

# НОВАЯ СХЕМА ЭКСТРАКЦИИ ПУЧКА ИЗ СИНХРОТРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОГО ЭКРАНА В КАЧЕСТВЕ СЕПТУМА

*А.В. Бондаренко, Н.А. Винокуров, С.В. Мизинский, Г.Н. Острейко*  
 ИЯФ СО РАН, Новосибирск  
 E-mail: A.V.Bondarenko@inp.nsk.su

Обсуждается новая схема экстракции пучка частиц из циклического ускорителя. Отличительной особенностью представленной схемы является использование магнитного экрана в качестве септума. Магнитный экран – это многослойная медно-железная трубка, которая проходит через два центральных дипольных магнита импульсного байпаса. Проводится сравнение численного расчета возмущения магнитного поля магнитным экраном с результатами эксперимента. Схему планируется применить для вертикальной экстракции пучка из бустера в накопительное кольцо в проекте нового источника СИ в Новосибирске.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно однооборотный выпуск пучка из синхротрона осуществляется с помощью кикера и септум-магнита. В данной статье обсуждается схема экстракции с использованием магнитного экрана в качестве септума. На орбите синхротрона располагается кикер и импульсный байпас. Магнитные экраны находятся в двух центральных диполях байпаса. При увеличении поля в магнитах байпаса пучок приближается к магнитному экрану, после чего включается кикер и сдвигает траекторию пучка внутрь магнитных экранов. При движении по такой траектории пучок отклоняется только крайними магнитами байпаса и уходит в выпускной канал.

Одной из проблем предлагаемой схемы является возмущение однородного поля в зазорах магнитов магнитными экранами. Чтобы данная схема была работоспособна, необходимо, чтобы экран импульсного магнитного поля не искажал магнитное поле вокруг себя. Именно поэтому в качестве магнитного экрана и предлагается использовать многослойный медно-железный экран.

## 2. ТЕОРИЯ

Рассмотрим процесс экранирования магнитного поля таким экраном. При проникновении магнитного поля в слоистые среды их можно рассматривать как однородные [1], при этом проводимость вдоль слоёв экрана  $\sigma$  вычисляется как среднее:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\sum_i h_i \sigma_i}{\sum_i h_i}. \quad (1)$$

Так как толщина стенок рассматриваемых экранов значительно меньше их размеров, то правомерно рассмотрение проникновения магнитного поля в стенки экрана в одномерном приближении. На Рис.1 изображены распределения магнитной индукции  $B$ , электрического поля  $E$ , плотности электрического тока  $j$ , и магнитного поля  $H$  в стенке 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.

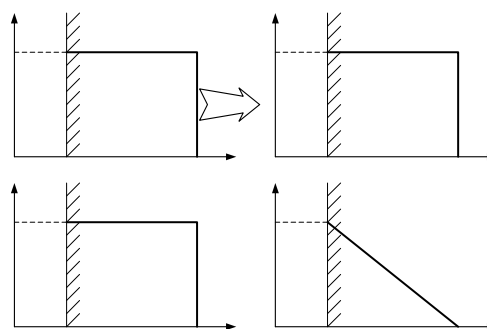


Рис.1. Распределение  $B$ ,  $E$ ,  $j$ ,  $H$  в стенках многослойного медно-железного экрана

Пусть скорость движения фронта магнитного поля –  $c$ , тогда величина электрического поля в стенке экрана следующая:

$$E_0 = cB_0. \quad (2)$$

Плотность электрического тока определяется электрическим полем и средней проводимостью:

$$j_0 = E_0 \langle \sigma \rangle = c \langle \sigma \rangle B_0. \quad (3)$$

Соответственно распределение магнитного поля в стенке экрана линейно, а на границе фронта величина поля равна 0. Поэтому поле на поверхности экрана  $H_0$  следующее:

$$H_0 = j_0 ct = c^2 \langle \sigma \rangle B_0 t. \quad (4)$$

С другой стороны,  $H_0$  определяется внешним полем:

$$H_0 = \frac{\alpha t}{\mu_0}, \quad (5)$$

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

Приравняв (4) и (5), получаем выражение для  $c$ :

$$c = \sqrt{\frac{\alpha}{\mu_0 \langle \sigma \rangle B_0}}. \quad (6)$$

То есть, в случае постоянной скорости увеличения внешнего поля скорость движения магнитного фронта в стенках экрана постоянна. Из (6) можно выразить скорость проникновения магнитного потока в стенки экрана, которая тоже постоянна:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = cB_0 = \sqrt{\frac{\alpha B_0}{\mu_0 \langle \sigma \rangle}}. \quad (7)$$

Этот результат подтверждается результатами численного моделирования (Рис.2).

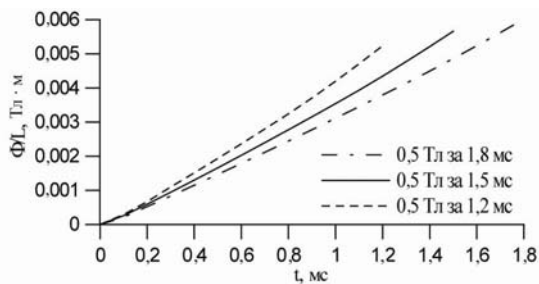


Рис.2. Зависимость магнитного потока через стенки экрана от времени на единицу длины экрана для разных скоростей увеличения внешнего поля. Эллиптический многослойный экран с внутренними полуосями 12 и 6 мм, наружными - 11 и 15 мм

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 возмущение поля экраном будет минимально. Остаточное возмущение поля, обусловленное геометрией экрана, конечным размером слоёв, видом кривой магнитной индукции и нелинейной зависимостью от времени внешнего поля, необходимо рассчитывать численно. Для этих расчетов использовалась программа COMSOL 3.2 [2]. На Рис.3 представлены результаты расчета для возмущения поля круглым экраном в оптимальном случае линейного нарастания внешнего поля.

При экстракции через многослойный экран подводящая орбита пучка находится примерно на расстоянии от его оси, равном двум радиусам экрана. Возмущение поля на подводящей орбите менее 1% от поля в диполях байпаса в момент экстракции.

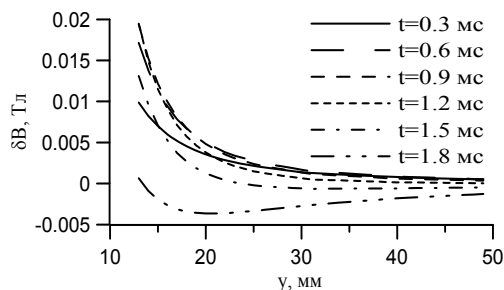


Рис.3. Возмущения поля круглым экраном при скорости увеличения внешнего поля 0.5 Тл за 1.8 мс; внутренний радиус 8 мм, внешний 12.5 мм

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

С целью проверки физической модели и численных методов, которые применялись при расчёте экранирования магнитного поля многослойным экраном, был изготовлен такой экран и проведены магнитные измерения. Размеры экрана следующие: 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. Межслоевые зазоры получились около 0.05 мм, длина экрана 200 мм.

Экран был размещен в импульсном дипольном магните с апертурой 40x40 мм, длиной железа 100 мм и магнитной длиной 123 мм. Ось экрана была параллельна оси магнита, находящегося посередине полюсов. Расстояние от оси магнитного экрана до оси дипольного магнита 5.5 мм (Рис.4).

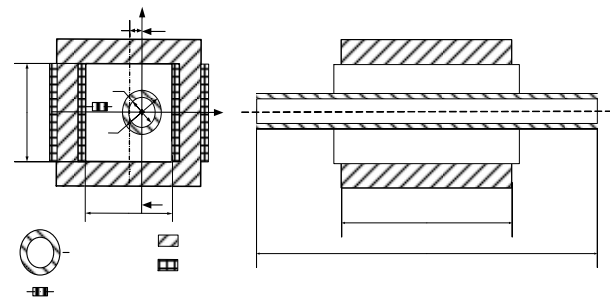


Рис.4. Байпас с магнитными экранами

Измерения проводились измерительной катушкой. Результатом измерений является проекция магнитного поля на ось катушки. Измерительная катушка была ориентирована перпендикулярно ведущему полю магнита вдоль оси  $y$ . При таком положении катушки измерялось  $B_y$  в точках с координатами  $x$ , равными 1 и (-1) мм. Так как измерения проводились в относительных единицах, то для нормировки использовались результаты измерений основного поля диполя  $B_x$  этой же катушкой. Для этих измерений ось катушки располагали параллельно оси  $x$  около наиболее удаленной от экрана обмотки, так как там возмущение поля диполя магнитным экраном минимально. Таким образом, результатом измерений являлся градиент поля.

Зависимость увеличения поля в импульсном диполе от времени была синусоидальной. Измерения проводились на первой восьмой части периода синусоиды, так как эта часть относительно линейна. При этом скорость нарастания поля составила 0.125 Тл за 300 мкс. Были проведены измерения градиента поля в зависимости от расстояния до центра экрана и времени с начала импульса. Результаты измерений изображены на Рис.5.

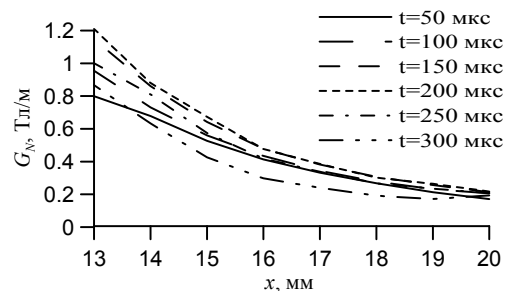


Рис.5. Градиент возмущения поля  $G_N$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $x$  и времени с начала импульса (центр диполя)

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, проведены две серии измерений с использованием двух импульсных генераторов [3]. На Рис.6 показана кривая магнитной проницаемости железной ленты, из которой изготавливался магнитный экран, восстановленная из результатов обоих измерений.

Промоделируем описанный выше магнитный экран, используя полученную зависимость  $\mu(B)$ . Интерполируем неизмеренную часть кривой магнитной проницаемости при  $1.1 > B > 2.3$  Тл линейным образом. Удельное сопротивление меди в расчетах возьмем  $1.8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, железа –  $3 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

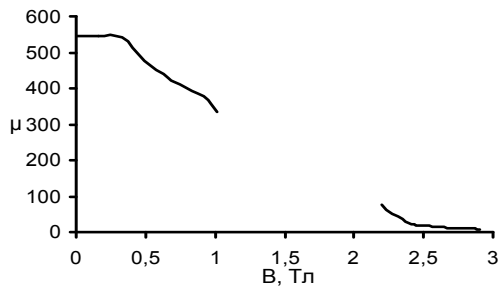


Рис.6. Измеренная кривая магнитной проницаемости железной ленты

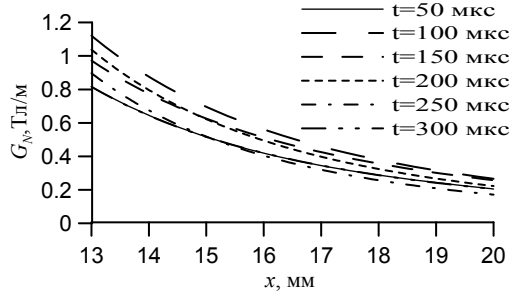


Рис.7. Результат численных расчетов градиента возмущения поля  $G_N$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $x$  и времени с начала импульса при оптимальной скорости его нарастания



Рис.8. Байпас с магнитными экранами

Кроме магнитного экрана источником возмущения поля в экстракционном импульсном байпасе также являются вакуумные камеры. Чтобы минимизировать это возмущение, необходимо использовать круглые вакуумные камеры, так как такие камеры способны выдержать большее внешнее давление и значит, 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 обмотках диполей.

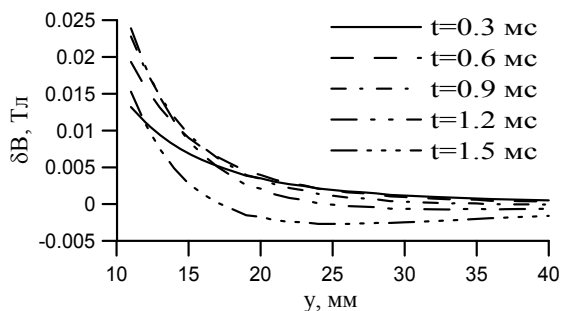


Рис.9. Возмущение поля многослойным магнитным экраном  $\delta B$  в зависимости от расстояния до центра экрана  $y$  и времени  $t$

Возмущения поля в вакуумных камерах и около магнитного экрана (Рис.9) приводят к отклонению

Были проведены расчеты при разных амплитудах внешнего поля. В случае увеличения внешнего поля до 0.125 Тл за 300 мкс распределение градиента поля совпадает с результатами измерений (Рис.7).

Из Рис.5 и 7 видно, что измеренная и рассчитанная величины и форма возмущения поля совпадают с расчетами.

#### 4. ВЫПУСК ЧЕРЕЗ МАГНИТНЫЙ ЭКРАН НА ЭНЕРГИИ 2.2 ГэВ

Данную схему предполагается использовать для вертикальной экстракции из бустера на энергии 2.2 ГэВ. Такой бустер необходим для нового источника синхротронного излучения в Новосибирске [4]. Планируется использовать импульсный байпас (Рис.8) и эллиптический многослойный медно-железный экран со следующими размерами: внутренние полуоси 7 и 13 мм, внешние 11 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 его оси при оптимальной скорости увеличения внешнего поля представлена на Рис.9.

пучка от исходной траектории на угол  $K_0$ , его дополнительной фокусировке  $K_1$  и нелинейной секступольной фокусировке  $K_2$ . В таблице представлены максимальные значения этих величин для экстракционного байпаса с магнитным экраном (МЭ) и, для сравнения, эти же данные для систем выпуска из бустера в Duke University (DU) [5] и в Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL) [6].

Сравнение влияния различных экстракционных систем на циркулирующий пучок.

$E$  – энергия экстракции

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

Для точного расчета влияния возмущения поля в экстракционном байпасе на динамику частиц в бустере была написана программа [3]. Возмущение поля считалось сосредоточенным, то есть при каждом пролёте через байпас частица просто получает нелинейный толчок. Сила толчка вычислялась с учетом зависимости величины возмущения поля и положения орбиты от времени. Учитывалось возмущение поля как магнитным экраном, так и вакуумными камерами. Оптика бустера считалась при этом линейной. Расчет проводился методом макрочастиц. Вес частиц считался пропорциональным начально-

му распределению. В качестве начального распределения частиц бралось гауссовское с установившемся в синхротроне эмиттансом. В каждом измерении фазового пространства  $(x, x', y, y')$  было по 10 возможных координат макрочастиц, соответственно, трекинг проводился с 10000 макрочастиц. Результаты трекинга – потери при выпуске в зависимости от набега бетатронных фаз в синхротроне за один оборот (Рис.10).

Из Рис.10 видно, что самым сильным резонансом является целый, поэтому экстракция при значениях  $\mu_y$  от 0 до  $0.17 \cdot 2\pi$  невозможна. Это соответствует искажению орбиты из-за дополнительного углового отклонения, получаемого пучком при пролёте около магнитного экрана. В области  $\mu_y > 0.17 \cdot 2\pi$  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 набегов бетатронных фаз за один оборот в синхротроне не должна вызвать серьезных затруднений.

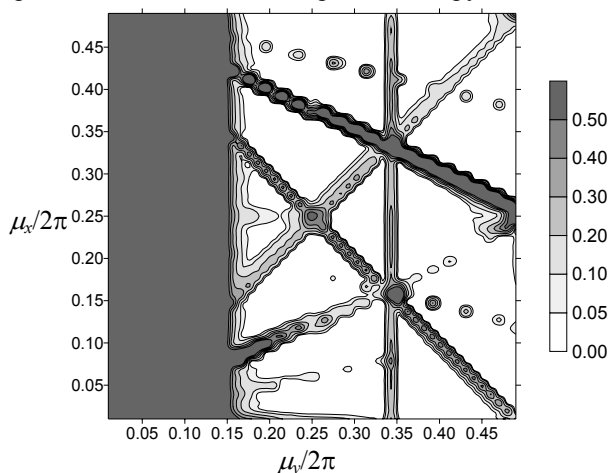


Рис.10. Зависимость потерь при экстракции от набега бетатронных фаз в бустере

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была описана схема экстракции пучка из синхротрона через магнитный экран. К преимуществам представленной схемы стоит отнести отсутствие септум-магнитов и компактность. Такую схему планируется применить при вертикальной экстракции пучка из бустера в накопительное кольцо в новом источнике синхротронного излучения в ИЯФ.

При использовании многослойного экрана возмущение поля на подводимой к экрану орбите составляет менее 1% от поля в диполях байпаса. Расчет эффективности выпуска подтверждает возможность использования такой схемы для выпуска электронов из циклического ускорителя. Приведены результаты магнитных измерений возмущения однородного поля, вызванного многослойным медно-железным магнитным экраном, которые подтверждают сделанные расчеты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л.М. Бреховских. *Волны в слоистых средах*. М.: «Издательство академии наук», 1957.
2. <http://www.comsol.com/>
3. А.В. Бондаренко, Н.А. Винокуров, С.В. Мигинский. Выпуск пучка из синхротрона через магнитный экран: магнитные измерения и расчет эффективности // *Вестник НГУ* 4. 2009, в.2, с.40-46.
4. E.I. Antokhin, A.A. Gvozdev, G.N. Kulipanov, et al. // *NIM*. 2007, v.A575, issues 1-2, p.1-6.
5. J. Li, S.F. Mikhailov, S. Huang, et al. Compensation of the beam dynamics effects caused by the extraction Lambertson septum of the HIGS booster // *Proc. of PAC 07*. Albuquerque, USA. p.3582-3584.
6. J. Cerino, M. Baltay, R. Boyce, et al. Extraction septum magnet for the SSRL SPEAR injector // *Proc. of PAC 91*. San Francisco, USA. p.2328-2330.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

## A NEW BEAM EXTRACTION SCHEME FROM A SYNCHROTRON USING A MAGNETIC SHIELD AS A SEPTUM

*A.V. Bondarenko, N.A. Vinokurov, S.V. Miginsky, G.N. Ostreiko*

A new beam extraction scheme from a synchrotron is put forward. The main difference from other schemes of extraction is the use of a magnetic shield as a septum. A magnetic shield is located in the central dipole magnets of a pulsed chicane. The magnetic shield is a multi-layer copper-iron tube. Numerical simulations and experimental results for the magnetic shield are presented. The proposed scheme will be used for extraction from a booster synchrotron to a storage ring in a new synchrotron radiation source in Novosibirsk.

## НОВА СХЕМА ЕКСТРАКЦІЇ ПУЧКА З СИНХРОТРОНА З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТНОГО ЕКРАНА ЯК СЕПТУМА

*А.В. Бондаренко, Н.А. Винокуров, С.В. Мігінський, Г.Н. Острейко*

Обговорюється нова схема екстракції пучка часток з циклічного прискорювача. Відмінною особливістю представленої схеми є використання магнітних екранів як септумів. Магнітний екран – це багатошарова мідно-залізна трубка, що проходить через два центральних дипольних магніти імпульсного байпаса. Проводиться порівняння чисельного розрахунку зміни магнітного поля магнітним екраном з результатами експерименту. Схему планується застосувати для вертикальної екстракції пучка з бустера в накопичувальне кільце в проекті нового джерела СІ в Новосибірську.