

*На правах рукописи*

**БОНДАРЕНКО Алексей Владимирович**

**МЕТОД ВЫПУСКА ПУЧКА ИЗ СИНХРОТРОНА  
С ПОМОЩЬЮ МНОГОСЛОЙНОГО  
МЕДНО-ЖЕЛЕЗНОГО ЭКРАНА**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2010**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

**МИГИНСКИЙ** – доктор физико-математических наук,  
Сергей Владимирович Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**КОРЧУГАНОВ** – доктор физико-математических наук,  
Владимир Николаевич Российский научный центр «Курчатовский институт», г. Москва.

**ПЕСТРИКОВ** – доктор физико-математических наук,  
Дмитрий Васильевич Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

**ВЕДУЩАЯ** – Учреждение Российской академии наук Институт физических проблем  
**ОРГАНИЗАЦИЯ:** им. П.Л. Капицы РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.  
в « \_\_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03  
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор  
физ.-мат. наук

А. А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации**

Задача вывода пучка из циклического ускорителя появилась в 1931 году вместе с первым ускорителем такого типа – циклотроном. С тех пор возникло множество видов циклических ускорителей и, соответственно, различных схем и способов вывода пучка из них.

В современных синхротронах используют один из двух следующих способов: либо производят медленный выпуск на резонансах 3-го или 4-го порядка, либо осуществляется однооборотная экстракция с использованием кикера и септум-магнита. Физическая идея септума состоит в создании сильного магнитного поля, отделенного от орбиты синхротрона стенкой – “ножом септума”. Кикер – это быстрый магнит, который изменяет положение траектории пучка относительно ножа септума за время, меньшее, чем период оборота частиц в ускорителе. При включенном кикере пучок отклоняется магнитным полем в септуме и уходит в экстракционный канал. Поля кикера, как правило, недостаточно, чтобы сообщить пучку значительное отклонение, а размещение септума около равновесной орбиты синхротрона приводит к уменьшению апертуры ускорителя. Поэтому перед экстракцией орбиту приближают к ножу септума несколькими импульсными диполями. Существует два типа септум-магнитов. Первый тип – это импульсные септумы, в них нож септума состоит из проводника, магнитное поле параллельно ножу и экранирование поля ножом происходит за счет скин-эффекта. Основным недостатком таких септумов является большая потребляемая мощность и необходимость размещения импульсного септума внутри вакуумной камеры. Септумы второго типа называются септумами Ламбертсона, в них магнитное поле направлено перпендикулярно ножу септума, который состоит из ферромагнетика. К недостаткам септума Ламбертсона можно отнести вес необходимого магнитопровода и сравнительно большие размеры всей экстракционной системы.

В данной работе предлагается и обсуждается новая однооборотная схема выпуска пучка из синхротрона с использованием многослойных медно-железных экранов вместо септум-магнита. Экраны размещаются в двух центральных диполях импульсного байпаса. Такая схема выпуска технически проще и компактнее общепринятой схемы.

### **Цель работы и задачи**

Цель работы – разработка схемы выпуска пучка из циклического ускорителя с помощью магнитного экрана, анализ и минимизация влияния системы экстракции на циркулирующий пучок. Основной эффект, вызываемый влиянием экстракционного байпаса, – это уменьшение эффективности выпуска за счет возмущения поля в зазоре магнитов байпаса магнитным экраном и вакуумными камерами.

### **Методы исследования**

Для численного расчета возмущения поля магнитным экраном применялся метод конечных элементов. Для аналитических оценок использовалась модель одномерного проникновения поля в стенки экрана. Магнитные измерения возмущения поля осуществлялись измерительной катушкой. Возмущение поля вакуумными камерами рассчитывалось с помощью метода изображений. Для расчета эффективности выпуска использовалось численное решение уравнений движения частиц.

### **На защиту выносятся следующие положения**

1. Предложена новая схема выпуска пучка из синхротрона с использованием многослойного медно-железного экрана. К преимуществам схемы относятся техническая простота.
2. С помощью численного моделирования, а также аналитически на одномерной модели, было показано, что скорость проникновения магнитного потока в стенки многослойного медно-железного экрана постоянна при постоянной скорости увеличения внешнего поля. Подобрав эту скорость, можно минимизировать возмущение поля, создаваемое многослойным медно-железным экраном.
3. Создан прототип круглого трубчатого многослойного экрана и проведены расчеты и измерения возмущения поля таким экраном. Измерения подтверждают правильность методов, использованных для расчетов возмущения поля.
4. Проведенные расчеты возмущения поля многослойным медно-железным экраном в диполях экстракционного байпаса и полученные оценки влияния этого возмущения на динамику пучка в циклическом ускорителе подтверждают возможность использования такой схемы для выпуска пучка из синхротрона.

### **Научная новизна работы**

Показана возможность минимизации возмущения поля многослойным медно-железным экраном при оптимальном выборе скорости увеличения внешнего поля. Рассмотрена возможность использования этого эффекта для выпуска пучка из циклического ускорителя. Предложена новая схема выпуска пучка из синхротрона.

### **Научная и практическая ценность работы**

Схема экстракции пучка из циклического ускорителя через многослойный медно-железный экран технически более проста, чем общепринятый способ с использованием септум-магнита. Данная схема актуальна для выпуска пучка из ускорителей, в которых нет больших технических промежутков (например, бустер), так как она более компактна.

## Апробация диссертации

Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на следующих научных конференциях:

XXI Russian Conference on Charged Particle Accelerators **RuPAC 2008**, Zvenigorod, Russia, 28 Sep - 14 Oct, 2008.

XVII International Synchrotron Radiation Conference **SR-2008**, Novosibirsk, Russia, 15-20 June 2008.

XXI International Workshop on Charged Particle Accelerators **IWCPA-2009**, Alushta, Ukraine, 6-12 September 2009.

## Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы предмет, цели и задачи исследования.

**Глава 1** носит вводный характер, в ней рассмотрены различные способы вывода пучка из циклических ускорителей. Подробно описана однооборотная экстракция с использованием кикера и септума.

**В главе 2** описана схема выпуска пучка с помощью многослойного медно-железного экрана. В ускорителе устанавливается импульсный байпас, состоящий из четырёх одинаковых дипольных магнитов, с магнитными экранами в двух средних диполях. В качестве магнитных экранов предлагается использовать многослойную трубку из чередующихся слоёв ферромагнетика и проводника (например, железа и меди). При включении магнитов орбита пучка подводится к магнитному экрану. После приближения орбиты к экрану на необходимое расстояние включается кикер, который отклоняет траекторию пучка внутрь магнитных экранов второго и третьего магнитов. При этом, пучок в байпасе отклоняется только крайними диполями, а поля двух средних экранированы. Поэтому частицы уходят в перепускной канал (рис.1).

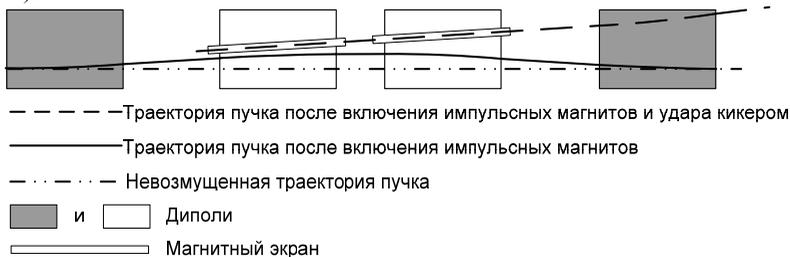


Рис. 1. Схема выпуска пучка из синхротрона с помощью магнитного экрана.

Одной из проблем при выпуске пучка из циклического ускорителя является возмущения поля на подводимой орбите. Поэтому чтобы данная схема была работоспособна, необходим экран импульсного магнитного поля, который не искажает магнитное поле вокруг себя. Именно поэтому в качестве магнитного экрана и предлагается использовать многослойный медно-железный экран.

Рассмотрим процесс экранирования магнитного поля таким экраном. Для слоистых сред допустимо использование средних значений магнитной проницаемости  $\langle \mu \rangle$  и проводимости  $\langle \sigma \rangle$  при рассмотрении экранирования магнитного поля:

$$\begin{aligned}\langle \sigma \rangle_{\parallel} &= \frac{\sum h_i \sigma_i}{\sum h_i} \approx \frac{h_{Cu} \sigma_{Cu}}{\sum h_i}, \\ \langle \mu \rangle_{\parallel} &= \frac{\sum h_i \mu_i}{\sum h_i} \approx \frac{h_{Fe} \mu_{Fe}}{\sum h_i}, \\ \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle_{\perp} &= \frac{\sum h_i \frac{1}{\mu_i}}{\sum h_i}, \quad \langle \mu \rangle_{\perp} \approx \frac{\sum h_i}{\sum h_i - h_{Fe}} \approx 2,\end{aligned}\tag{1}$$

где индексы  $\parallel$  и  $\perp$  обозначают значения вдоль и поперек слоев,  $h_{Cu, Fe}$  – толщина медных и железных слоёв.

Основное уравнение, описывающее экранирование магнитного поля следующее:

$$\text{rot}(\langle \mu \rangle^{-1} \text{rot} A) = -\langle \sigma \rangle \mu_0 \frac{\partial A}{\partial t},\tag{2}$$

где  $t$  – время,  $A$  – векторный потенциал,  $\mu$  – тензор магнитной проницаемости.

Из уравнения (2) следуют две формулы масштабирования с коэффициентами масштабирования  $\alpha$  и  $\beta$ .

$$\begin{aligned}\vec{r} &\rightarrow \alpha \vec{r} \quad A \rightarrow \alpha A \quad t \rightarrow \alpha^2 t; \\ \langle \sigma \rangle &\rightarrow \beta \langle \sigma \rangle \quad t \rightarrow \beta t.\end{aligned}\tag{3}$$

Первая формула – это подобие распределения возмущения поля для экранов разного размера. Из второй следует, что изменение средней проводимости экрана эквивалентно изменению скорости увеличения внешнего поля.

Так как толщина стенок рассматриваемых экранов значительно меньше их размеров, то оценку проникновения магнитного поля в стенки экрана можно сделать в одномерном приближении. На рисунке 2 изображены распределения магнитной индукции  $B$ , электрического поля  $E$ , плотность электрического тока  $j$ , и магнитного поля  $H$  в стенке многослойного медно-железного экрана.

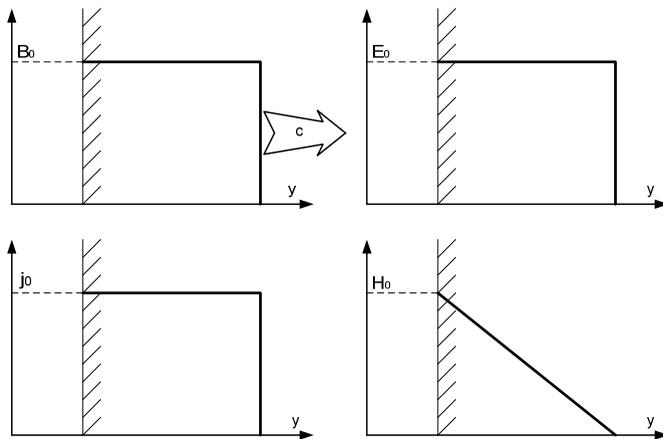


Рис. 2. Распределение  $B$ ,  $E$ ,  $j$ ,  $H$  в стенках многослойного медно-железного экрана.

Величина магнитной индукции в стенках экрана  $B_0$  равна среднему магнитному потоку в области, занятой полем, и определяется полем насыщения ферромагнетика. Пусть скорость движения фронта магнитного поля  $c$ , тогда величина электрического поля в стенке экрана следующая:

$$E_0 = cB_0. \quad (4)$$

Плотность электрического тока определяется электрическим полем и средней проводимостью:

$$j_0 = E_0 \langle \sigma \rangle = c \langle \sigma \rangle B_0. \quad (5)$$

Соответственно распределение магнитного поля в стенке экрана линейно, а на границе фронта величина поля равна нулю. Поэтому поле на поверхность экрана  $H_0$  следующее:

$$H_0 = j_0 ct = c^2 \langle \sigma \rangle B_0 t. \quad (6)$$

С другой стороны,  $H_0$  определяется внешним полем:

$$H_0 = \frac{\alpha t}{\mu_0}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – скорость увеличения магнитной индукции снаружи экрана.

Приравняв (6) и (7) получаем выражения для  $c$ :

$$c = \sqrt{\frac{\alpha}{\mu_0 \langle \sigma \rangle B_0}}. \quad (8)$$

То есть, в случае постоянной скорости увеличения внешнего поля скорость движения магнитного фронта в стенках экрана постоянна, соответственно постоянна и скорость проникновения магнитного потока в стенки

экрана. Этот результат подтверждается результатами численного моделирования (рис. 3).

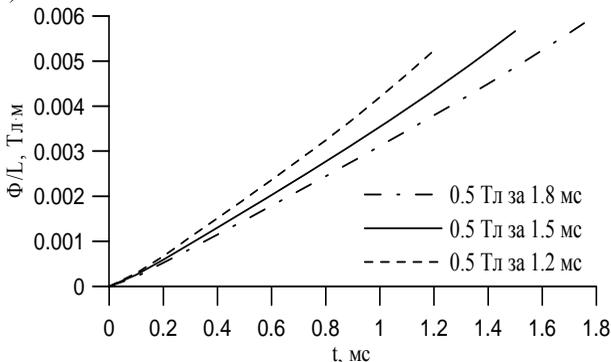


Рис. 3. Поток, проходящий через стенки круглого многослойного медно-железного экрана, в зависимости от времени и скорости роста внешнего магнитного поля. Наружный радиус 12.5 мм, внутренний 8 мм.

Таким образом, можно подобрать скорость увеличения внешнего поля так, что поток, проходящий через стенки экрана, будет равен потоку, который бы проходил через область занятую экраном в невозмущенном состоянии поля. В таком случае возмущения поля экраном будут минимально.

Для точного расчета величины остаточного возмущения поля многослойным медно-железным экраном проводилось численное моделирование. На рисунке 4 представлены результаты расчета для возмущения поля эллиптическим экраном в оптимальном случае.

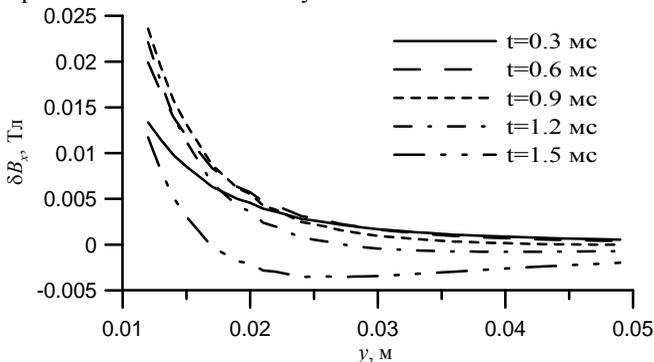


Рис. 4. Возмущения поля эллиптическим экраном при скорости увеличения внешнего поля 0.5 Тл за 1.5 мс, внутренние полуоси 6 мм и 12 мм, наружные 11 мм и 17 мм.

В главе 3 описаны измерения возмущения поля многослойным медно-железным экраном. Для проведения измерений был изготовлен следующий экран: наружный радиус 9.5 мм, внутренний 6 мм, толщина медных слоёв 0.1 мм, толщина железных слоёв 0.08 мм, всего 12 слоёв меди и 12 железа, длина экрана 200 мм.

Экран был размещен в импульсном дипольном магните с апертурой 40 на 40, длиной железа 100 и магнитной длиной 123 мм. Ось экрана была расположена параллельно оси магнита посередине между полюсами. Расстояние от оси магнитного экран до оси дипольного магнита было 5.5 мм (рис. 5).

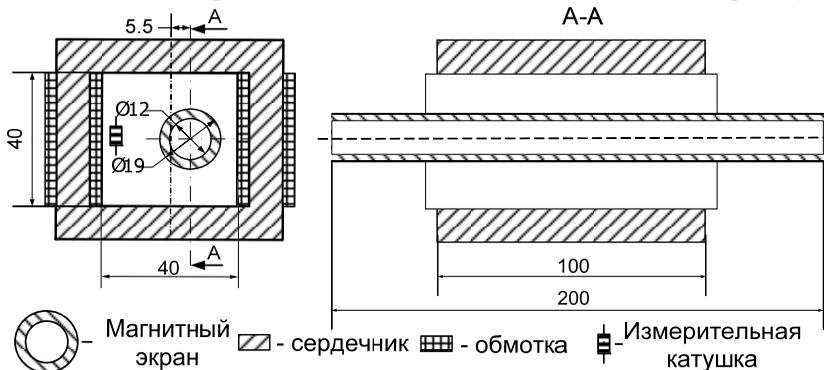


Рис. 5. Схема магнита с установленным магнитным экраном.

На дипольный магнит подавался сигнал с импульсного генератора. Точковый импульс, поданный на магнит, измерялся внутренним датчиком контроля тока генератора (пояс Роговского) и датчиком тока ACS754SCB-200. Сигнал с датчиков измерялся цифровым осциллографом. Измерения магнитного поля в диполе проводились с помощью измерительной катушки, сигнал с которой интегрировался интегрирующим вольтметром.

Сначала были проведены измерения оптимальной скорости увеличения поля. Для этого на диполь подавался синусоидальный импульс со временем нарастания 0.9 мс. Первые 0.45 мс импульса скорость увеличения поля в магните можно считать постоянной (отличие этой части синусоиды от прямой составляет около 3%), поэтому измерения возмущения поля магнитным экраном проводились в этой области. При этих измерениях катушка располагалась вплотную к магнитному экрану, так как на поверхности экрана возмущение поля максимально. Ось катушки была расположена на расстоянии радиуса катушки равного 2.5 мм от поверхности экрана. Такие же измерения проводились без магнитного экрана при том же положении катушки. Разница результатов измерений есть возмущение поля магнитным экраном. Были проведены измерения возмущения поля в зависимости от амплитуды сигнала поданного на магнит и от времени с начала импульса.

Рассмотрим зависимость величины максимума возмущения поля по времени от поля в магните в момент времени 0.45 мс с начала импульса (рис. 6).

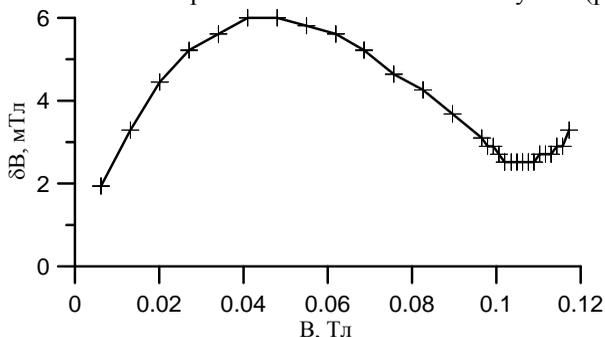


Рис. 6. Максимальное по времени возмущение поля  $\delta B$  в зависимости от  $B$  – поля в диполе в момент времени 0.45 мс с начала импульса.

Минимум возмущения поля составляет 2.5 мТл и наблюдается при увеличении поля до 0.108 Тл за 0.45 мс. Эта скорость увеличения поля и считалась оптимальной для данного экрана. При ней были проведены измерения распределения возмущения поля в зависимости от расстояния до центра экрана и времени с начала импульса.

При измерении величины возмущения поля экраном ось катушки ориентировалась по полю магнита. При оптимальной скорости увеличения внешнего поля возмущение поля около магнитного экрана порядка 2.5% от поля в диполе. Стабильность генератора, подающего импульсы на дипольный магнит около 0.1%. Для определения возмущения поля проводились измерения с магнитным экраном и без него. Соответственно точность измерений возмущения поля составила около 8%. Результаты измерений возмущения поля магнитным экраном представлены на рисунке 7.

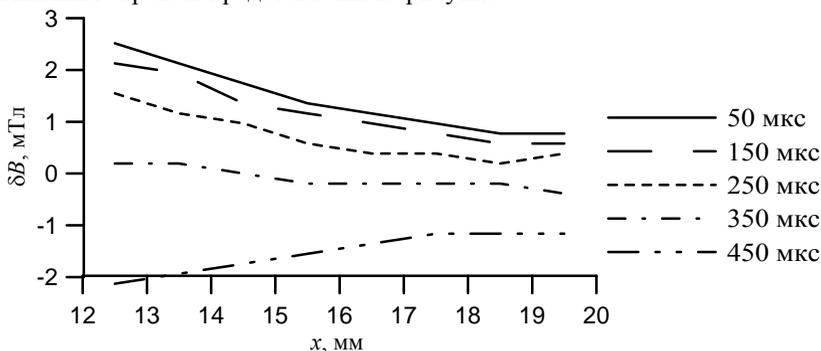


Рис. 7. Возмущения поля  $\delta B$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $x$  и времени с начала импульса (центр диполя).

Для проведения численных расчетов возмущения поля нашим экраном необходимо знать кривую магнитной проницаемости железной ленты, из которой изготавливался экран. Для её измерения из железной ленты было сделано два кольцевых сердечника и проведены две серии измерений с использованием двух импульсных генераторов. Первая серия измерений при  $B < 1.1$  Тл, вторая в диапазоне  $2.3 \text{ Тл} < B < 2.9 \text{ Тл}$ . На рисунке 8 показана кривая магнитной проницаемости, восстановленная из результатов обоих измерений.

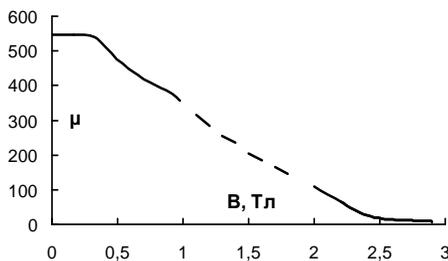


Рис. 8. Измеренная кривая магнитной проницаемости железной ленты

Используя полученную зависимость  $\mu(B)$ , с помощью программы COMSOL 3.2 был промоделирован описанный выше магнитный экран. Неизмеренная часть кривой магнитной проницаемости при  $1.1 \text{ Тл} > B > 2.3 \text{ Тл}$  интерполировалась линейным образом. Удельное сопротивление меди в расчетах бралась равной  $1.8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, железа  $5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м. Были проведены расчеты при разных амплитудах внешнего поля. В случае увеличения внешнего поля до  $0.108 \text{ Тл}$  за  $450 \text{ мкс}$  распределение возмущения поля совпадает с результатами измерений (рис. 9).

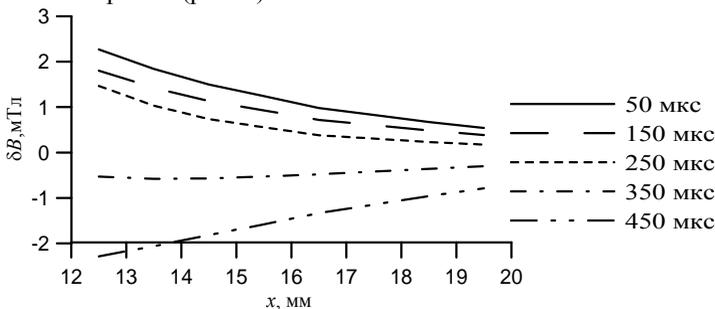


Рис. 9. Результат численных расчетов возмущения поля в центре магнита  $\delta B$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $x$  и времени с начала импульса при оптимальной скорости увеличения поля в диполе.

Из рисунков 7 и 9 видно что, измеренная и рассчитанная оптимальные скорости увеличения поля не отличаются. Величина и форма возмущения совпадает с расчетами.

В главе 4 описан проект вертикальной экстракционной системы на энергии 2.2 ГэВ с помощью магнитного экрана для бустера нового источника СИ в Новосибирске. Импульсный байпас, который планируется использовать, изображен на рисунке 10. На расстоянии 4 м от начала экстракционного байпаса на орбите бустера расположена квадрупольная линза. Чтобы обойти ее, выпущенный пучок в этом месте должен отклониться от основной орбиты бустера на 200 мм. Угол отклонения пучка в диполях байпаса в момент выпуска, обеспечивающий обход линзы, составляет  $2.1^\circ$ . Это соответствует полю в момент экстракции 0.45 Тл. Для питания байпаса необходим импульсный генератор с энергозапасом 8.5 кДж и пиковой мощностью 4.4 МВт.



Рис. 10. Байпас с магнитными экранами.

Кикер аналогичен изготовленному в ИЯФ для ЛСЭ в Университете Дюка в 2005 году, он представляет собой симметричную полосковую линию. Разность потенциалов между пластинами кикера составляет 50 кВ. Расстояние между пластинами кикера выбрано равным 27 мм, что соответствует апертуре бустера в месте расположения кикера. Длина кикера составляет 1 м. При включении кикера пучок получает угловое отклонение  $0.1^\circ$ , что обеспечивает отклонения пучка в экстракционном байпасе на 20 мм.

Размер магнитного экрана выбирался из следующих соображений. Во-первых, внутренний размер должен обеспечивать прохождение пучка через экран в момент экстракции без потерь частиц. Во-вторых, внешний размер определяет величину возмущения поля магнитным экраном. Эта величина должна быть достаточно малой и не приводить к потерям значительной доли частиц при экстракции. В-третьих, толщина стенок экрана должна обеспечивать экранирование магнитного поля внутри экрана. Расчеты на программе COMSOL 3.2 и анализ влияния возмущения поля на циркулирующий пучок показали, что вариантом, удовлетворяющим этим трём требованиям, является следующий эллиптический магнитный экран. Размер внутренних полуосей 7 мм и 13 мм, толщина стенок 4 мм, соответственно размер внешних полуосей 11 мм и 17 мм. Оптимальная скорость увеличения поля для такого экрана 0.45 Тл за 1.5 мс. Зависимость возмущения поля таким экраном от времени и расстояния до оси представлена на рисунке 11.

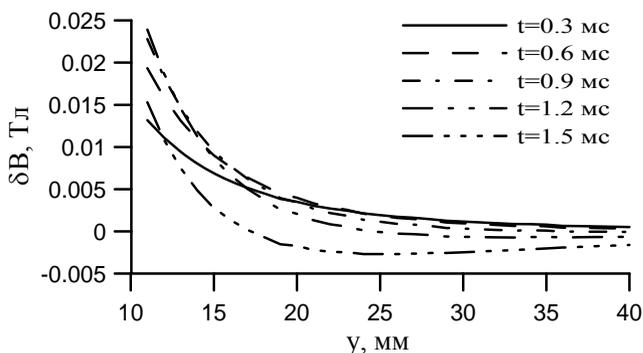


Рис. 11. Возмущение поля многослойным магнитным экраном  $\delta B$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $y$  и времени  $t$ .

Кроме магнитного экрана источником возмущения поля в экстракционном импульсном байпассе также являются вакуумные камеры. Чтобы минимизировать это возмущение, необходимо использовать круглые вакуумные камеры, так как такие камеры способны выдержать большее внешнее давление и, следовательно, их можно сделать тоньше. Еще одним преимуществом цилиндрических вакуумных камер является то, что возмущение поля внутри таких камер в однородном поле однородно, мультипольный член появляется только за счет изображений камеры в полюсах и стенках магнитопровода. Был проведенный расчет возмущения поля цилиндрическими вакуумными камерами, их влияние на циркулирующий пучок мало.

Распределение возмущения поля около магнитного экрана (рис. 11) использовалось для расчета дополнительного угла –  $K_0$ , дополнительной фокусировки –  $K_1$ , величины дополнительного секступоля –  $K_2$ . В таблице 1 представлены их максимальные значения для экстракционного байпасса с магнитным экраном (ЭБ) и для сравнения эти же данные для системы выпуска из бустера в Duke University (DU) и в Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL).

Таблица 1. Сравнение влияния экстракционных систем на циркулирующий пучок для различных систем выпуска.  $E$  – энергия экстракции.

|      | $E$ , ГэВ | $K_0$ , мрад | $K_1$ , $m^{-1}$ | $K_2$ , $m^{-2}$ |
|------|-----------|--------------|------------------|------------------|
| ЭБ   | 2.2       | 0.3          | 0.01             | 5                |
| DU   | 1.2       | 0            | 0.02             | 4                |
| SSRL | 3.5       | 0.2          | 0.005            | ?                |

Оценим влияние  $K_0$ ,  $K_1$  и  $K_2$  на циркулирующий пучок.  $K_0$  приводит к смещению орбиты вблизи целого резонанса. Если вертикальное отклонение траектории пучка от проектной орбиты –  $\Delta y$  превышает 7 мм, то весь пучок или значительная его часть столкнется с магнитным экраном. Вертикальная

бета-функция в экстракционном байпасе  $\beta_y=20$  м. Оценим «полуширину» целого резонанса  $\Delta\mu_1$ :

$$\Delta\mu_1 = 2 \arctg\left(\frac{K_0 \cdot \beta_y}{2\Delta y}\right) = 2 \arctg\left(\frac{0.3 \cdot 10^{-3} \cdot 20\text{м}}{2 \cdot 7\text{мм}}\right) \approx 0.13 \cdot 2\pi. \quad (9)$$

Основной эффект от дополнительной фокусировки  $K_1$  – это изменение частот бетатронных колебаний. Сдвиг частот  $\Delta Q_{x,y}$  составляет:

$$\Delta Q_y = -\frac{\beta_y K_1}{4\pi} = -\frac{20\text{м} \cdot 0.01\text{м}^{-1}}{4\pi} \approx -0.015, \quad (10)$$

$$\Delta Q_x = \frac{\beta_x K_1}{4\pi} = \frac{10\text{м} \cdot 0.01\text{м}^{-1}}{4\pi} \approx 0.008. \quad (11)$$

Влияние  $K_2$  приведет к следующим резонансам третьего порядка:

$$\begin{aligned} 3\mu_y &= 2\pi n, \\ 2\mu_x \pm \mu_y &= 2\pi n. \end{aligned} \quad (12)$$

Оценим ширину первого резонанса  $\Delta\mu_{1/3}$ . Для этого рассмотрим случай вертикального движения вблизи резонанса  $1/3$ . Вычислим  $A_{1/3}$  такое расстояние до орбиты ускорителя, что бетатронные колебания всех частиц с меньшей амплитудой устойчивы

$$A_{1/3} = \frac{4}{K_2 \beta_y} \cdot \left| \frac{\mu_y}{2\pi} - \frac{1}{3} \right|. \quad (13)$$

Существенная часть пучка будет потеряна в случае близости бетатронных частот к резонансу, если  $A_{1/3}$  будет равна вертикальному размеру пучка –  $\sigma_y \approx 0.4$  мм. Из (13) выразим «полуширину» резонанса  $1/3$ :

$$\Delta\mu_{1/3} = 2\pi \cdot \frac{\sigma_y K_2 \beta_y}{4} \approx 2\pi \cdot \frac{0.4\text{мм} \cdot 5\text{м}^{-2} \cdot 20\text{м}}{4} \approx 0.025 \cdot 2\pi. \quad (14)$$

Для точного расчета влияния возмущения поля в экстракционном байпасе на динамику частиц в бустере была написана программа на C++ в Microsoft Visual Studio .NET 2003. Возмущение поля считалось сосредоточенным, то есть при каждом пролёте через байпас частица просто получает нелинейный по координатам  $x, y$  толчок ( $\Delta x', \Delta y'$ ), не зависящий от углов  $x'$  и  $y'$ . Оптика бустера при расчетах считалась линейной. Рассмотрим, как преобразуются координаты частицы в ускорителе за один оборот с учетом воздействия магнитных экранов в байпасе.

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n \cos \mu_x + x'_n \beta_x \sin \mu_x, \\ y_{n+1} &= y_n \cos \mu_y + y'_n \beta_y \sin \mu_y, \\ x'_{n+1} &= -x_n \sin \mu_x / \beta_x + x'_n \cos \mu_x + \Delta x'(x_{n+1}, y_{n+1}), \\ y'_{n+1} &= -y_n \sin \mu_y / \beta_y + y'_n \cos \mu_y + \Delta y'(x_{n+1}, y_{n+1}), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $x, x'$  – горизонтальные координата и угол частицы после пролета байпаса,  $y, y'$  – соответственно вертикальные, индексы  $n$  и  $n+1$  обозначают номер оборота.

Из-за симметрии возмущения поля относительно оси  $Oy$ , функция  $\Delta x'$  является нечетной по  $x$ , а функция  $\Delta y'$  четной. Поэтому изменение знака начальных координат и углов  $x_0, x'_0$  приведет только к замене знака всех последующих  $x_n, x'_n$ . Следовательно, трекинг можно проводить только для половины частиц пучка (например, только для частиц с  $x_0 > 0$ ). Также при замене  $\mu_x$  на  $\mu_x + \pi$  в выражении (15) изменятся знаки  $x_{n+1}, x'_{n+1}$  а, значения  $y_{n+1}, y'_{n+1}$  останутся теми же. Поэтому динамика частицы при  $x$ -бетатронной фазе равной  $\mu_x$  будет отличаться от динамика частицы при  $x$ -бетатронной фазе равной  $\mu_x + \pi$  только знаками  $x_{n+1}, x'_{n+1}$  через оборот, эффективность выпуска при этом не изменится. Следовательно, трекинг можно проводить только в диапазоне  $\mu_x$  от 0 до  $\pi$ .

Расчет проводился методом макрочастиц. Каждой макрочастице ставился в соответствие её вес. Он соответствует доле частиц пучка находящихся в окрестности нашей макрочастицы. Вес частиц считался пропорциональным начальному распределению. В качестве начального распределения частиц бралось гауссовское с установившемся в синхротроне эмиттансом. В каждом измерении фазового пространства, за исключением  $x$ , было по 10 возможных координат макрочастиц. Так как рассчитывались только макрочастицы с начальными  $x$  координатами больше нуля, поэтому было 5 возможных  $x$  координат макрочастиц. Соответственно, трекинг проводился с 5000 макрочастицами. Шаг по бетатронным фазам бустера был равен  $0.01 \cdot 2\pi$  (рис. 12).

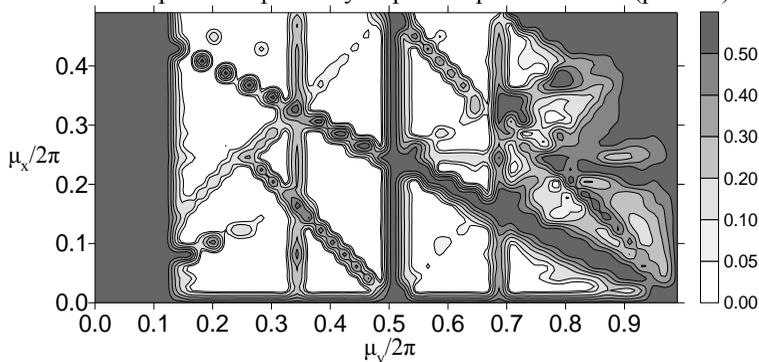


Рис. 12. Зависимость доли потерянных при экстракции частиц от набега бетатронных фаз в бустере.

На рисунке 12 есть несколько достаточно больших областей (около  $0.1 \cdot 2\pi$  на  $0.1 \cdot 2\pi$ ), в которых возможна эффективная экстракция, поэтому настройка необходимых величин  $\mu_x$  и  $\mu_y$  не должна вызвать серьезных затруднений.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. A.V. Bondarenko, N.A Vinokurov. A new beam extraction scheme from a synchrotron using a magnetic shield as a septum. Proceedings of XXIth Russian Conference on Charged Particle Accelerators RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, 28 Sep - 14 Oct, 2008.
2. A. V. Bondarenko, N. A. Vinokurov. Beam extraction from a synchrotron through a magnetic shield. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 603 (2009), pp. 10-12.
3. А. В. Бондаренко, Н. А. Винокуров, С. В. Мигинский. Схема экстракции пучка для бустера новосибирского источника синхротронного излучения. Вестник НГУ 4 (2009), вып. 1, 43-46.
4. А. В. Бондаренко, Н. А. Винокуров, С. В. Мигинский. Выпуск пучка из синхротрона через магнитный экран: магнитные измерения и расчёт эффективности. Вестник НГУ 4 (2009), вып. 2, 40-46.

*БОНДАРЕНКО Алексей Владимирович*

**Метод выпуска пучка из синхротрона  
с помощью многослойного  
медно-железного экрана**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор .1.04. 2010 г.

Подписано в печать 2.04. 2010 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 11

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*