

## РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОННОГО СИНХРОТРОНА НА ОСНОВЕ СКАНИРУЮЩИХ МАГНИТОВ

*Акифьев Арсений Альбертович*<sup>1</sup> (*sarfti@mephi.ru*), *Трунцева Руслана Павловна*,  
*Опекунов Александр Михайлович*, *Тельнов Александр Валентинович*

<sup>1</sup> СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для изучения процессов взаимодействия излучения с веществом в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается многоцелевой комплекс, в составе которого планируется использовать ускоритель синхротронного типа. Система формирования поля облучения данного ускорителя должна быть способна обеспечить поле заданной величины для большого перечня высокоэнергетических заряженных частиц (от десятков до сотен МэВ/нуклон). Одним из способов формирования поля облучения является метод активного сканирования пучка [1]. В данном методе пучок отклоняется при прохождении через систему активного сканирования, состоящую из дипольных магнитов поперечной развертки, на обмотки которых подается ток заданной частоты.

В данной работе приводятся результаты расчетов системы формирования поля облучения, состоящей из двух дипольных магнитов поперечной развертки. Расчеты выполнены в геометрии выводного канала синхротронного ускорителя. Расчеты проведены с помощью программного пакета, который позволяет проводить трехмерные расчеты физических процессов и проектирование электротехнических устройств. Приведены результаты расчетов необходимых магнитных полей и характеристик обеспечивающих их магнитов для перечня ускоренных заряженных частиц от протонов (700 МэВ) до ионов висмута (36 МэВ/нуклон).

**Ключевые слова:** протоны, тяжелые заряженные частицы, сканирующий магнит, магнитное поле, поле облучения, метод активного сканирования.

## CALCULATION OF IRRADIATION FIELD FORMATION SYSTEM BASED ON SCANNING MAGNETS FOR ION SYCHROTRON

*Akifiev Arseniy Albertovich*<sup>1</sup> (*sarfti@mephi.ru*), *Truntseva Ruslana Pavlovna*,  
*Opekunov Aleksandr Michaylovich*, *Telnov Aleksandr Valentinovich*

<sup>1</sup> SarPhTI NRNU MEPHI, Sarov Nizhny Novgorod region  
FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Multi-purpose complex including synchrotron accelerator is being developed in RFNC-VNIIEF to study radiation interaction with material. Irradiation field formation system of given accelerator has to be able to sustain field of a required value for a list of high-energy particles (from tens to hundreds of MeV/nucleon). One of the ways to form an irradiation field is active beam scanning method [1]. In given method beam is bent passing through the active scanning system, which consists of dipole magnets of transversal scattering. Coils of such magnets are powered by alternate current of constant frequency.

This paper provides results for calculations of irradiation field formation system, consisting of two dipole magnets of transversal scattering. Computation was carried out in geometry close to the output line of synchrotron accelerator. Calculations were carried out using software package for modeling, which allows 3D-calculations of physical processes for electric devices and their design. Calculation results of required magnetic fields and parameters of magnets that sustain them are given for the list of accelerated charged particles from protons (703 MeV) to bismuth ions (36 MeV/nucleon).

**Key words:** protons, heavy charged particles, scanning magnet, magnetic field, irradiation field, active scanning method.

## Введение

Одним из основных направлений применения синхротронных ускорителей является изучение взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается экспериментальный комплекс, в состав которого входит многоцелевой ускоритель синхротронного типа. Формируемые синхротроном ионные пучки доставляются до объекта испытаний, проходя предварительно через систему формирования поля облучения. В данной работе рассматривается система формирования поля облучения ионного синхротрона, предназначенного для ускорения большого перечня тяжелых заряженных частиц от протонов (энергия 700 МэВ) до висмута (энергия 36 МэВ/нуклон). Схемы участков синхротронного ускорителя представлены на рис. 1–2. Такая система предназначена для достижения поля облучения площадью в 100 см<sup>2</sup> на объекте испытания с неоднородностью не более 30 %. Формирование поля облучения возможно несколькими способами, одним из которых является метод активного сканирования, рассматриваемый в данной работе [2].

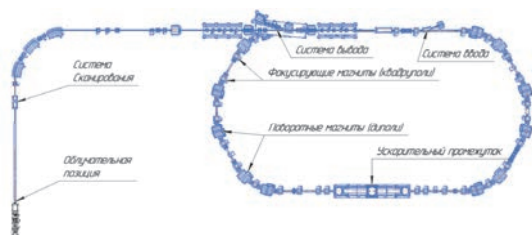


Рис. 1. Кольцо бустера

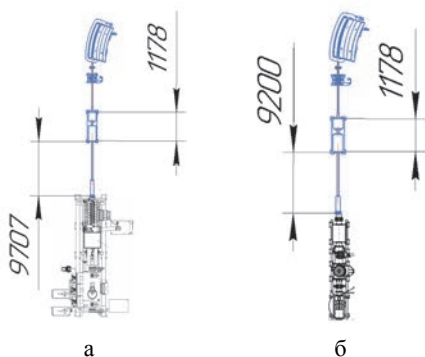


Рис. 2. Системы формирования поля облучения для двух типов помещений: а – большой зал, б – малый зал

В данной работе поле облучения формируется двумя способами: облучение позиции пучком точно с определенным шагом (дискретный) и установление тока заданной частоты в обмотке (периодический). В табл. 1 приведены преимущества и недостатки методов. В связи с техническими сложностями реализации включения/выключения, в большинстве случаев применяется периодический режим [3].

Таблица 1

Сравнение дискретного и частотного режимов сканирования

Режим сканирования	Преимущества	Недостатки
Дискретный	Отсутствие необходимости постоянного контроля пучка, меньшие требования к источнику питания	Сложности технической реализации, однородность зависит от шага между местами облучения и сечения пучка
Периодический	Контроль движения пучка посредством регуляции частоты тока обмоток, как следствие – улучшение однородности	Повышенные требования к источнику питания, технические ограничения частоты сканирования

Для обеспечения сканирования требуется подобрать генератор тока и выбрать форму для сигнала (синусоидальный, пилообразный и др.). Генерируемый ток подается на обмотки сканирующих магнитов, а формируемое в результате этого магнитное поле отклоняет пучок, заставляя его описывать на мишени траекторию, например, как на рис. 3 [1]. Важной характеристикой активного сканирования является равномерность распределения пучка на мишени, как показано на рис. 4 [4].

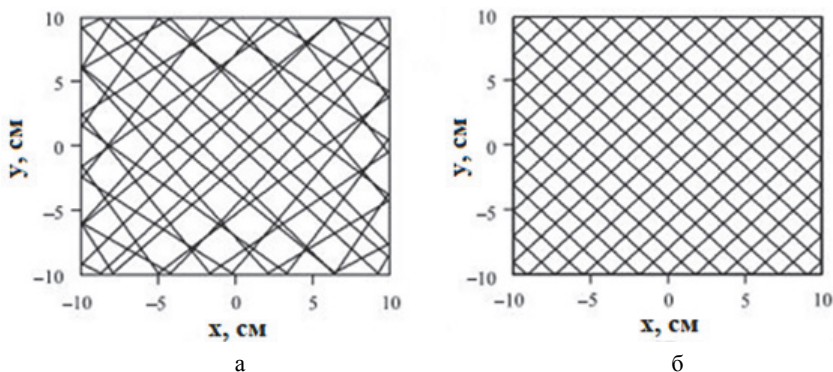


Рис. 3. Траектория движения центра масс пучка по мишени:  
а – с учетом нелинейности тока в обмотке, б – без учета нелинейности тока в обмотке

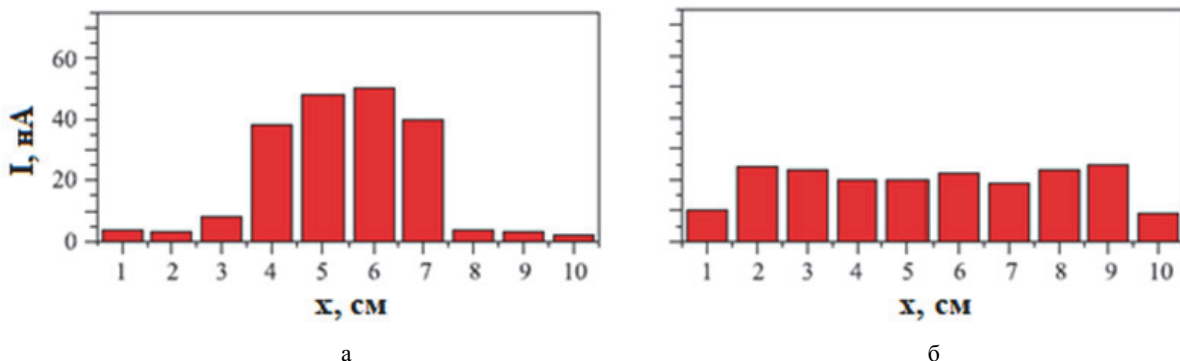


Рис. 4. Распределение пучка на мишени:  
а – без работы системы сканирования; б – при включенной системе сканирования

### Описание расчетов

Расчеты были проведены с помощью программного пакета для моделирования, который позволяет проводить трехмерные расчеты физических процессов различной природы и проектирование электротехнических устройств. Один из модулей программы предназначен для расчета динамики заряженных частиц с учетом влияния сил кулоновского расталкивания.

Для выполнения расчетов в геометрии выводного канала синхротронного ускорителя построена модель системы формирования поля облучения, расчетная геометрия представлена на рис. 5.

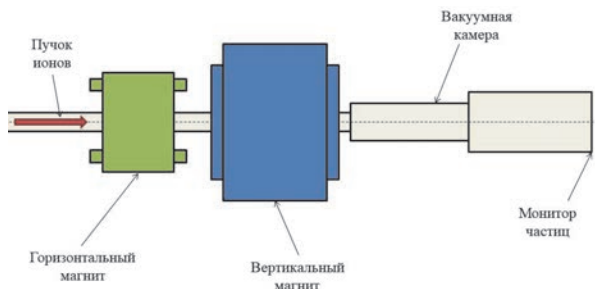


Рис. 5. Расчетная геометрия

Рассматриваемая система находится в вакууме. Предполагаемая облучаемая позиция в данной работе обозначается как монитор частиц, регистрирую-

щий факт прохождения частиц через поверхность. В расчетах место ввода пучка из транспортных каналов задается как источник частиц диаметром 30 мм с нормальным пространственным распределением.

В качестве первичного излучения рассматривался перечень ионов от водорода до висмута. Перечень приведен в табл. 2.

Таблица 2

Список рассматриваемых частиц и их характеристики

Ион	A	Z	W, МэВ/н
H	1	1	703,0
C	12	6	217,9
Fe	56	26	190,8
Bi	209	41	36,8

Определены параметры системы, необходимые для формирования поля облучения в 100 см<sup>2</sup>. Исходные параметры данной системы:

- расстояние между горизонтальным и вертикальным магнитом 200 мм;
- пролетные расстояния 9707 мм для большого зала и 9200 мм для малого зала;
- размер монитора 100x100 мм.

Поле облучения на предполагаемой позиции формируется посредством двух сканирующих магнитов поперечной развертки. Расчеты проводились для дипольных магнитов с Ш-образным сердечником. Параметры магнитов были подобраны исходя из требований к геометрии магнитов и к формируемому полю облучения. Материалом сердечников выбрана шихтованная электротехническая сталь PowerCore 1200-100A, материалом обмотки выбрана бескислородная медь Cu-OF сплав OF-OK. Основные параметры магнитов приведены в табл. 3–4.

Таблица 3

Основные параметры горизонтального магнита

Длина магнита $Z$ , мм	360
Ширина полюса $S$ , мм	188
Межполюсной зазор $G$ , мм	88
Число витков на полюс $N$	12
Индуктивность одной обмотки $L$ , мГн	0,29
Вес, кг	952
Максимальный ток в обмотке $I$ , А	123,5
Максимальное магнитное поле в зазоре $B$ , мТл	44

Таблица 4

Основные параметры вертикального магнита

Длина магнита $Z$ , мм	618
Ширина полюса $S$ , мм	264
Межполюсной зазор $G$ , мм	172
Число витков на полюс $N$	12
Индуктивность одной обмотки $L$ , мГн	0,43
Вес, кг	2165
Максимальный ток в обмотке $I$ , А	105,2
Максимальное магнитное поле в зазоре $B$ , мТл	28

На основании расчетов для элементов системы сканирующих магнитов построена модель системы формирования поля облучения. Выполнены расчеты для дискретного и периодического режимов работы системы формирования поля облучения ионного синхротрона, основанной на сканирующих магнитах, для достижения требуемой площади поля облучения в  $100 \text{ см}^2$ . Определены неоднородности рассчитанных полей облучения.

**Дискретный режим работы**

Для дискретного режима важно учитывать неоднородность направляемого пучка, чтобы обеспе-

чить равномерное распределение. Полученная картина облучения протонами для данного метода приведена на рис. 6, желтой линией обозначены границы монитора частиц. Рассчитанные значения магнитных индукций приведены в табл. 5. Получено, что максимальная индукция магнитного поля, требуемая для формирования поля облучения площадью  $100 \text{ см}^2$ , для горизонтального магнита составила 42 мТл, а для вертикального магнита – 26 мТл. Неоднородность поля составила около 28 %. Для остальных рассматриваемых частиц картины облучений совпадают с картиной облучения протонами с незначительными отклонениями магнитной индукции.

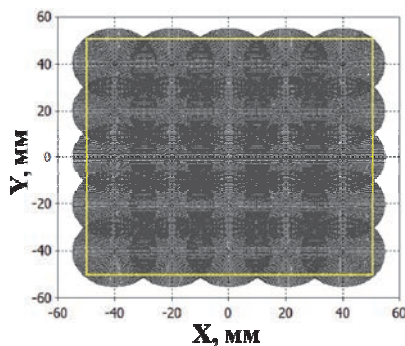


Рис. 6. Поле облучения протонами, формируемое системой сканирования

Таблица 5

Максимальная индукция магнитного поля, требуемая для формирования площади поля облучения в  $100 \text{ см}^2$

Ион	9707 мм		9200 мм	
	$B_H$ , мТл	$B_V$ , мТл	$B_H$ , мТл	$B_V$ , мТл
H	37,2	24,8	41,9	25,9
C	37,3	24,9	42,0	26,1
Fe	37,4	24,5	42,1	26,2
Bi	37,4	24,7	41,9	26,1

Полученная неоднородность незначительно отличается от предельно допустимых значений, что в совокупности со сложностью технической реализации делает дискретный режим работы системы сканирования менее предпочтительным.

**Периодический режим работы**

Вторым способом формирования поля облучения является подача на обмотки переменного тока постоянной частоты. Для данной работы рассматривался ток пилообразной формы с частотой 10 Гц в обмотках горизонтального магнита и с частотой 11 Гц для вертикального магнита. Формы сигналов, подаваемые на обмотки каждого из магнитов, изображены на рис. 7–8.

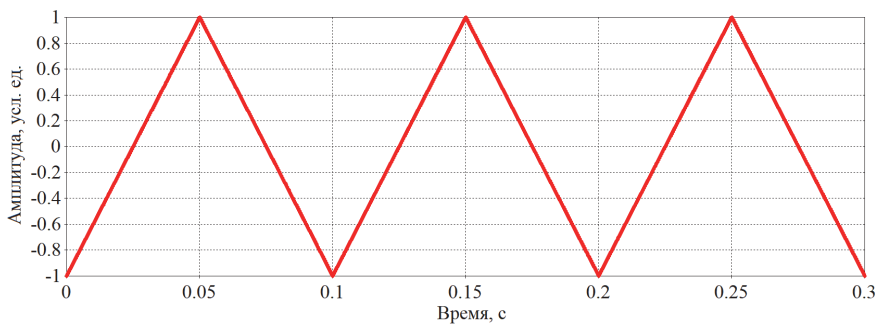


Рис. 7. Форма сигнала с частотой 10 Гц

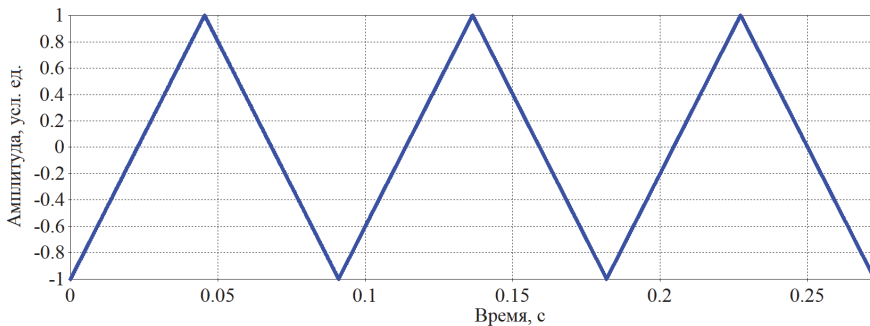


Рис. 8. Форма сигнала с частотой 11 Гц

Полученная траектория движения центра масс пучка протонов приведена на рис. 9. Рассчитанные значения магнитных индукций приведены в табл. 6. Получено, что максимальная индукция магнитного поля, требуемая для формирования поля облучения, для горизонтального магнита составила 44 мТл, а для вертикального магнита – 28 мТл. Неоднородность поля облучения составила около 9 %, графики плотностей распределения для пучка протонов приведены на рис. 10. Для остальных рассматриваемых частиц картины облучений совпадают с картиной облучения протонами с незначительными отклонениями магнитной индукции.

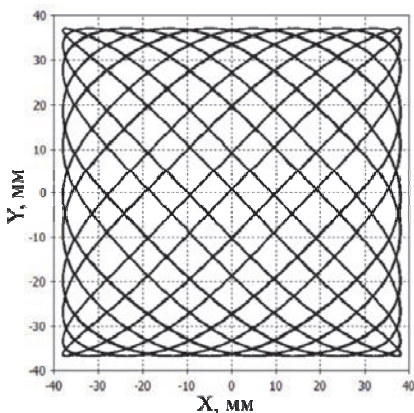


Рис. 9. Движение центра масс пучка протонов по предполагаемой облучательной позиции

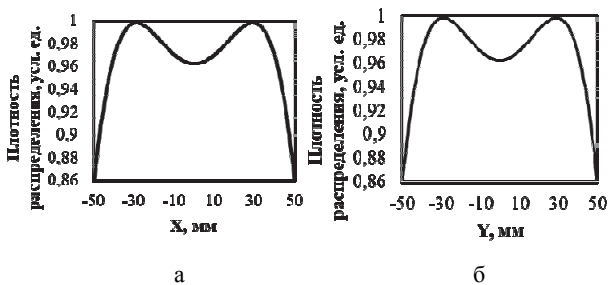


Рис. 10. Плотность распределения пучка протонов по координатам при периодическом режиме работы: а – при  $Y=0$ , б – при  $X=0$

Таблица 6

Максимальная индукция магнитного поля, требуемая для формирования площади поля облучения в  $100 \text{ см}^2$

Ион	9707 мм		9200 мм	
	$B_H$ , мТл	$B_V$ , мТл	$B_H$ , мТл	$B_V$ , мТл
H	42,0	26,3	44,1	27,7
C	42,1	26,4	44,3	28,0
Fe	42,3	26,1	44,5	28,1
Bi	42,3	26,2	44,2	27,9

Полученные значения неоднородности меньше, чем для дискретного случая, что делает периодический режим более предпочтительным. Однако важно учитывать немалое количество больших магнитных поля и повышенные требования к источнику питания.

## Заключение

В работе рассмотрены режимы работы системы формирования поля облучения ионного синхротрона. Получены следующие результаты:

1. Построена модель системы формирования поля облучения на основе моделей сканирующих магнитов. Получены картины полей облучения.

2. Рассмотренные режимы работы сканеров обеспечивают требуемую площадь поля облучения на мишени. Смоделированы дискретный и периодический режимы работы для списка первичных частиц:

❖ Для дискретного режима получено, что для формирования поля облучения в  $100 \text{ см}^2$  необходима индукция магнитного поля для горизонтального магнита 42 мТл, для вертикального магнита – 26 мТл.

❖ Для периодического режима получено, что для формирования поля облучения в  $100 \text{ см}^2$  необходима индукция магнитного поля для горизонтального магнита 44 мТл, для вертикального магнита – 28 мТл.

3. Проведен расчет неоднородности полей облучения, которая не должна превышать 30 %. Получено, что неоднородность поля для дискретного режи-

ма работы составляет около 28 %, для периодического – около 9 %.

4. При необходимости изменения пролетной базы есть возможность изменения магнитного поля путем изменения тока в обмотках.

5. В дальнейшем требуется усовершенствовать режим периодической работы системы формирования и провести расчет тепловых потерь.

## Список литературы

1. Казаринов Н. Ю. и др. Система формирования магнитных полей для сканирования пучка заряженных частиц по произвольной траектории на мишени // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 6. С. 1215–1227.

2. Лебедева Ж. С. Формирование дозных распределений в протонной онкоофтальмологии: дисканд. физ.-мат. наук. С-Пб., 2015.

3. Костромин С. А., Сыресин Е. М. Тенденции в ускорительной технике для адронной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 7. С. 1346.

4. Денисов Ю. Н. и др. Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 3. С. 126.