрузки порядка сотни Джоулей, а в качестве источника питания будет подразумеваться импульсный генератор с емкостным накопителем энергии и тиристорным коммутатором. Все это определяет важнейший параметр любой импульсной системы - длительность импульса тока, которая будет находиться в пределах  $20\div 40$  мс, что оптимально для выбранного типа коммутатора.

Разумеется, уменьшение длительности импульса заметно улучшило бы параметры магнита и уменьшило бы потребляемую мощность. Однако, такое решение означает заметное изменение конструкции магнита в отношении изоляции и коренное изменение построения импульсной системы; в частности, потребуется уже высоковольтный накопитель энергии, тиратронный коммутатор и мощный согласующий импульсный трансформатор микросекундного диапазона, что крайне нежелательно.

Давно конкурирующие концепции в отношении выполнения формирователя сильного поля начнем анализировать с простейшего одновиткового варианта.

### **2.1. Простейшая безтрансформаторная импульсная система**

В технике сильных импульсных магнитных полей широко применяется способ прямого разряда емкостного накопителя энергии на индуктивную нагрузку в виде одновитковой катушки [4,5]. В нашем случае такой подход неприемлем из-за отсутствия вентильных быстроциклических коммутаторов с требуемыми параметрами. Кроме того, при крайне низкой индуктивности одновиткового формирователя, эффективность такого импульсного устройства составит всего несколько процентов. Здесь и далее под эффективностью понимается отношение энергоемкости индуктивной нагрузки к энергоемкости используемого первичного емкостного накопителя.

Таким образом, одновитковый формирователь сильного импульсного магнитного поля нуждается в согласовании с питающим генератором.

## 2.2. Трансформаторная система

Импульсные трансформаторы находят широкое применение для такого рода согласования индуктивной нагрузки и питающего генератора [3÷5]. Однако, в нашем случае применение этого популярного решения дает заметный выигрыш в эффективности лишь при размещении этого трансформатора внутри вакуумной камеры, поскольку паразитные параметры сильноточного вакуумного ввода сравнимы с нагрузкой. Именно этот путь и был выбран при разработке конверсионной системы форинжектора ВЭПП–5 (рис. 2а). Конический виток нагрузки, вторичный виток трансформатора и соединяющий их фидер – щель выполнены в виде одной детали, т.е. импульсный трансформатор встроен непосредственно в массивный виток формирователя сильного поля [1÷3]. Эффективность такого устройства составляет около 35%.

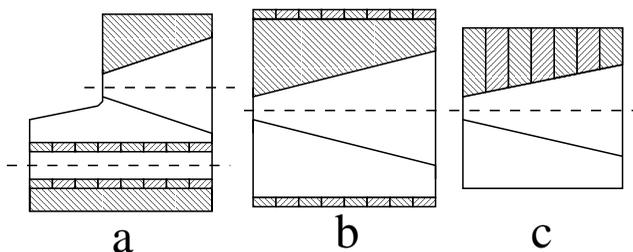


Рис. 2. Известные конструктивные схемы импульсных конверсионных магнитов.

## 2.3. Классический концентратор потока

Широко известен также формирователь сильного поля в виде концентратора потока [4÷7]. Первичная обмотка концентратора (индуктор) расположена на внешней поверхности массивного тела в виде конического витка (рис. 2b) и обычно размещается в спиральной канавке для уменьшения рассеяния магнитного потока [6,7].

На этом принципе был разработан первый вариант требуемого магнита, у которого было выявлено заметное поперечное поле на его оси.

Концентраторы потока – изящные в конструктивном плане устройства, и с их появлением связывались большие надежды в технике сильных импульсных магнитных полей, однако опыт построения таких устройств показал, что их эффективность невелика и не превышает 15÷20% [5].

Согласование низкоимпедансной нагрузки с питающим генератором по типу концентратора потока заметно увеличивает эффективность простейших импульсных систем (см. п. 2.1). Тем не менее, эффективность концентраторов мала и объясняется это сложной топологией токов, далекой от идеальной, при которой достигается минимум активных потерь.

## 2.4. Коническая спираль

Многовитковый формирователь сильного поля в виде конической спирали (рис. 2с) обычно уже не нуждается в согласующем трансформаторе, а его эффективность достигает 50%. Однако энергоемкость его велика из-за магнитной "рыхлости" спирали, т.е. большом потоке рассеяния через межвитковую спиральную щель.

Концентрация магнитного потока в массивной конической спирали является результатом геометрической асимметрии устройства, что приводит к появлению уравнительных токов и магнитной асимметрии. Эти уравнительные токи протекают по узкой межвитковой щели, обеспечивая перераспределение импульсного тока спирали в пользу ее сильнополевых витков. Разумеется, принцип непрерывности тока в электрической цепи при этом не нарушается, поскольку уравнительные токи протекают и замыкаются по поверхности массивного диамагнетика.

Уравнительные токи действуют согласно с током спирали в ее узкой части и направлены встречно в широкой слабополевой части конуса. Результативность такого перераспределения токов определяется степенью магнитной "рыхлости" спирали т.е. ее "прозрачностью" для магнитного потока. В идеализированной спирали продольное распределение поля (1) не зависит от шага спирали и определяется лишь "геометрией" конуса, т.е. параметром спадания поля  $r_0 / \operatorname{tg} \alpha$  (см. введение).

Магнитная "рыхлость" реальной спирали приводит к уменьшению максимального поля при заданном импульсном токе спирали (см. рис.1). Параметр спадания поля при этом увеличивается, соответственно растет и требуемый ток спирали, растет также и энергоемкость магнита.

## 2.5. Анализ известных вариантов

Для сравнения изложенных выше вариантов построения импульсных магнитов введем понятие идеального магнита. Под идеальным магнитом будем понимать устройство, формирующее магнитное поле лишь в объеме с радиальными размерами, ограниченными областью поперечной динамики позитронного сгустка и оптимальной длиной участка согласования. Энергоемкость идеализированного объема магнита, определенного таким образом, по-видимому, составит около 50 Дж. С учетом реальной "геометрии" конуса и неизбежных краевых эффектов, энергоемкость идеального магнита возрастет до 100 Дж. В условиях крайне низкой добротности разрядного контура и с учетом его паразитных параметров требуемая энергоемкость первичного накопителя энергии составит уже около 200 Дж.

По целому ряду причин, указанные параметры идеального магнита и его устройства питания практически недостижимы. По-видимому, энергетические параметры конверсионного магнита вдвое хуже идеальных можно полагать не только приемлемыми, но и хорошими.

Таким образом, требуемый магнит должен иметь энергоемкость не более 200 Дж. при энергоемкости первичного накопителя около 400 Дж., а средняя потребляемая мощность системы питания такого магнита не должна превышать 40 кВт. при заданной частоте работы 100 Гц. В отличие от идеального, такой магнит будем называть далее приемлемым.

Выше были изложены, в сущности, все известные возможности построения требуемого конверсионного магнита (рис. 2).

Применение трансформаторного варианта (рис. 2а) в нашем случае неприемлемо из-за его конструктивной особенности – выступающей трансформаторной части, что исключает возможность работы с дисковой конверсионной мишенью. Даже если отказаться от такой возможности, то и здесь есть проблема – трансформатор должен быть безжелезным, что снижает его качество. В результате оказывается, что энергоемкость такого магнита составит около 400 Дж т.е. вдвое превышает приемлемый уровень энергоемкости, средняя потребляемая мощность в этом случае будет близка к 100 кВт, что очень много для быстроциклического устройства.

Вариант классического концентратора потока (рис. 2б) в энергетическом отношении уступает даже трансформаторному варианту, кроме того, придется еще решать сложную проблему оптики такого магнита.

Многовитковый формирователь (рис. 2с) не может рассматриваться как перспективный уже в силу невозможности обеспечить удержание витков импульсной спирали при большой длительности рабочего импульса, характерной для систем с тиристорным коммутатором. Кроме того, при малом шаге спирали весьма сложно обеспечить необходимое интенсивное охлаждение витков. Следует также отметить, что энергоемкость многовиткового формирователя при одинаковой геометрии конуса всегда больше в сравнении с одновитковым, т.е. окажется заведомо неприемлемой.

Из изложенного следует, что не представляется возможным разработать требуемый конверсионный магнит с приемлемыми параметрами, если основываться при этом на известных методах формирования сильного импульсного магнитного поля.

### **3. Новые возможности построения импульсных магнитов**

Общее направление поисков приемлемого решения для построения требуемого магнита понятно. Необходимо искать вариант, в котором сочетаются преимущества одновитковых формирователей сильного поля в части их механической прочности и удобства обеспечения охлаждения и многовитковых, которые не нуждаются в согласующем трансформаторе.

### 3.1. Коническая спираль с экраном

Как уже отмечалось, основным недостатком простой конической спирали (рис. 2с) является малая механическая жесткость витков, что резко ограничивает длительность рабочего импульса. Второй существенный ее недостаток – слабо выраженная формирующая способность спирали, т.е. магнитная "рыхлость", что приводит к увеличению энергоемкости таких устройств.

Эти недостатки можно частично устранить путем размещения конической спирали 1 внутри массивного цилиндра 2 с узким разрезом 3 (рис. 3). Принцип работы данного устройства состоит в уменьшении потока рассеяния спирали с помощью диамагнитного экрана, при этом уменьшается параметр спадающего поля, поэтому такой магнит является более экономичным.

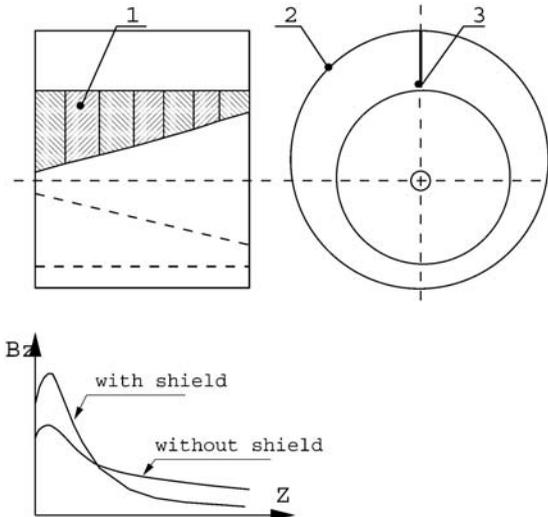


Рис. 3. Коническая спираль с экраном и продольное распределение поля.

В конструкции с экраном, по внутренней его поверхности протекают азимутальные уравнивающие токи, направленные согласно с током спирали в ее сильнополевой части и встречно – в слабополевой. Замыкаются эти токи через плоский разрез 3, т.е. экран играет здесь роль стабилизатора потока, что, в условиях заполнения полости диамагнетиком, усиливает эффект концентрации магнитного потока в узкой части конуса.

На рис 3 представлена типичная картина продольного распределения магнитного поля импульсной спирали при неизменной величине тока.

В силу снижения потока рассеяния спирали с экраном, естественно, уменьшаются и краевые механические усилия в ее витках, которые обычно ограничивают величину формируемого магнитного поля.

Импульсный магнит на основе конической спирали с экраном имеет вполне приемлемые энергетические показатели, однако механическая жесткость сильнополевых витков спирали явно недостаточна.

## 3.2. Спиральный концентратор потока

Рассмотрим возможности спирального концентратора в виде конической катушки с массивным первым сильнополевым витком (рис. 4). Принцип работы такого устройства основан на сохранении магнитного потока в конической полости массивной спирали.

В случае отсутствия потока рассеяния, наличие такого массивного витка–концентратора никак не отразится на продольном распределении магнитного поля в конусе, которое подчиняется лишь закону "обратных квадратов" (1) и не зависит от шага спирали. Это позволяет резко увеличить ее шаг в сильнополевой части конуса, с целью увеличения механической жесткости устройства и улучшения условий охлаждения. Целесообразно и практически достаточно ограничиться здесь заметным увеличением аксиального размера только первого сильнополевого витка.

Концентрация потока в массивной конической спирали обязана уравнительным межвитковым токам, которые увеличиваются по мере приближения к первому витку. Эти токи перераспределяют импульсный ток спирали в пользу ее первого витка, по внутренней поверхности которого может протекать большая часть общего тока спирали.

Формирующие возможности такого концентратора ограничивает магнитная "рыхлость" спирали, в результате отмечается снижение поля с увеличением "прозрачности" спирали, поскольку коэффициент компрессии магнитного потока  $k = \Phi_o / \Phi_m$  всегда меньше единицы, где  $\Phi_o$  – поток в узкой части конуса,  $\Phi_m$  – максимальный поток в конусе.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость продольного поля на оси магнита для 8-ми витковой толстой спирали с шагом 14 мм. и увеличенным аксиальным размером первого витка. Радиус апертуры магнита 5 мм, а профильный угол внутреннего конуса  $15^\circ$ . Из рисунка видно, что по первому витку протекает более половины общего тока спирали, т.е. этот виток является концентратором. Для обеспечения заданного уровня поля 10 Тл, требуемый общий ток спирали составит 280 кА. при энергоемкости накопителя порядка 700 Дж.

Для иллюстрации влияния "рыхлости" спирали, на рисунке показано также расчетное продольное распределение поля тонкой спирали, т.е. полностью "прозрачного" устройства. Разумеется, ток сравниваемых спиралей принят одинаковым, а заметное увеличение поля у толстой спирали характеризует ее выраженные формирующие способности.

Таким образом, скин-эффект вовсе не сводится здесь к представлению о протекании тока по внутренней поверхности импульсной конической катушки – реальная топология токов намного сложнее, что ограничивает возможность применения закона Био-Савара для расчета полей толстых импульсных катушек.

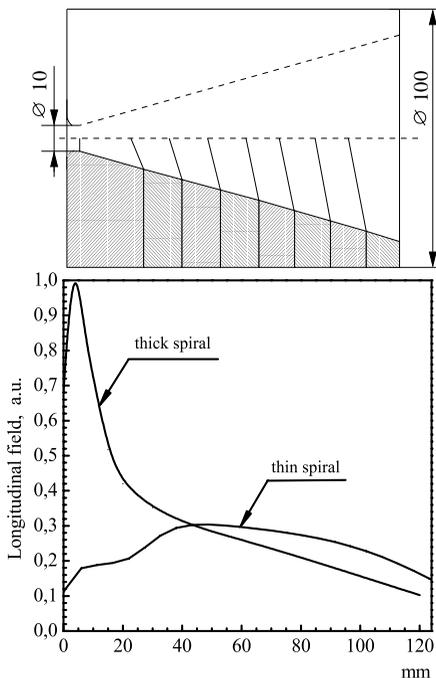


Рис. 4. Спиральный концентратор потока и продольное поле на его оси.

### 3.3. Приемлемый вариант конверсионного магнита

Как уже отмечалось, соображения механической прочности импульсного магнита требуют основываться на одновитковом формирователе сильного поля и искать решение построения генератора сильного тока. К сожалению, однако, расчеты и оценки, имеющийся опыт и экспериментальные данные указывают на невозможность разработки приемлемого магнита, если основываться на любом из рассмотренных выше способах формирования сильного поля. Все указывает на то, что приемлемый вариант следует искать на пути сочетания достоинств рассмотренных выше подходов к проблеме формирования сильных импульсных магнитных полей.

Анализ ряда таких комбинированных решений выявил перспективную конструкцию, основанную на двух последних рассмотренных вариантах.

Концепция такого магнита заключается в концентрации внутреннего потока массивной спирали с одновременным уменьшением ее потока рассеяния.

На рис. 5 представлен магнит в виде спирали 2 с массивным первым витком 1 и экраном 3, причем целесообразно выполнять этот экран в виде внешней цилиндрической части первого массивного витка спирали. Таким образом, первый виток спирали представляет собой стакан, имеющий днище с конической полостью, а внутри этого стакана размещены остальные витки спирали.

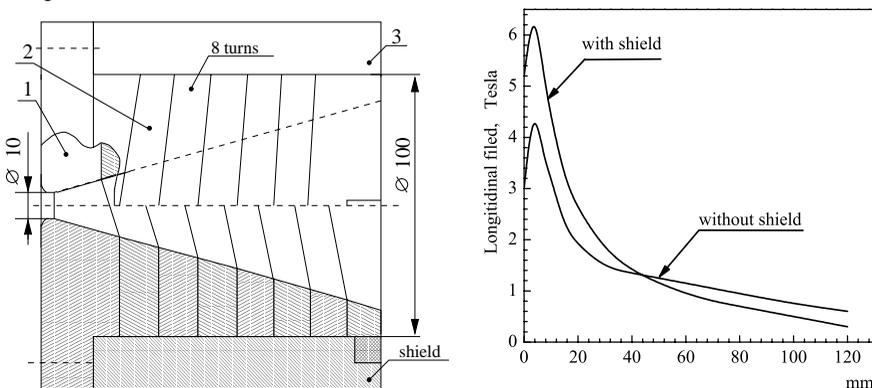


Рис. 5. Спиральный концентратор потока с экраном и продольное поле на его оси.

Легко видеть, что первый сильнополевой виток спирали в виде массивного стакана обладает большой механической прочностью и хорошей возможностью его охлаждения, а требуемый значительный ток внутренней полости этого витка формируется в результате суммирования тока спирали, уравнительного межвиткового тока и уравнительного азимутального тока экрана.

Формирователь сильного поля здесь, в сущности, одновитковый, поскольку большая часть общего тока спирали протекает по ее первому витку, а остальные витки формируют лишь "хвост" продольного распределения поля, выполняя, главным образом, роль индуктора уравнительных токов.

В силу большой аксиальной протяженности первого витка, второй и последующие витки спирали не являются уже сильнополевыми; кроме того, аксиальные механические усилия в них практически скомпенсированы, что позволяет отказаться от какого-либо их механического крепления. Не видно также никаких проблем и с организацией их интенсивного охлаждения в силу большого шага этих витков.

## 4. Экспериментальные результаты

Для проверки рассмотренных принципов построения импульсных конверсионных магнитов была изготовлена полномасштабная модель. Использованный импульсный генератор (емкость 120 мкФ, напряжение 1.35 кВ, длительность импульса 23 мкс.) работал с частотой до 50 Гц и обеспечивал максимальное значение импульсного магнитного поля 6.2 Тесла.

На рис.5 представлены экспериментальные зависимости распределения продольного поля на оси магнита для вариантов устройств без экрана и с экраном при одинаковой энергоемкости накопителя импульсного генератора. В последнем случае, при заданном уровне максимального поля 10 Тл. требуемый импульсный ток спирали составит 30 кА. при энергоемкости накопителя 320 Дж, что является вполне приемлемым.

Как уже отмечалось, наряду с энергетическими показателями конверсионных магнитов очень важны качественные характеристики формируемого магнитного поля. На рис.6 представлено поперечное дипольное возмущение магнитного поля в рассматриваемом устройстве. Дополнительное угловое отклонение, приобретаемое при прохождении частицами приведенного возмущения магнитного поля, составляет 50 мрад, что не вызовет заметного нарушения поперечной динамики позитронного сгустка с энергией порядка 25 МэВ. На рисунке для сравнения также приведено аналогичное возмущение для разработанного ранее конверсионного магнита форинжектора ВЭПП-5.

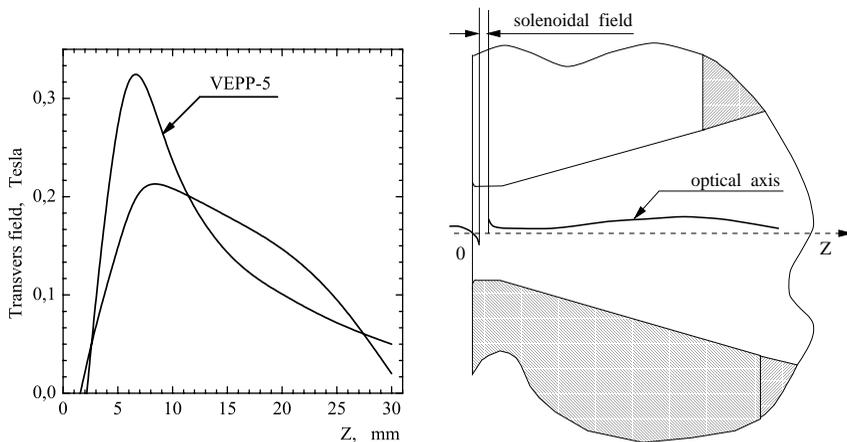


Рис. 6. Оптические характеристики модели импульсного конверсионного магнита при максимальном продольном поле 10 Тесла.

На рисунке также показано положение оптической оси магнита. Интересной особенностью этого устройства является небольшой участок равномерного соленоидального поля, на котором отсутствует радиальная составляющая, поэтому понятие оптической оси здесь не имеет физического смысла.

## 5. Заключение

В работе рассмотрены некоторые вопросы разработки быстроциклических импульсных конверсионных магнитов с большой апертурой. Рассмотрены как известные, так и возможные новые варианты построения таких устройств. Наряду с широко известными способами согласования низкоимпедансной одновитковой нагрузки (импульсный трансформатор и концентратор потока), возможно также применение спирального концентратора.

К сожалению, ни один из рассмотренных известных или новых вариантов не приводит к построению приемлемого магнита, что потребовало поиска компромиссных решений.

Показано, что наиболее приемлемым здесь представляется комбинированный вариант импульсного магнита в виде спирального концентратора с одновременным уменьшением потока рассеяния такой спирали с помощью экрана.

Проведена экспериментальная проверка работы такого устройства, показавшая, что в этом варианте наиболее полно реализуются исходные концептуальные представления:

1. массивный одновитковый формирователь сильного поля;
2. отсутствие межвитковой изоляции и крепления витков;
3. хорошие возможности организации охлаждения;
4. приемлемый уровень энергоемкости импульсного устройства.

## Литература

1. *П.В. Мартышкин*. Разработка конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Новосибирск 2000.
2. *Р.М. Лапик, А.А. Кулаков, П.В. Мартышкин*. Разработка конверсионной системы на основе численного метода. Препринт ИЯФ 99-60.
3. *Р.М. Лапик, А.А. Кулаков, П.В. Мартышкин*. Расчет и измерения прототипа импульсного магнита конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5. Препринт ИЯФ 99-59.
4. *Г. Кнопфель*. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
5. *Д. Паркинсон, Б. Малхолл*. Получение сильных магнитных полей. М.: Атомиздат, 1971.
6. *Брехна, Хилл, Бейли*. Импульсный магнит на 150 кЭ с концентратором потока и охлаждением жидким азотом. ПНИ, 1965 N 11, 3.
7. *Уилсон, Сривастава*. Конструкция эффективных концентраторов потока для получения больших импульсных магнитных полей. ПНИ, 1965, N 8, 18.
8. *R. Lapik, P. Martyshkin*. Capture Efficiency of High Field Flux Concentrator. PAC-2001, 2001.

1.	ВВЕДЕНИЕ .....	3
2.	НЕКОТОРЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	6
2.1.	Простейшая безтрансформаторная импульсная система .....	6
2.2.	Трансформаторная система.....	7
2.3.	Классический концентратор потока.....	7
2.4.	Коническая спираль.....	8
2.5.	Анализ известных вариантов .....	8
3.	НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ.....	9
3.1.	Коническая спираль с экраном.....	10
3.2.	Спиральный концентратор потока .....	11
3.3.	Приемлемый вариант конверсионного магнита.....	12
4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....	14
5.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	15

*Р.М. Лапик П.В. Мартышкин А.М. Якутин*

**Некоторые вопросы  
разработки высокопольных  
импульсных магнитов**

*R. Lapik, P. Martyshkin, A. Yakutin*

**Some problems of high field pulsed  
magnets development**

ИЯФ 2004-73

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 30.11.2004

---

Сдано в набор 2.12.2004

Подписано в печать 3.12.2004

Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 73

---

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