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

Р.М. Лапик, П.В. Мартышкин,
С.В. Шиянков, А.М. Якутин

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОН–ПОЗИТРОННОЙ КОНВЕРСИИ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

ИЯФ 2005-50

Новосибирск
2005

Система электрон-позитронной конверсии инжекционного комплекса ВЭПП-5

Р.М. Лапик, П.В. Мартышкин, С.В. Шиянков, А.М. Якутин

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

Аннотация

В работе рассмотрены основные элементы электрон-позитронной конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5. Приведены расчетные зависимости эффективности позитронного захвата конверсионной системы, также представлены экспериментальные результаты. Отмечены некоторые пути повышения эффективности конверсионной системы.

Electron-positron conversion system of forinjector complex VEPP-5

R.M. Lapik, P.V. Martyshkin, S.V. Shiyankov, A.M. Yakutin

Abstract

Basic elements of electron-positron conversion system of forinjector complex VEPP-5 are described. The numerical simulations of positron conversion system efficiency as well as experimental measurements are resulted. Some methods to increase the capture efficiency of existed system are analyzed.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

Введение

Источники позитронов существуют во всех крупных лабораториях мира, работающих со встречными электрон – позитронными пучками. Строительство нового поколения ускорительных установок с высокой светимостью выдвигает требования создания высокоинтенсивных источников позитронов, которые призваны обеспечить новые установки необходимым для их нормальной работы количеством частиц.

Наиболее распространенная и общепринятая схема позитронного источника базируется на использовании линейных ускорителей [15,16,17,18]. Использование линейных ускорителей позволяет создавать высокоинтенсивные источники позитронов. Данная схема позитронного инжектора обычно включает в себя два линейных ускорителя. Первый линейный ускоритель предназначен для получения, формирования и ускорения электронного сгустка до требуемой энергии конверсии. Далее расположен конверсионный узел, который служит для получения и формирования позитронного сгустка. Второй линейный ускоритель ускоряет до требуемой энергии уже сформированные позитронные сгустки, после чего они инжектируются в охладитель-накопитель с целью уменьшения эмиттанса сгустков.

В ИЯФ им.Будкера также ведутся работы по созданию инжекционного комплекса для будущих электрон-позитронных фабрик с высокой светимостью. Инжекционный комплекс предназначен для обеспечения электрон-позитронной c–τ фабрики требуемым для нормальной работы количеством частиц и для обеспечения позитронами ускорительного комплекса ВЭПП-4 ВЭПП-2000. Инжекционный комплекс включает в себя форинжектор, предназначенный для первоначального получения, формирования и ускорения электронных и позитронных сгустков, а так же охладитель-накопитель.

Форинжектор состоит из двух линейных ускорителей, работающих в односгустковом режиме на частоте 2856 МГц, 180°-изохронного поворота и конверсионного узла. Первый линейный ускоритель предназначен для получения, формирования и ускорения электронных сгустков до энергии 300 МэВ. Второй предназначен для получения, формирования и ускорения позитронных сгустков, а так же для доускорения электронных сгустков.

Схема работы форинжектора заключается в следующем: электронный сгусток, сформированный гармоническим и субгармоническим группирователями, протяженностью σ = 3 мм ускоряется в первом линейном ускорителе до энергии 300 МэВ, при энергетическом разбросе ±1%. число частиц в сгустке $5 \cdot 10^{10}$. После чего электронный сгусток изохронно поворачивается на 180° и фокусируется триплетом на конверсионную мишень в пятно с размером порядка 1 мм по диаметру. Позитроны, вышедшие из конверсионной мишени собираются согласующим устройством и ускоряются во втором – позитронном линейном ускорителе до энергии 510. Затем сгусток позитронов инжектируется в охладитель-накопитель. Для компенсации энергетического разброса позитронного сгустка до ±1% применяется специальное устройство – дебанчер-монохроматор. Энергетический разброс в сгустке после позитронного линейного ускорителя перед прохождением дебанчера-монохроматора должен составлять примерно ±3%.

Частота следования рабочих импульсов составляет 50 раз в секунду. При этом один из этих 50 импульсов приходится на электродный цикл работы, а 49 – на позитронный. При электронном цикле работы сгусток электронов обводится мимо конверсионной мишени и доускоряется во втором линейном ускорители до требуемой энергии инжекции.

1 Общие вопросы построения конверсионных систем

Наиболее распространенная схема получения позитронных сгустков состоит в следующем: электронный сгусток фокусируется на конверсионную мишень, в которой возникают позитроны за счет рождения электрон-позитронных пар, позитроны, выходящие из конверсионной мишени, собираются согласующим устройством, расположенным как можно ближе к мишени. После согласующего устройства расположены одна или несколько ускоряющих секций с высоким темпом ускорения, помещенные в соленоид сопровождения. Соленоидальная фокусировка используется для удержания радиального размера позитронных сгустков – до энергии частиц 150÷200 МэВ она более эффективна, чем ФОДО структура. Возможно, а иногда и необходимо применение специальных дополнительных катушек, корректирующих спадающее поле соленоида в области конверсионной мишени с целью формирования равномерного соленоидального поля.

При создании конверсионного узла возникает ряд задач, которые обычно группируют по порядку расположения основных элементов в общей конструкции:

- электрон-позитронная конверсия – выбор материала и толщины конвертора, исходя из оценки общего количества позитронов, выходящих их конверсионной мишени, их радиального, углового и энергетического распределений;

- формирование позитронного сгустка – выбор устройства для согласования фазового объема позитронного сгустка с акцептансом ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя;
- оптимизация динамики позитронного сгустка – выбор положения конвертора и согласующего магнита относительно ускоряющей структуры, выбор параметров ускоряющих и фокусирующих полей.

1.1. Принципы построения конверсионных систем

Источники позитронов, эксплуатируемые во всех лабораториях мира, используют для электрон-позитронной конверсии твердометаллические мишени с высоким атомным номером вещества. Обычно в качестве вещества мишени используют вольфрам или его сплавы для улучшения механических свойств этого материала. В качестве материала конверсионной мишени также можно использовать тантал.

Первым вопросом является выбор толщины конверсионной мишени при фиксированном значении энергии первичных электронов. Толщину конвертора, при которой число выходящих позитронов достигает максимума, называют оптимальной толщиной конвертора. Приблизительный выбор оптимальной толщины конвертора для значений энергий первичного электронного сгустка в диапазоне $0.2 \div 2$ ГэВ может быть сделан, например, на основе эмпирического соотношения [19]. Необходимо заметить, что эмпирические соотношения подобраны для некоторого диапазона энергий и некоторых материалов конвертора. Наиболее общий подход – прямое численное моделирование электромагнитных ливней в мишени с помощью специально разработанных для этой цели программ GEANT, EGS4.

Позитроны, выходящие из мишени, имеют довольно широкое распределение по углам и энергии. Типичный средний угол составляет 34° со среднеквадратичным значением 21°, для энергий эти же значения составляют 14 МэВ и 10 МэВ соответственно. При работе с конверторами оптимальной толщины данные значения практически слабо зависят от энергии первичного электронного пучка.

Для согласования эмиттанса позитронного сгустка с акцептансом ускоряюще-фокусирующего канала применяют специальные согласующие устройства, расположенные непосредственно после конверсионной мишени. Обычно такими устройствами являются короткие катушки на постоянном токе, или импульсные, создающие короткое магнитное поле, импульсные магниты типа концентратора потока или магниты постоянного тока с профилированными внутренними поверхностями, создающие спадающее продольное магнитное поле. Основными и серьезными недостатками устройств с постоянным током, формирующих спадающее поле является то, что максимальное магнитное поля не превышает 20 кГс и длина такого магнита составляет не меньше 50 см, что крайне негативно отражается на

динамике позитронного сгустка с точки зрения удлинения в согласующем устройстве [16].

Импульсные магниты, в силу, своего конструктивного решения, свободны от перечисленных выше недостатков. Максимальное значение магнитного поля может составлять до 100 кГс при длине магнита 10 ÷ 20 см, но в отличие от катушек с постоянным полем длительность импульса обычно 10 ÷ 40 μс [3]. При работе позитронного источника в односгустковом режиме, или в режиме с коротким пучком данной длительности магнитного поля является вполне достаточно.

Другой и наиболее серьезной проблемой импульсных магнитов является появление азимутальной неоднородности типа перпендикулярной составляющей магнитного поля. Особенно сильно такая неоднородность проявляется как kick-эффект в поперечной динамике позитронов при максимальных значениях продольного поля устройства 50 кГс и выше [4,5,6]. Kick-эффект является весьма серьезным ограничением максимального значения импульсного поля, т.к. при его сильном проявлении эффективность захвата позитронов значительно падает с повышением поля согласующего устройства. При неблагоприятном стечении обстоятельств, эффективность захвата импульсного устройства может быть даже меньше, чем при использовании устройства с постоянным во времени полем. Поэтому при разработке импульсного согласующего устройства с высоким значением поля следует особо уделять внимание проблеме минимизации перпендикулярной составляющей магнитного поля.

1.2. Тип согласующего устройства и положение конвертора

На позитронных источниках используются два типа согласующих устройств с продольным магнитным полем – четвертьволновый трансформатор и адиабатическое устройство.

Четвертьволновый трансформатор – устройство создающее короткое однородное поле около 20 кГс и длиной 3 ÷ 4 см, мгновенно спадающее до значения поля соленоида сопровождения. Данное устройство характеризуется большим угловым захватом до 60° и узким энергетическим спектром захватываемых позитронов ~6 МэВ [15,18].

На практике обеспечить мгновенное спадание поля невозможно, спадание происходит на длине примерно равной диаметру катушки. Характер спадания поля значительно влияет на захват позитронов, поэтому реальное значение захвата сильно отличается от захвата идеализированного четвертьволнового устройства. Реальный характер спадания поля такого устройства может быть описан распределением Глайзера.

Адиабатическое устройство создает монотонно спадающее продольное магнитное поле от своего максимального значения до поля соленоида сопровождения. Оно имеет меньшие углы собирания позитронов, но

значительно более широкий энергетический спектр. Устройство не критично к характеру спадания поля.

Первоначально термин адиабатическое устройства означал медленное – адиабатическое изменение продольного поля на длине шага ларморовской спирали [20]. Данное условие вовсе не является необходимым для достижения наибольшего захвата позитронов, более того наибольший захват достигнут на устройствах с малой длиной участка согласования. В принципе, длина участка согласования может составлять всего 6 ÷ 7 см, но обычно по конструктивным соображениям длина импульсного магнита заметно больше. С точки зрения динамики позитронов в согласующем устройстве, короткая длина участка согласования является предпочтительней, т.к. сгусток при этом меньше удлиняется, что важно для его дальнейшей динамики в ускоряющей структуре.

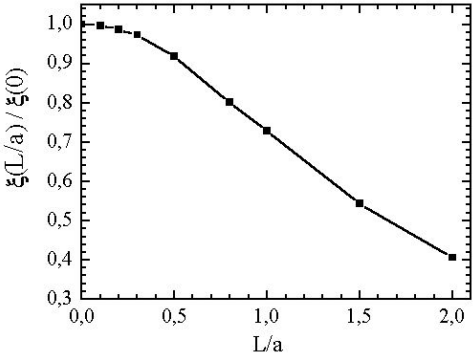


Рис. 1. Зависимость эффективности захвата позитронов от расстояния между максимумом магнитного поля и конверсионной мишенью *L*. Минимальный диаметр магнита 2·*a*.

Топология вываливающегося магнитного поля согласующего устройства определяет его расположение относительно конверсионной мишени. Априорно понятно, что наилучшим является расположение мишени прямо в максимуме магнитного поля согласующего устройства. Это объясняется динамикой позитронов в нарастающем магнитном поле. При движении частиц в таких полях угловое распределение сгустка увеличивается. На практике не всегда возможно расположить мишень в максимуме поля, особенно если применяется вращающаяся мишень с интенсивным принудительным охлаждением. Например, при расстоянии между максимумом поля и мишенью равном 0.7 минимального диаметра адиабатического устройства захват падает, примерно, вдвое (рис.1). Поэтому для уменьшения дефокусирующего влияния нарастающего поля конверсионная мишень должна располагаться как можно ближе к согласующему устройству.

1.3. Конверсионная система форинжектора

Конверсионная система состоит из следующих элементов:

- конверсионная мишень;
- согласующий магнит;
- соленоид сопровождения;
- компенсирующие катушки;
- ускоряющая секция.

Оптимальная толщина конверсионной мишени при энергии электронного сгустка 300 МэВ составляет примерно 2.5 радиационной длины материала мишени. В качестве материала мишени был выбран тантал, радиационная длина которого равна 3.8 мм. Коэффициент конверсии позитронов в мишени составляет примерно 0.8 на один электрон [2].

Энерговыделение в конверсионной мишени оптимальной толщины составляет около 18% энергии электронного сгустка. Таким образом, за один импульс энерговыделение составит 0.4 Дж, при частоте повторения электронных импульсов 50 Гц энерговыделение за секунду составит около 20 Дж.

Столь малое энерговыделение в мишени позволяет обойтись без вращающейся мишени и применить мишень специальной конструкции, позволяющей поместить ее в максимум магнитного поля. Конструкция мишени обсуждается в разделе 4. Мишень представляет собой конус с минимальным диаметром 2.5 мм. Для того, чтобы обвести мишень при работе в электронном режиме в ней прорезано специальное отверстие 2.5×2.5 мм.

Согласующий импульсный магнит и его конструкция детально описана в следующей части работы. Максимальное магнитное поле импульсного магнита должно составлять 100 кГс.

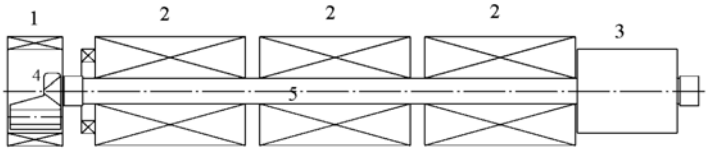


Рис. 2. Общая схема расположения магнитных элементов. 1 – компенсирующая катушка, 2 – соленоид, 3 – квадруполь, 4 – импульсный согласующий магнит, 5 – ускоряющая структура.

Сопровождающий соленоид из конструкционных соображений выполнен из 3 секций, запитываемых последовательно. Общая длина соленоида составляет 220 см, напряженность магнитного поля примерно 5 кГс. Для формирования однородного магнитного поля соленоида применяются две дополнительные корректирующие катушки. Одна расположена непосредственно перед соленоидом, вторая помещена над

согласующим магнитом. Общая схема расположения магнитных элементов конверсионной системы приведена на рис.2. Распределения продольного магнитного поля и перпендикулярных составляющих на оси ускорителя представлены на рис.3.

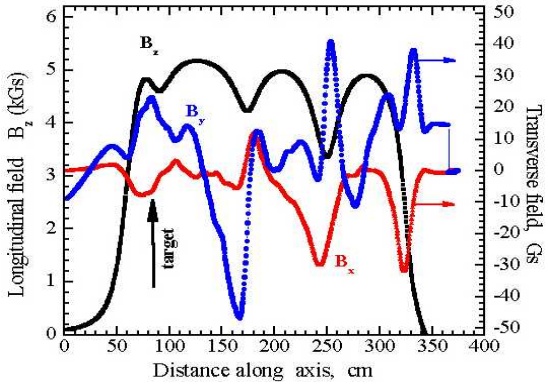


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль оси ускорителя.

Расчетный среднеквадратичный эмиттанс позитронного сгустка при средней энергии сгустка 80 МэВ (на выходе первой ускоряющей секции) составит примерно 3 см·мрад., среднеквадратичный размер сгустка 5.2 мм. При адекватном согласовании соленоидальной фокусировки с регулярной ФОДО структурой второго – позитронного линака и энергии инжекции позитронного сгустка в охладитель-накопитель 510 МэВ с разбросом ±3% эффективность захвата должна составить $9\cdot10^{-2}$ позитрона на один электрон [1].

Зависимость расчетной эффективности захвата от значения магнитного поля приведена на рис.4. Как видно из приведенной зависимости, захват позитронов монотонно растет с увеличение магнитного поля согласующего устройства вплоть до 100 кГс.

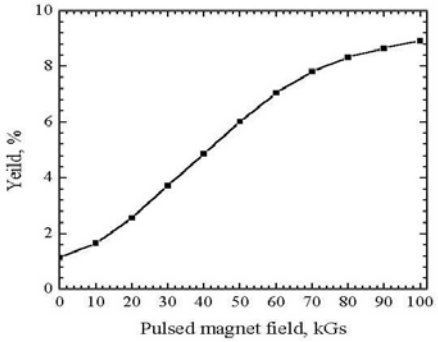


Рис. 4. Эффективность захвата от значения магнитного поля согласующего устройства.

2. Импульсный конверсионный магнит

Наиболее существенной частью любой конверсионной системы (КС) является сильнополевой конверсионный магнит (КМ), который обеспечивает необходимые параметры импульсного магнитного поля непосредственного после мишени.

2.1. Проблемы разработки конверсионного магнита

При разработке КМ, важнейшего элемента любой позитронной системы, приходится решать три основные проблемы в отношении механики, энергетики и оптики таких импульсных устройств.

1. Механика сильнополевого магнита

Проблема механики такого импульсного устройства – результат действия электродинамических сил в элементах магнита, прежде всего, в его токопроводящих узлах. Импульсное механическое воздействие при работе магнита не должно приводить к недопустимым механическим напряжениям в его элементах. Обычно эта проблема разрешима путем наложения внешних механических связей [8-10].

Применительно к КМ, проблема механического крепления витков обмотки обостряется по причинам невозможности применения органической изоляции в условиях интенсивных потоков ионизирующего излучения. Здесь возможно применение, в сущности, лишь керамической изоляции, причем в ограниченном количестве.

Быстроциклический режим работы КМ ($f \geq 50$ Гц) вообще практически исключает применение какой-либо изоляции, поскольку она подвержена интенсивному износу в условиях вибраций и сухого трения. Наработка на отказ импульсных магнитов с межвитковой изоляцией не превышает нескольких десятков тысяч импульсов [8-10], что на 4–5 порядков меньше требуемого. Таким образом, быстроциклический режим работы КМ практически исключает возможность крепления витков импульсной катушки, поскольку эти витки подвержены воздействию значительных вибраций. Здесь допустимо применение лишь исключительно керамической изоляции, причем только для слабополевых элементов обмотки в условиях гарантированного отсутствия вибраций, либо их ограничения до допустимой величины, исключающей износ пары керамика – металл.

Наряду с износом изоляции, в быстроциклическом режиме работы импульсного устройства наблюдается износ и ослабление механических связей, организованных с применением фланцев, прокладок, болтов, шпилек, гаек и шайб. Процессы такого износа характеризуются возрастанием шума работающего изделия, что, в конечном счете, может привести к снижению электромагнитных параметров импульсного устройства и даже его разрушению.

Специфика КМ заключается в том, что оперативное устранение отмеченного ослабления механических связей практически невозможно, поскольку эти элементы расположены, как правило, в вакууме, причем в интенсивных потоках ионизирующего излучения, поэтому они сильно активированы. Эти обстоятельства могут исключить возможность доступа к этим элементам даже после отключения источника излучения.

2. Проблема энергетики КМ

Параметр энергоемкости магнита определяет его стоимость, требуемую систему водяного охлаждения и ограничивает допустимую частоту циклов работы импульсного устройства. С другой стороны, энергоемкость магнита определяет габариты, стоимость и энергопотребление требуемого источника питания, причем эта стоимость, как правило, сравнима со стоимостью самого магнита.

В нашем случае энергоемкость идеализированного объема КМ, ограниченного областью поперечной динамики позитронного сгустка и оптимальной длиной участка согласования, невелика и не превышает 10 Дж, однако энергоемкость всего магнита обычно заметно больше из-за невозможности разработки магнита с топологией поля, следующей из представления о таком идеализированном объеме [6].

Эмпирическая зависимость энергоемкости магнита в виде конического витка с учетом краевых эффектов и утечки потока:

$$W_n \approx \frac{2\pi\mu_0 H_m^2 r_0^3}{\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (1)$$

где $W_n -$, $\mu_0 -$, $H_m -$, $r_0 -$, $\alpha -$.

Из чего видно, что важнейшим параметром импульсного магнита в смысле его энергоемкости является апертура устройства [6].

На практике боле существенным параметром является значение энергоемкости первичного емкостного накопителя энергии импульсного генератора (см.3.1.). Обычно энергоемкость такого накопителя приблизительно вдвое выше энергоемкости магнита, следующей из (1) из-за всегда имеющихся паразитных параметров разрядного контура и его крайне низкой добротности, поэтому к максимуму разрядного тока активные потери в контуре уже достигают 30 ÷ 40% накопленной энергии [8]. В этих условиях для грубой оценки средней потребляемой мощности источника питания КМ можно воспользоваться выражением:

$$P_{cp} \approx 2W_m f = \frac{4\pi\mu_0 H_m^2 r_0^3 f}{\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (2)$$

где f – частота работы устройства.

3. Проблема оптики импульсного магнита

Наряду с обеспечением необходимых параметров продольного импульсного магнитного поля *Hz* (рис.5а), при разработке устройства необходимо свести к минимуму азимутальную неоднородность поля $H_r = f(\varphi)$ радиальной компоненты $Hr \approx H_m r \operatorname{tg}\alpha$. Указанная неоднородность, прежде всего, есть результат утечки потока из конической полости магнита через принципиально необходимый разрез этой полости в месте токоподвода. В целях простоты анализа указанной проблемы оптики магнита, сложную по топологии азимутальную неоднородность $H_r = f(\varphi)$ удобно представить в форме простого дипольного возмущения на оси магнита.

На рис.5а приведено типичное распределение продольного магнитного поля $H_z = (z)$, а также поперечного поля $H\perp$ на оси конической полости с разрезом (Рис.5б). Наличие поперечного поля на оси магнита приводит к отклонению позитронного сгустка, причем этот kick–эффект [5,6] в неудачных конструкциях конверсионных магнитов может составлять десятки градусов для позитронов с энергией 20 ÷ 30 МэВ, в то время как приемлемым отклонением позитронного сгустка можно полагать угол не более 1 ÷ 2 градусов.

Принцип возникновения поперечного поля на оси конической полости с разрезом легче понять на примере импульсного магнита в виде классического концентратора потока [8-10, 12-13].

Многовитковый индуктор, расположенный на внешней поверхности массивного витка, обеспечивает практически симметричный токоподвод вихревого зеркального тока к разрезу такой конической полости (Рис.5б).

В предположении отсутствия потока рассеяния, распределение продольного магнитного поля на оси магнита будет соответствовать закону «обратных квадратов»:

$$Hz(z) = \frac{H_m}{\left(1 + \frac{z}{r_0}\operatorname{tg}\alpha\right)^2}. \qquad (3)$$

Легко видеть, что такое распределение поля означает резко неравномерное распределение тока по внутренней поверхности конуса, что находится в противоречии с симметричным токоподводом, следующим из конструкции классического концентратора потока. Это противоречие приводит к отклонению тока в разрезе от радиального направления, т. е. появлению токов с выраженной аксиальной компонентой. На рис.5б условно показана топология токов в разрезе конуса в виде трех токовых линий (i), а также (пунктиром) условная деформированная силовая линия, наглядно иллюстрирующая появление поперечного поля на оси такого магнита.

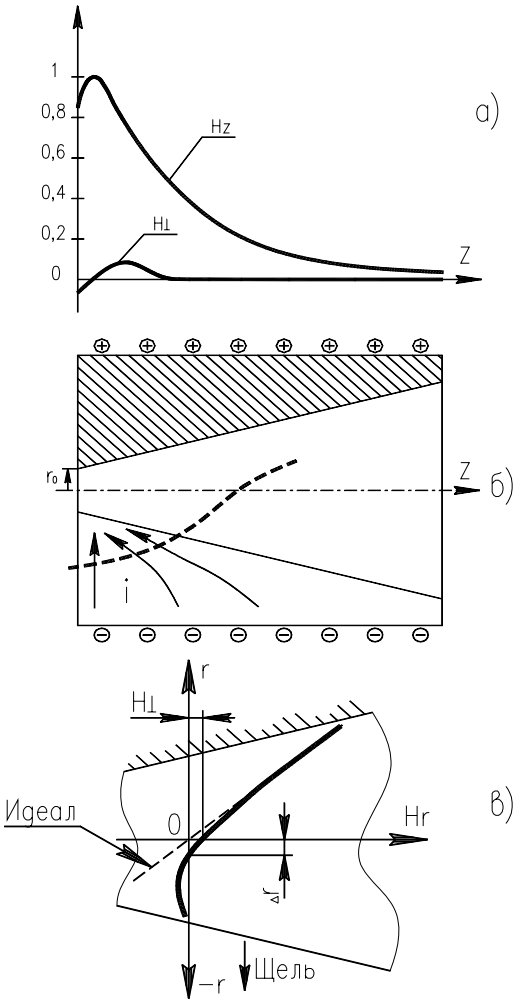


Рис. 5. а) типичное распределение продольного H_z и поперечного $H_\perp$ поля на оси магнита; б) иллюстрация появления $H_\perp$; в) радиальная компонента поля $H_r(r)$.

На рис.5в показан также типичный характер радиальной компоненты поля $Hr(r)$ в плоскости щели: в области противоположной разрезу конуса, радиальная компонента поля близка к идеализированному значению $Hr = \dfrac{H_z r \mathrm{tg}\alpha}{r_0}$, но заметно искажается у разреза. Значение $H_\perp$ здесь

характеризует поперечное поле на оси магнита, а Δr – смещение оптической оси.

На первый взгляд, уменьшения поперечного поля можно добиться путем увеличения радиального размера щели, т.е. путем увеличения базы для необходимого перераспределения тока, однако такое увеличение диаметра концентратора приведет к очевидному увеличению потерь в индукторе и массивной вставке. После чего с неизбежностью последует и увеличение индуктивности рассеяния, что в итоге приведет к снижению эффективности устройства.

2.2. Возможные варианты построения требуемого магнита

В технике сильных импульсных магнитных полей уже давно конкурируют две концепции в отношении выполнения формирователей сильного поля в виде одновиткового или многовиткового типов [8-10].

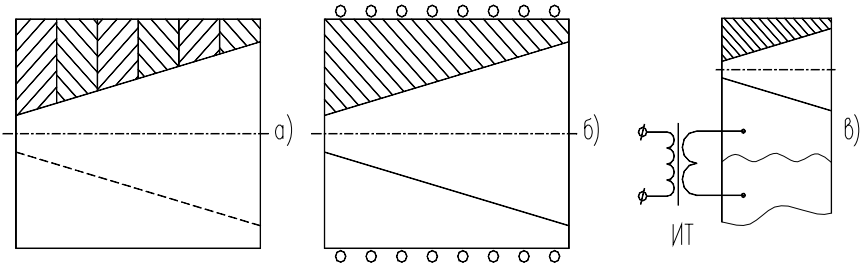


Рис. 6. Основные конструктивные схемы конверсионных магнитов.

Мультивитковый магнит (рис.6а) обладает заметной индуктивностью, поэтому здесь автоматически решается сложная проблема согласования нагрузки и импульсного питающего генератора, который всегда имеет паразитные параметры. С другой стороны, в мультивитковой импульсной катушке резко обостряются проблемы механической прочности и охлаждения такого устройства. Известна лишь одна успешная реализация многовитковой конструкции быстроциклического КМ [11]. Успех этой конструкции объясняется отсутствием изоляции и крепления витков импульсной спирали, которая удерживается за счет инерции, поэтому такая конструкция требует очень малой длительности питающего импульса порядка нескольких микросекунд.

Применительно к КМ, в одновитковом варианте таких устройств проще решаются проблемы необходимой механической прочности и охлаждения, однако здесь требуется питающий генератор с очень большим током. Такой формирователь сильного поля имеет довольно экзотические параметры: его индуктивность измеряется всего единицами нГн, а требуемый ток – сотнями кА, из чего следует необходимость согласования такой низкоимпедансной

нагрузки с питающим генератором. Указанное согласование может быть выполнено по типу классического концентратора потока (рис.6б) или с помощью специального импульсного трансформатора (ИТ) (рис.6в).

2.3. Выбор и обоснование принятого варианта магнита

На рис.6 представлены, в сущности, все известные возможные конструктивные схемы построения конверсионных магнитов.

Импульсная спираль (рис.6а), как правило, не обладает необходимой жесткостью, а увеличение жесткости конструкции путем наложения внешних механических связей ведет к быстрому износу изоляции в результате вибраций и сухого трения. Частота работы требуемого импульсного устройства составляет 50 Гц, поэтому такой быстро-циклический режим работы мультивитковой конструкции исключает возможность применения межвитковой изоляции и механического крепления витков спирали при требуемой наработке на отказ порядка 10^9 циклов. С другой стороны, изящное решение с инерциальным удержанием витков импульсной спирали [11] требует очень малой длительности рабочего импульса, что приводит к высоковольтной системе питания магнита с необходимостью использования тиратронного коммутатора, что крайне нежелательно.

Как уже отмечалось, классический концентратор потока (рис.6б) мало пригоден в качестве КМ в силу изложенных выше проблем с оптикой таких устройств, кроме того, эффективность концентраторов невелика и не превышает 15 ÷ 20% [9,10,13]. Здесь и далее под эффективностью понимается отношение энергоемкости конической полости магнита к энергоемкости первичного накопителя энергии импульсного генератора.

Таким образом, две из трех известных конструктивных схем построения КМ (рис.6) практически мало пригодны для построения требуемого устройства, причем по достаточно принципиальным соображениям (проблемы механики или оптики), поэтому последний из трех вариантов магнита рассмотрим более подробно.

В технике сильных импульсных магнитных полей одновитковые формирователи представлены наиболее широко, достаточно заметить, что все рекорды в этой области достигнуты на одновитковых нагрузках. Хорошо известны также попытки использования импульсных трансформаторов (ИТ) для согласования параметров таких нагрузок с питающим генератором [8÷10]. Однако применение ИТ имеет и понятные трудности. Прежде всего, ИТ во многом определяют стоимость и надежность любой импульсной системы; во-вторых, применение ИТ обеспечивает искомое согласование нагрузки и генератора, однако наличие такого элемента в разрядном контуре всегда увеличивает паразитные параметры этого контура, так что конечный результат здесь не всегда очевиден. Здесь под конечным результатом понимается, прежде всего, эффективность импульсного устройства. Общее

направление преодоления указанных трудностей состоит в разработке специальных ИТ, как правило, под конкретную задачу.

Габариты и стоимость ИТ определяются, прежде всего, величиной магнитного потока его сердечника:

$$\Phi = \int_0^t U\,dt = U_{cp}\Delta t\ .$$

где U_{cp} – среднее напряжение, Δt – длительность фронта импульса тока.

Апертурные ограничения, следующие из поперечной динамики позитронного сгустка приводит к небольшому значению требуемой апертуры магнита порядка 4 ÷ 5 мм, следовательно величина потока $\Phi \approx 5\cdot10^{-4}$ Вб. Указанное значение потока невелико и позволяет надеяться на построение ИТ небольших габаритов и стоимости. Таким образом, специфика нашей задачи состоит в крайне малой индуктивности конического формирователя $L_0 \approx (3\div4)\cdot10^{-9}$ Гн и легко видеть, что индуктивность требуемого сильноточного вакуумного ввода многократно превзойдет параметры такой нагрузки, что требует размещения ИТ внутри вакуумной камеры. Такое решение, в свою очередь, сопряжено с проблемой размещения ИТ и невозможностью использования органической изоляции. Дело в том, что мишень с магнитом находятся в интенсивном потоке ионизирующего излучения и достаточно сильном постоянном магнитном поле порядка 3 ÷ 5 кГс, которое создается специальным соленоидом, внутренний диаметр которого по энергетическим соображениям должен быть минимальным. Поиски конструктивного решения этих проблем приводят к идее совмещения одновитковой нагрузки и согласующего ИТ (рис.7).

На рис.7а представлен вариант импульсного магнита в виде массивного медного блока с рабочей конической полостью 4, цилиндрической полостью 1 и соединяющим эти полости разрезом 3. Первичная обмотка ИТ 2 размещена внутри цилиндрической полости 1, т.е. ИТ совмещен непосредственно с нагрузкой и соединен с ней с помощью разреза 3, играющего роль плоского фидера между вторичным витком этого ИТ и нагрузкой.

Подобная простая конструктивная схема построения ИТ оказывается возможной в силу сравнительно небольшой величины потока конической полости и фидера ($\Phi \approx 5\cdot10^{-4}$ Вб), диаметр цилиндрической полости при этом невелик, поэтому все устройство имеет вполне приемлемые габариты.

Анализ, представленной на рис.7а схемы построения импульсного магнита, выявил два ее недостатка. Во-первых, высота обмоток трансформатора мала и ограничена длиной конуса L, а индуктивность рассеяния ИТ, как известно, $L_s \approx 1/L$ и будет велика и сравнима с индуктивностью нагрузки. Во-вторых, в рассматриваемой конструкции имеет место симметричный токоподвод к нагрузке в виде конического витка,

что с неизбежностью приведет к проблемам оптики такого магнита, как и в случае классического концентратора потока (см. 2.1.).

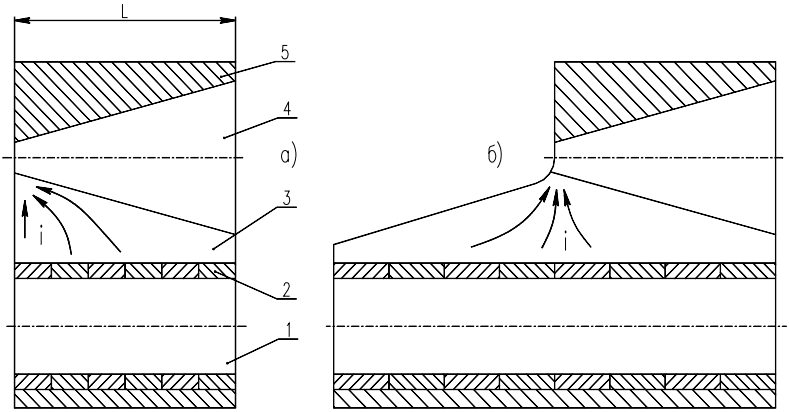


Рис. 7. Варианты совмещения одновитковой нагрузки и трансформатора: а) симметричный вариант; б) асимметричный вариант.

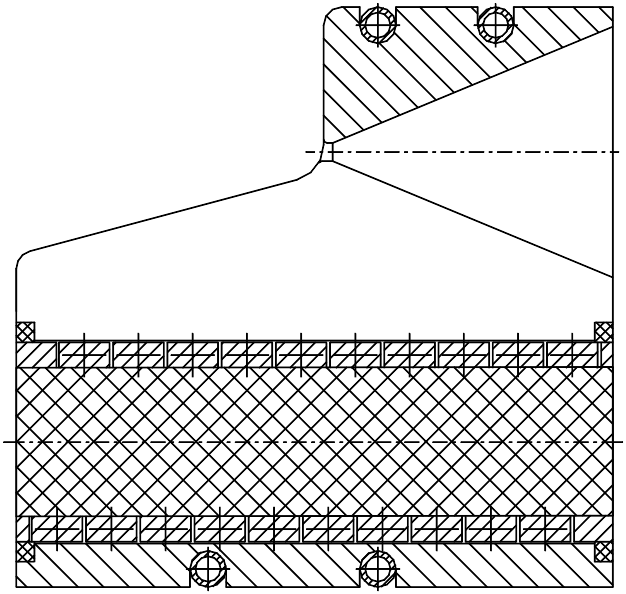
Указанных проблем можно избежать если остановиться на асимметричном варианте магнита с увеличенной высотой обмоток трансформатора, что обеспечивает асимметричный токоподвод (рис.7б). На рисунке условно показаны три линии сильного тока (i), которые полезно сравнить с аналогичными линиями для классического концентратора (рис.5б) и симметричного варианта (рис.7а). Из этого сравнения очевидна более совершенная оптика асимметричного варианта в силу многократного уменьшения аксиальной компоненты сильного тока в области разреза рабочей конической полости.

2.4. Прототип конверсионного магнита

Для проверки рассмотренных выше принципов построения требуемого конверсионного магнита был разработан, изготовлен и испытан прототип этого изделия (рис.8).

Длина трансформаторной полости прототипа магнита несколько увеличена в сравнении с длиной конуса исходя из соображений, изложенных предыдущем параграфе. Корпус магнита и первичная обмотка ИТ, содержащая 10 витков, имеют водяное охлаждение.

Поскольку необходимое изменение магнитного потока невелико, то оказалось возможным использовать цилиндрический ферритовый сердечник, размещенный внутри первичной обмотки ИТ. Применение здесь даже такого разомкнутого ферромагнитного сердечника позволяет приблизительно на 20% увеличить эффективность импульсного устройства в результате увеличения индуктивности намагничивания ИТ.



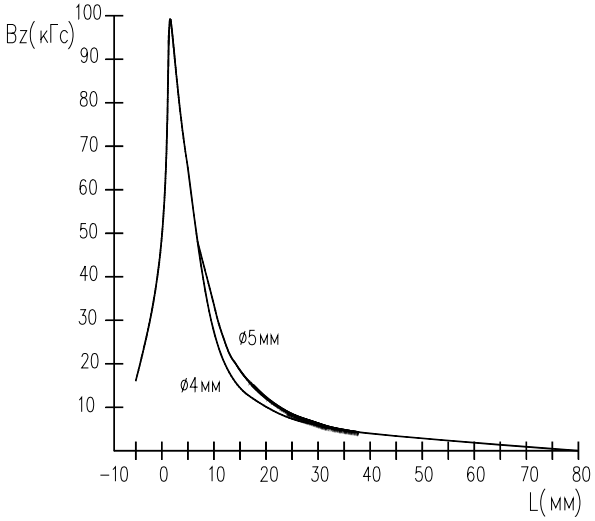


Рис. 8. Прототип КМ и продольное поле на его оси.

В режиме максимального импульсного поля B_m = 10 Тл общий ток конической полости магнита $\oint Hdl \approx 100$ кА. В этом режиме прототип

изделия проработал около 10^7 циклов без какого-либо изменения параметров. Длительность импульса тока составила приблизительно 25 мкс, а эффективность устройства – 35% [3].

Прототип испытывался в двух модификациях относительно размера апертуры, которая составляла 4 и 5мм. В области сильных полей заметного отличия в распределении поля при этом не наблюдалось (рис.8).

Сколько-нибудь заметных вибраций корпуса магнита во время работы не отмечалось, а вибрация первичной обмотки была в допустимых пределах и не приводила к ее износу в местах центровки краев этой обмотки в корпусе магнита. Указанная центровка осуществлялась с помощью двух керамических колец (рис. 8).

2.5. Рабочий вариант конверсионного магнита

Испытания прототипа требуемого импульсного магнита подтвердили основные исходные представления в отношении механики и энергетики таких изделий, а также топологии поля таких устройств. В результате был разработан и изготовлен уже штатный вариант конверсионного магнита (рис. 9).

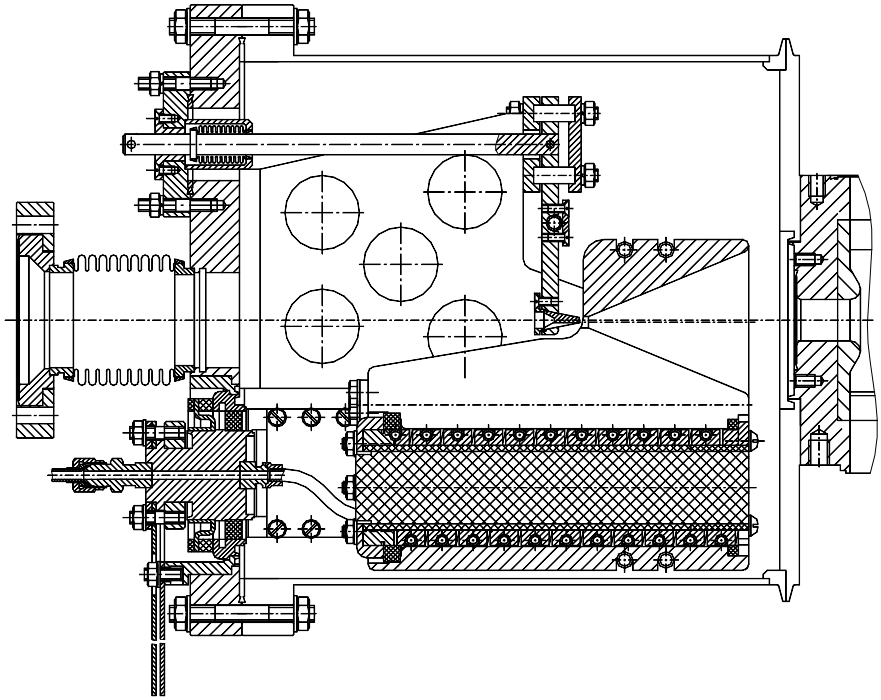


Рис. 9. Конверсионный магнит форинжектора ВЭПП-5 в сборе с конверсионной мишенью и вакуумным фланцем.

В рабочем варианте магнита апертура была увеличена до 5.5 мм, в целях улучшения функционирования системы «by-pass» (см. 4.3). Также несколько увеличена длина трансформаторной полости магнита. Кроме того, решено отказаться от ферритового сердечника, прежде всего, в виду сомнений в отношении его вакуумных свойств в условиях интенсивных потоков ионизирующего излучения. Каких-либо иных заметных отличий от прототипа у штатного КМ нет.

КМ монтируется на фланце вакуумной камеры на кронштейнах, выводы первичной обмотки ИТ выходят в атмосферу через проходной коаксиальный вакуумный ввод, три трубки двух параллельных контуров водяного охлаждения проходят через фланец вакуумной камеры, а потенциальная трубка охлаждения проходит через ввод обмотки трансформатора.

В конструкции предусмотрена возможность юстировки магнита, а также возможность изменения положения мишени, о чем подробнее пойдет речь в разделе 5.

Основные параметры магнита:

- максимальное значение магнитного поля $B_m = 10$ Тл;
- интеграл $\oint Hdl$ $I_{2m} \approx 120$ кА;
- максимальное напряжение накопителя $U_{cm} = 1.2$ кВ;
- энергоемкость накопителя $W_c \approx 90$ Дж;
- длительность импульса тока $\tau \approx 26$ мкс;
- частота работы $f = 50$ Гц;
- средняя потребляемая мощность $P_{cp} \approx 4$ кВт.

Результаты стендовых испытаний этого устройства и предварительные результаты работы в стационарных условиях на комплексе ВЭПП-5 будут рассмотрены в разделе 4.

3 Система питания конверсионного магнита

Система питания любого импульсного устройства, как правило, во многом определяет массу, габариты, стоимость и надежность работы такого устройства. Сказанное в полной мере относится и к системе питания (СП) рассматриваемого конверсионного магнита. Достаточно заметить, что рассматриваемая СП должна обеспечивать быстроциклический (50 Гц) режим работы импульсного магнита с максимальным разрядным током накопителя порядка 12 кА при напряжении около 1.2 кВ и длительности импульса тока порядка 25 мкс.

Система питания конверсионного магнита состоит из импульсного генератора, зарядного устройства емкостного накопителя этого генератора и электронных блоков управления и контроля.

3.1. Импульсный генератор

Импульсный генератор (ИГ) обеспечивает указанные выше параметры питания импульсного конверсионного магнита. ИГ состоит из двух основных элементов: емкостного накопителя энергии и коммутатора. Необходимые вспомогательные элементы управления, измерения и контроля здесь не рассматриваются.

ИГ, упрощенная схема которого представлена на рис.10, содержит восемь одинаковых секций емкостного накопителя $C_1 \div C_8$ и тиристорный коммутатор, выполненный из восьми параллельных вентилей $V_1 \div V_8$, имеющих общую анодную водоохлаждаемую шину, к которой присоединена нагрузка в виде первичной обмотки ИТ $L_1 \approx 0.4 \cdot 10^{-6}$ Гн.

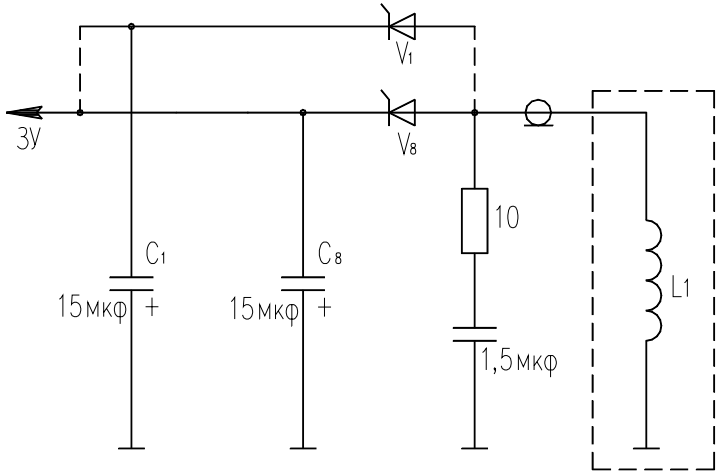


Рис. 10. Импульсный генератор системы питания конверсионного магнита.

Указанная нагрузка шунтирована защитной RC-цепочкой, все управляемые вентили коммутатора также имеют свои защитные RC-цепи (на рис.10 не показаны).

Применение секционированного емкостного накопителя энергии, каждая секция которого снабжена своим вентилем, позволяет избежать известных проблем с неравномерным распределением токов по вентилям при их параллельной работе.

Принимая во внимание требуемые параметры коммутатора (импульсный ток 12 кА, напряжение 1.2 кВ и длительность импульса порядка 25 мкс) применение здесь тиристорного варианта, в сущности, не имеет альтернативы.

Применение малоиндуктивной ошиновки накопителя и коммутатора позволило обеспечить величину паразитных параметров генератора порядка

15% в сравнении с индуктивностью нагрузки, что представляется хорошим результатом для генераторов этого типа.

ИГ представляет собой единый блок с габаритными размерами 600×500×500 (L×B×H) и массой около 100 кг. ИГ размещается в непосредственной близости от фланца вакуумной камеры конвертора с коаксиальным вводом обмотки магнита и соединение этих элементов производится с помощью шести коаксиальных кабелей длиной около 1 м.

3.2. Простейшие зарядные устройства емкостного накопителя энергии

Рассмотрим некоторые возможности построения простейших зарядных устройств и начнем это рассмотрение с базового резонансного варианта таких устройств. На рис.11а представлена упрощенная схема ИГ в виде емкостного накопителя C_H и коммутатора V_K с цепью заряда этого накопителя в виде источника питания U_d, диода D и реактора L_d, причем $L_d \gg L_1$.

После разряда накопителя C_H на нагрузку L_1 через коммутатор V_K, с момента времени t_1 этот накопитель медленно ($L_d \gg L_1$) перезаряжается через источник U_d по цепи D – L_d, начиная с положительного остаточного напряжения на накопителе U_{CO}, которое устанавливается в конце цикла работы ИГ. Величина этого обратного напряжения равна:

$$U_{CO} = k \cdot U_{CM}, \qquad (4)$$

где U_{CM} – исходное отрицательное напряжение на накопителе, а коэффициент k зависит от добротности разрядного контура (в нашем случае $k \approx 0.6$).

Можно показать, что в конце цикла заряда (момент t_2) этот накопитель окажется заряженным до отрицательного напряжения

$$U_{CM} = 2U_d + U_{CO} \qquad (5)$$

Указанное соотношение подразумевает, разумеется, отсутствие активных потерь в зарядной цепи. В результате, из (4) и (5) следует:

$$U_{CM} = \frac{2U_d}{1-k} \qquad (6)$$

Для нашего случая получаем $U_{CM} \approx 5U_d$, из чего следует, что здесь необходим источник питания с выходным напряжением $U_d \approx 250$ В.

Очевиден существенный недостаток рассмотренного простейшего зарядного устройства – отсутствие регулировки напряжения на накопителе и, соответственно, величины формируемого магнитного поля. Классический и очевидный путь преодоления указанного недостатка – использование регулируемого источника питания U_d, например трехфазного управляемого выпрямителя, что оправдано при заметной средней мощности устройств питания (десятки, сотни и более кВт).

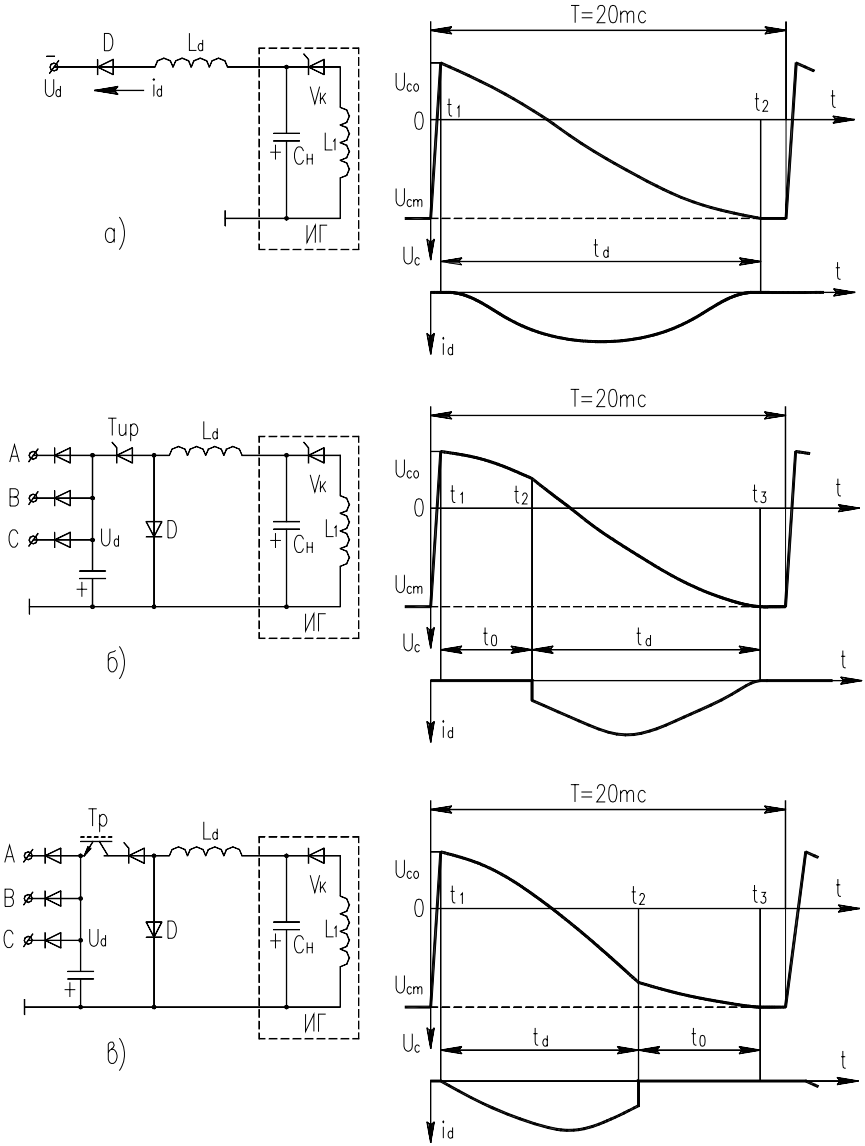


Рис. 11. Простейшие зарядные устройства. а) Схема с активным зарядным циклом ($t_{ch}= t_d$). б) Схема с пассивным началом (t_0) и активным завершением (t_d) зарядного цикла ($t_{ch}= t_0+t_d$). в) Схема с активным началом (t_d) и пассивным завершением (t_0) зарядного цикла ($t_{ch}= t_d+t_0$).

3.3. Устройства с управляемым зарядным циклом

Специфика рассматриваемой СП состоит в низкой добротности разрядного контура ($Q \approx 1$), большой скважности работы ($S \approx 800$) и небольшой средней мощности ($P \approx 5$ кВт). Представляется, что классическое решение зарядного устройства с использованием силового трансформатора и трехфазного управляемого выпрямителя в нашем случае не вполне оправдано.

На рис.11б и 11в представлены два возможных варианта построения зарядного устройства с использованием простейшего неуправляемого источника питания, но с управляемым циклом заряда по принципу ШИМ – регулирования.

В качестве источника питания здесь используется простейший безтрансформаторный однотактный трехфазный неуправляемый выпрямитель сетевого напряжения 380/220В с отрицательным выходным напряжением $U_d = 250$ В.

На рис. 11б перезаряд накопителя начинается с пассивной его фазы по цепи L_d – D. В любой фазе этого процесса (момент t_2) можно включить тиристор Тир, диод D при этом запирается и завершается процесс перезаряда накопителя уже в активной его фазе, когда ток перезарядки i_d протекает через источник питания ($t_2 \div t_3$).

В схеме на рис.7в перезаряд накопителя начинается с активной фазы ($t_1 \div t_2$), а завершается пассивной после выключения транзистора Тр в момент времени t_2.

Регулируя фазу коммутации активных элементов (Тир и Тр), представляется возможным управлять уровнем напряжения на накопителе. В тиристорном варианте исходное напряжение на емкостном накопителе U_{CM} может регулироваться в пределах от $\approx 1.2U_d$ до $\approx 5U_d$, а в транзисторном – нижний предел этого напряжения не ограничен, т.е. схема с транзисторным вариантом более совершенна в функциональном отношении.

В сравнении с классическим вариантом построения зарядного устройства на базе силового трансформатора и трехфазного управляемого выпрямителя, рассматриваемые варианты зарядных устройств более просты и имеют меньшие габариты и стоимость. Недостаток этих устройств в части неравномерной загрузки питающей сети ограничивает их применение в мощных импульсных системах, однако в нашем случае небольшой средней мощности эти недостатки не существенны.

В настоящее время разработан, изготовлен и уже длительное время находится в эксплуатации вариант зарядного устройства с тиристорным регулятором, а более совершенный вариант с транзисторным регулятором находится в стадии испытаний.

Зарядное устройство накопителя и различные электронные блоки управления, контроля, измерения, защиты, сигнализации расположены в стандартной стойке «Вишня», которая может располагаться на произвольном

расстоянии от импульсного генератора и конвертора. Предусмотрена возможность управления системой питания конверсионного магнита как с пульта ускорительного комплекса, так и в «ручном режиме» непосредственно со стойки.

4. Конверсионная мишень

Конверсионная мишень является важной и существенной частью позитронной системы, особенно в случае интенсивных первичных электронных пучков, где уже возникают проблемы выбора материала мишени, ее охлаждения и механической прочности при термоциклических ударах.

4.1. Энергетика и механика мишени

В нашем случае, энергия, запасенная в одном первичном электронном сгустке равна:

$$W = n \cdot E = 5 \cdot 10^{10} \cdot 300 \cdot 10^{6} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \approx 2.5 \text{ Дж},$$

где n – число частиц, E – энергия частиц в сгустке.

Энерговыделение в мишени составляет около 10% энергии первичного пучка электронов [7], поэтому среднее значение тепловой мощности составит:

$$P_{cp} \approx 0.1 \cdot W \cdot f \approx 0.1 \cdot 2.5 \cdot 50 \approx 12.5 \text{ Вт},$$

где f – частота повторения сгустков.

Приблизительно такое же дополнительное значение потерь в мишени можно ожидать при размещении ее торца в области сильного импульсного магнитного поля. Таким образом, мишени необходимо снимать около 25 Вт тепловой мощности, что не составит больших трудностей.

Другой проблемой мишени является локальный импульсный нагрев электронным пучком с последующим тепловым расширением и возникновением механических напряжений. В случае больших напряжений можно ожидать разрушения кристаллической решетки материала мишени особенно в режиме термодинамических нагрузок. Максимальное энерговыделение в наших условиях составляет около 1.5% на миллиметр длины мишени [7], т.е. удельное энерговыделение составит:

$$W_1 \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/мм},$$

что приведет к локальному импульсному нагреву, например, молибденовой мишени на

$$\Delta T = \frac{W_1}{C_v S} \approx \frac{4 \cdot 10^{-2}}{2.8 \cdot 10^{-3} \cdot 1.5} \approx 10^{\circ},$$

где C_V – объемная теплоемкость, S – площадь наиболее нагретого пятна малого торца мишени.

В материале мишени при этом возникнут механические напряжения

$$\sigma = \frac{\lambda E \, \Delta T^{\circ}}{2} \ ,$$

где λ – коэффициент линейного расширения материала, E – модуль упругости.

Из последнего выражения в нашем случае следует $\sigma \approx 7 \cdot 10^6$ Н/м^2, что приблизительно на два порядка меньше предела текучести тантала.

4.2. Конструкция мишени

Как видно из оценок сделанных в предыдущем параграфе, в нашем случае не возникает проблем с механической прочностью твердотельной мишени и ее охлаждением, что позволяет остановиться на простом ее варианте.

В качестве материала мишени выбран тантал (радиационная длина $\lambda \approx 4$ мм), такая мишень в виде конуса с минимальным диаметром 2.5 мм и длиной 12 мм запрессована в охлаждаемый держатель, который с помощью тяги может перемещаться в аксиальном направлении на ±2мм из положения указанного на рис.12.

При предельном перемещении вправо, торец мишени малого диаметра оказывается в области максимального магнитного поля.

Предусмотрена возможность ручного перемещения мишени, а также дистанционного с помощью специального механизма с электрическим приводом, который расположен вне вакуумной камеры на ее фланце. Необходимость такого перемещения связана с зависимостью коэффициента конверсии от положения мишени, что требует экспериментального определения оптимального положения мишени.

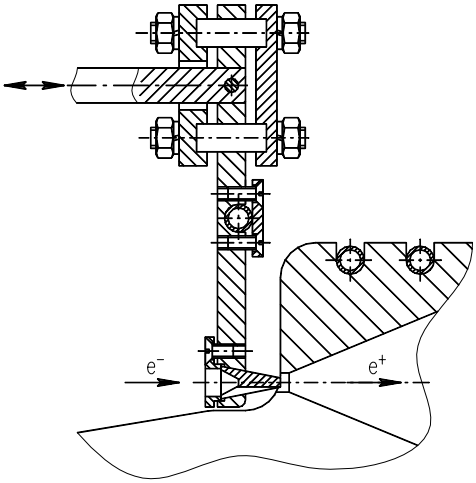


Рис. 12. Конструкция мишени.

4.3. Система «by-pass»

По условиям работы ускорительного комплекса следует предусмотреть электронный режим работы позитронного линейного ускорителя, поэтому конструкция мишени должна обеспечивать возможность инжекции электронного пучка в ускоритель, входной конец которого закрыт конвертором. Схема инжекции электронов показана на рис.13.

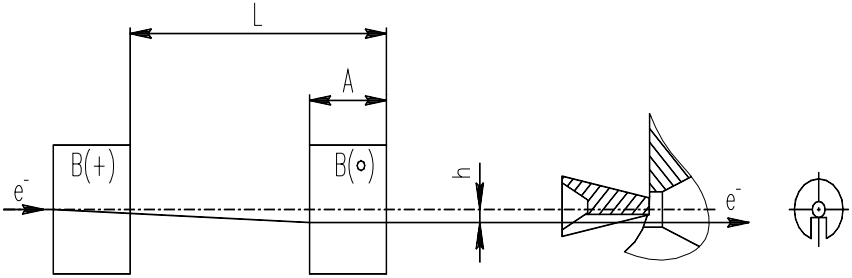


Рис. 13. Схема «by-pass».

Электронный пучок последовательно проходит две области B(+) и B(∘) поперечного магнитного поля, обретая в результате поперечное смещение:

$$h = \frac{L \cdot A \cdot B}{K}$$

$K \approx 10^6$ Гс/см для электронов с энергией E = 300 МэВ.

Указанное смещение $h \approx 2$ мм необходимо для обхода (by-pass) электронным пучком конверсионной мишени, в теле которой имеется специальный паз 2.5×2.5 мм. Указанные на рисунке области отклоняющего поля $B \approx 7$ кГс формируют специальные импульсные магниты. Рассмотренная система обеспечивает прохождение электронного пучка на каждом пятидесятом тактовом импульсе, т.е. работает с частотой 1 Гц.

5. Экспериментальные результаты

5.1. Стендовые испытания позитронной системы

После разработки и изготовления требуемого конверсионного магнита были проведены его стендовые испытания на штатном импульсном генераторе с емкостным накопителем C_H = 120 мкФ (см. 3.1). Магнитные измерения проводились с помощью индуктивного датчика, снабженного RC-интегратором [8].

На рис.14а представлено распределение продольного магнитного поля в конусе магнита, а также (пунктиром) распределение поля, соответствующее представлению о сохранении магнитного потока в конической полости. Не

слишком заметное расхождение этих кривых свидетельствует о небольшом потоке рассеяния, что позволяет надеяться на приемлемую оптику этого магнита.

Более убедительное представление о качестве оптики магнита следует из распределения поперечного поля на оси магнита (рис.14б). Указанное на рисунке дипольное возмущение приводит к отклонению позитронного сгустка с энергией $E \approx 25$ МэВ приблизительно на 50 мрад, что вполне приемлемо и не приведет к заметной потере позитронов [5].

На рис.14в показано положение оптической оси магнита относительно его геометрической оси, что также свидетельствует о неплохой оптике этого импульсного сильнополевого магнита.

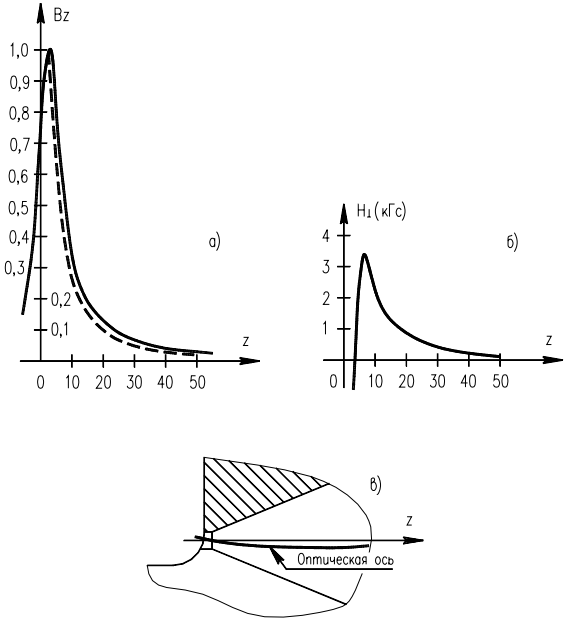


Рис. 14. Результаты магнитных измерений конверсионного магнита.

Требуемое максимальное значение магнитного поля B_m = 10 Тл достигается при значении максвеловского интеграла

$$\oint H\,dl = I_{2m} \approx 120 \text{ кА},$$

указанный режим соответствует напряжению на накопителе U_{cm} = 1.2 кВ.

В указанном режиме магнит проработал на стенде около 10^7 циклов без каких-либо повреждений или изменения его параметров, что свидетельствует об отсутствии проблем, связанных с механикой импульсного быстроциклического устройства.

Конверсионная мишень, помещенная в сильное импульсное магнитное поле, заметно нагревается, однако предусмотренное ее конструкцией охлаждение (см. 4.2) обеспечивает нагрев торца мишени не более чем на 100°С. Возмущение магнитного поля на торце такой «полупрозрачной» для импульсного магнитного поля мишени также оказалось незначительным. Величина импульсного поля снижается лишь на 2 ÷ 3% на расстоянии 1 мм от торца мишени.

5.2. Запуск позитронной системы на форинжекторе ВЭПП-5

Летом 2004 года на инжекционном комплексе ВЭПП-5 была смонтирована и запущена описываемая конверсионная система. Первый позитронный пучок был получен уже спустя несколько дней после начала пусковых работ. Позитронная система работала с частотой 1 ÷ 5 Гц на уровне импульсного магнитного поля до 7 Тл, что позволило получить некоторые первые предварительные результаты работы позитронного источника.

На рис.15 показана расчетная кривая зависимости числа частиц в позитронном сгустке после ускорения до 75 МэВ, здесь же показаны и первые предварительные результаты [14].

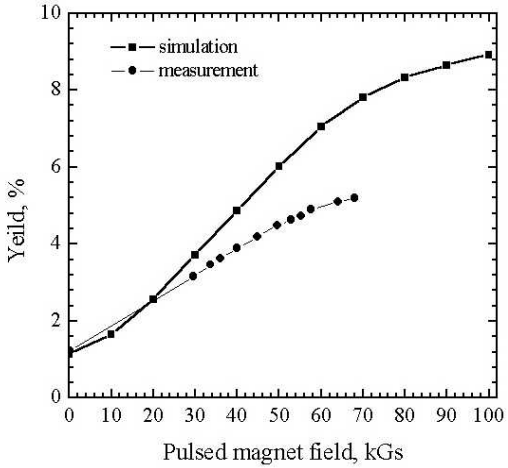


Рис. 15. Расчетная и экспериментальная зависимости числа ускоренных позитронов от величины импульсного магнитного поля.

При погружении торца конверсионной мишени в сильное импульсное магнитное поле можно ожидать некоторого увеличения коэффициента конверсии [7]. На рис.16 показаны первые предварительные экспериментальные результаты зависимости числа частиц в ускоренном до 50 МэВ позитронном сгустке от положения мишени. Координата Z = 0 соответствует расположению торца мишени в плоскости лицевой части магнита, а Z = 2.5 мм – максимуму магнитного поля (рис.14).

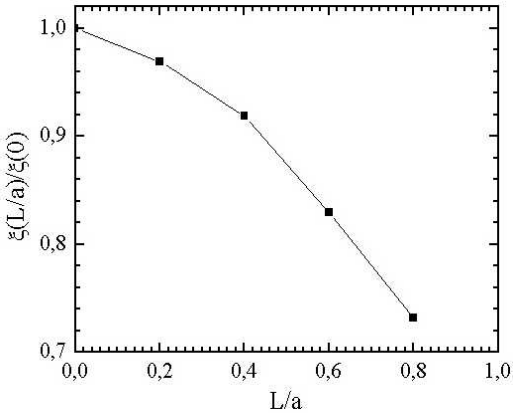


Рис. 16. Зависимость числа ускоренных позитронов от положения мишени.

Заключение

Результаты проделанной работы свидетельствуют о правильности основных исходных представлений в отношении принципов построения разработанной конверсионной системы, в первую очередь ее ключевых элементов – мишени и согласующего магнита. Первые экспериментальные результаты части важнейшего параметра любого конвертора – эффективности захвата позитронов, тем не менее, ниже расчетного значения. На рис.15 приведены расчетная зависимость эффективности захвата и экспериментальная как функции максимального поля согласующего магнита. В принципе, принятого соотношения частот позитронного и электронного цикла работа инжекционного комплекса (49:1) вполне достаточно для обеспечения необходимого количества ускоренных позитронов $5 \cdot 10^{10}$.

Мало того, максимальная достигнутая на сегодняшний день эффективность захвата составляет 0.18/ГэВ на один электрон, что является рекордной величиной (например, данный показатель для позитронного источника SLAC составляет 0.08/ГэВ).

Однако, несмотря на это, желательно хотя бы попытаться разобраться в возможных причинах выявленного расхождения в эффективностях расчетного и экспериментально измеренного захвата.

Возможные причины расхождения

1. Наиболее понятной и естественной возможной причиной выявленного расхождения могут быть чисто геометрические факторы. В первую очередь – это неточности выставки элементов, неточности наведения

первичного электронного пучка на конверсионную мишень и параметров самого сгустка, т.е. несоответствие реальных размеров сгустка – расчетным.

2. Наиболее вероятной причиной указанного расхождения, возможно, является неидеальность топологии магнитного поля, в первую очередь здесь подразумевается kick-эффект и наличие B_x и B_y составляющих магнитного поля на оси сопровождающего соленоида (рис.3). Попытки учесть влияние указанных дефектов магнитного поля не объясняют в полной мере выявленного расхождения, что может свидетельствовать о возможном комплексном негативном влиянии ряда различных факторов. Например, следует отметить, что kick-эффект и перпендикулярные составляющие магнитного поля сопровождения действуют совместно и целесообразно повторить пучковые эксперименты с повернутым на 180° конверсионном магните, что не представляет больших технических трудностей. При указанном новом положении магнита его kick-эффект и влияние перпендикулярных составляющих магнитного поля будут частично скомпенсированы.

3. Не исключено и негативное влияние геометрического форм-фактора мишени. Моделирование процессов рождения позитронов обычно проводится в предположении плоской мишени с достаточно большим ее поперечным размером. Если поперечный размер мишени сравним с поперечным размером каскадного ливня, то можно ожидать уменьшения выхода позитронов. В нашем случае малый диаметр конической мишени сравним с поперечным размером ливня на выходе конверсионной мишени, что может негативно сказываться на интенсивности ливня в области торца мишени. Было бы интересно сравнить результаты испытаний конической мишени и мишени с увеличенным поперечным размером. Разумеется, такие испытания требуют установку мишеней перед конверсионным магнитом в области поля порядка 0.5 от его максимального значения.

Возможные пути совершенствования конвертора форинжектора

Как уже отмечалось, достигнутой эффективности позитронного захвата вполне достаточно для получения необходимого числа частиц, тем не менее, целесообразно рассмотреть некоторые возможные пути совершенствования действующей конверсионной системы.

1. Необходимо завершить изготовление более жесткой в механическом отношении обмотки импульсного магнита, что позволит проводить пучковые эксперименты вплоть до максимального значения импульсного магнитного поля 10 Тл.

2. В принципе, можно попытаться улучшить оптические характеристики конверсионного магнита путем оптимизации геометрии его сильнополевой части, однако такая работа дорога и не актуальна для нашей задачи, поскольку оптика штатного магнита вполне приемлема.

3. Планируется завершить разработку и изготовление более мощного и более совершенного питающего импульсного генератора, обеспечивающего плавное регулирование выходных параметров в пределах от нуля до максимальных значений. Источник питания и зарядные цепи накопителя этого генератора размещаются в коструктиве “Вишня ” вдвое меньшего размера чем существующий.

4. В дальнейшем предполагается провести пучковые испытания конверсионного магнита нового типа [6], способного работать также с плоской мишенью. Указанное преимущество нового магнита не является актуальным для нашей задачи, однако результаты таких испытаний будут несомненно важны для построения конверсионных систем в других исследовательских центрах, работающих с более интенсивными первичными электронными пучками.

5. После проведения изложенных выше экспериментов, их результаты, несомненно, укажут некоторые дополнительные пути возможного совершенствования описанной электрон-позитронной конверсионной системы.

Литература

1. *Р.М. Лапик, А.А. Кулаков, П.В. Мартышкин*. Разработка конверсионной системы на основе численного метода, Препринт 99-60, ИЯФ, Новосибирск, 1999.
2. *А.А. Кулаков, П.В. Мартышкин*. Разработка позитронного источника на основе линейных ускорителей, Препринт 99-26, ИЯФ, Новосибирск, 1999.
3. *Р.М. Лапик, А.А. Кулаков, П.В. Мартышкин*. Расчет и измерения прототипа импульсного магнита конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5, Препринт 99-59, ИЯФ, Новосибирск, 999.
4. *R.M. Lapik, P.V. Martyshkin*. Impulse magnet of positron source with adiabatic field decreasing. Particle Acceleration, v.3, 2170.
5. *R. Lapik, P. Martyshkin*. Capture Efficiency of High Field Flux Concentrator. PAC-2001, 2001.
6. *Р.М. Лапик, П.В. Мартышкин, А.М. Якутин.* Некоторые вопросы разработки сильнополевых импульсных магнитов, Препринт 2004-73, ИЯФ, Новосибирск, 2004.
7. *П.В. Мартышкин*. Разработка конверсионной системы инжекционного комплекса ВЭПП-5, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИЯФ, Новосибирск, 2000.

8. *Г. Кнопфель*. Сверхсильные импульсные магнитные поля. «Мир», Москва, 1972.
9. *Д. Паркинсон, Б. Малхолл*. Получение сильных магнитных полей. «Атомиздат», Москва, 1971.
10. В.П. Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей. «Наука», Москва, 1964.
11. *A. Kulikov, S. Encklund, E. Reuter*. SLC positron source pulsed flux concentrator. SLAC-PUB-5473, 1991.
12. *Брехна, Хилл, Бейли*. Импульсный магнит на 150кЭ с концентратором потока и охлаждением жидким азотом. ПНИ, 1965, №11, 3.
13. *Уилсон, Сривастава*. Конструкция эффективных концентраторов потока для получения больших импульсных магнитных полей. ПНИ, 1965, N8, 3.
14. *М.С. Авилов, А.В. Акимов и др*. Инжекционный комплекс ВЭПП-5, состояние работ. RUPAC-2004, Дубна, 2004.
15. *G. Stange*. A pulsed magnet lens for positron focusing numerical calculation and first measurement with prototype. DESY S1-73/1, 1973.
16. *R. Chehab, G. Meur, B. Monton, M. Renard*. An adiabatic matching device for the ORSAY linear positron accelerator. LAL/RT/83-03, 1983.
17. *S. Encklud*. Positron linear colladers. SLAC-PUB-4484, 1987.
18. *V. Anosov, M. Billing, P. Kaltchev, and et al*. Electron-positron high efficiency converter. Dubna, E9-95-403, 1995.
19. *В. Таюрский*. Расчет конверсии электронов в позитроны при энергии 0.2-2ГэВ. ИЯФ СОАН СССР. 76-36, 1976.
20. *R. Helm*. Adiabatic approximation for dynamics of particle in the field tapered solenoid. SLAC-4, 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ КОНВЕРСИОННЫХ СИСТЕМ 4

2.1. Принципы построения конверсионных систем.....5

2.2. Тип согласующего устройства и положение конвертора.....6

2.3. Конверсионная система форинжектора 8

2. ИМПУЛЬСНЫЙ КОНВЕРСИОННЫЙ МАГНИТ.....10

2.1. Проблемы разработки конверсионного магнита.....10

2.2 Возможные варианты построения требуемого магнита.....14

2.3. Выбор и обоснование принятого варианта магнита. 15

2.4. Прототип конверсионного магнита.....17

2.5. Рабочий вариант конверсионного магнита.....19

3. СИСТЕМА ПИТАНИЯ КОНВЕРСИОННОГО МАГНИТА.....20

3.1. Импульсный генератор.....21

3.2. Простейшие зарядные устройства емкостного накопителя энергии.22

3.3. Устройства с управляемым зарядным циклом. 244

4. КОНВЕРСИОННАЯ МИШЕНЬ. 255

4.1. Энергетика и механика мишени 25

4.2. Конструкция мишени. 266

4.3. Система «by-pass».....27

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. 277

5.1. Стендовые испытания позитронной системы. 277

5.2. Запуск позитронной системы на форинжекторе ВЭПП-5.....29

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 300

ЛИТЕРАТУРЫ.....322

Р.М. Лапик, П.В. Мартышкин, С.В. Шиянков, А.М. Якутин

Система электрон-позитронной конверсии инжекционного комплекса ВЭПП-5

R.M. Lapik, P.V. Martyshkin, S.V. Shiyankov, A.M. Yakutin

Electron-positron conversion system of forinjector complex VEPP-5

ИЯФ 2005-50

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 5.12.2005

Сдано в набор 6.12.2005
Подписано в печать 7.12.2005
Формат 60x90 1/16 Объем 2.1 печ.л., 1.7 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 50

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