

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИПОЛЬНЫХ И КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА В РЕЦИРКУЛЯТОРЕ SALO

И.С. Гук, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: guk@kipt.kharkov.ua

Поскольку магнитная система проектируемого рециркулятора SALO состоит из значительного количества магнитных элементов, то вполне вероятно существенное влияние неидеальности этих элементов на ожидаемые параметры выводимого пучка. Исследованию данного вопроса методом математического моделирования динамики частиц посвящена настоящая работа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с ядерными исследованиями, одним из основных направлений работ, планируемых на рециркуляторе SALO [1], проект которого в настоящее время разрабатывается в ННЦ ХФТИ, проводятся исследования с использованием плотных электронных пучков в широком диапазоне энергий. Для успешного решения этой задачи магнитооптическая система как самого рециркулятора, так и каналов транспортировки пучка, должна быть спроектирована с учетом характеристик магнитных элементов, наиболее приближенных к реально ожидаемым. В связи с этим, частью из экспериментальных данных [2], частью из теоретического рассмотрения [3, 4], были произведены оценки ожидаемых значений секступольной и октупольной нелинейностей магнитных элементов (дипольных и квадрупольных магнитов) и исследовано их влияние на параметры пучка в рециркуляторе.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис.1 показана схема расположения рециркулятора SALO и проектируемых пучковых линий. Данная схема отличается от схемы, представленной ранее в работе [5]. Изменения заключаются в унификации входящих в состав тракта инжекции и чикейна магнитов. Все они имеют геометрическую длину полюсов, равную 100 мм. Такая замена обусловлена тем, что к настоящему времени сконструирован, изготовлен и испытан электромагнит с длиной полюсов 100 мм, показавший хорошие характеристики [6]. В связи с этим число магнитов на тракте инжекции стало равным 6 (вместо четырех), а в составе чикейна – 4 (вместо трёх).

Регулирование энергии инжекции на входе в ускоряющую систему рециркулятора позволяет осуществлять непрерывную регулировку энергии на пучковых линиях А, В, С в диапазоне 60...730 МэВ,

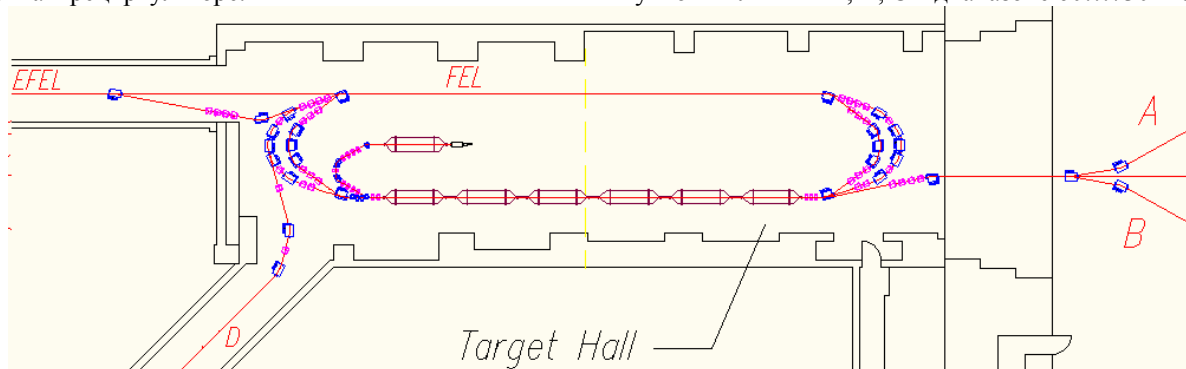


Рис.1. Схема расположения рециркулятора SALO вместе с планируемыми пучковыми линиями

на линиях D, E – в диапазоне 175...493 МэВ, на пучковой линии FEL – в диапазоне 89...256 МэВ, на пучковой линии EFEL – в диапазоне 175...493 МэВ (см. Рис.1) [5].

Неидеальность дипольных магнитов обуславливается двумя факторами: наличием краевых полей на торцах магнитов и поперечной неоднородностью магнитного поля, причинами которых могут быть как погрешности в изготовлении, так и магнитная неоднородность самого материала. Первый фактор достаточно хорошо изучен для различных типов срезов магнитов [7, 8] и может быть учтен при расчетах; второй же изучен гораздо слабее из-за обилия параметров, влияющих на него. Поэтому в расчетах

обычно используются результаты конкретных измерений. В проведенных расчетах были использованы результаты магнитных измерений на магнитах EUTERPE [2], поскольку эти магниты планируется использовать в структуре первого кольца рециркуляции (Рис.2).

На Рис.3. показана зависимость «квазиоктупольной» составляющей краевого квадрупольного поля линзы от расстояния до края линзы, рассчитанная по данным работы [3,7]. Здесь S_0 – координата края линзы; a_0 – радиус апертуры линзы; B_1 – градиент квадрупольного поля линзы; B_1'' – вторая производная градиента по продольной координате, рассчитанная по данным работы [4].

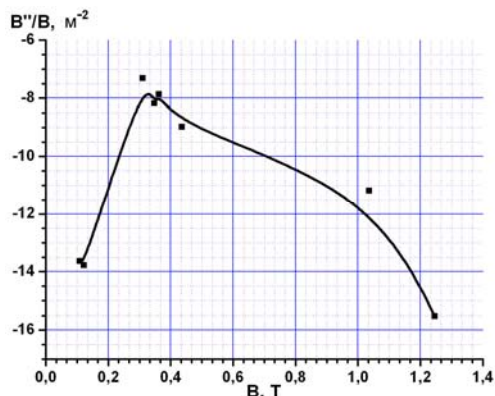


Рис.2. Зависимость нормированной на напряженность магнитного поля и усредненной по длине дипольного магнита квадратичной нелинейности от напряженности магнитного поля

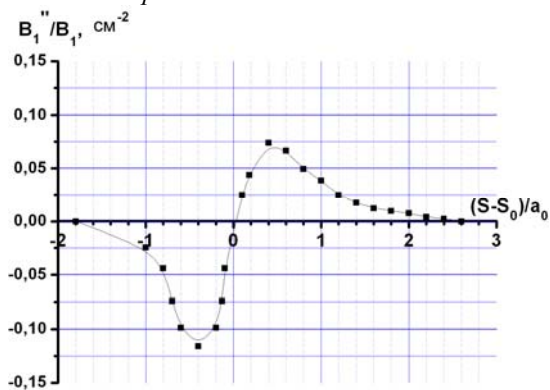


Рис.3. Зависимость «квазиоктупольной» составляющей краевого квадрупольного поля линзы от расстояния до края линзы

Полученные данные использовались при численном моделировании динамики частиц в рециркуляторе с помощью вычислительной программы TRANSPORT [8] и MAD-X [9]. Секступольная составляющая учитывалась в описании диполя, октупольная составляющая моделировалась тонкими линзами на входе и выходе квадруполья.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки влияния секступольной нелинейности магнитного поля дипольных магнитов и октупольной составляющей поля квадрупольных линз на параметры пучка были проведены расчёты вертикальных и горизонтальных размеров пучка для каналов разной длины. Результаты, полученные для каналов FEL, EFEL и ABC с помощью программы TRANSPORT, приведены на Рис.4-7.

На рисунках цифрами 1, 2 обозначены огибающие σ_x и σ_y , рассчитанные без учета нелинейности; цифрами 3, 4 – те же огибающие с учетом нелинейности во втором и третьем порядке вычислений.

Как и следовало ожидать, из полученных кривых видно, что с увеличением числа магнитных элементов в канале, влияние нелинейностей на размеры пучка как по вертикали, так и по горизонтали, нарастает: на канале FEL они ещё практически не видны, а на более длинных – размеры могут меняться на несколько раз.

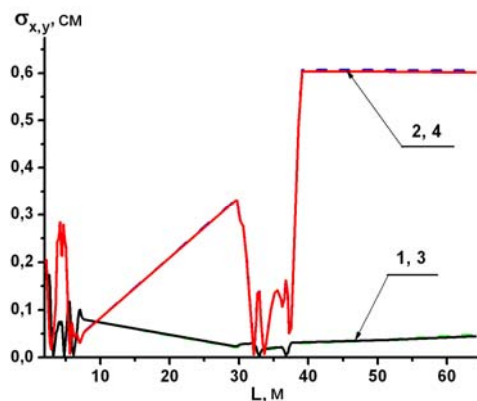


Рис.4. Канал FEL

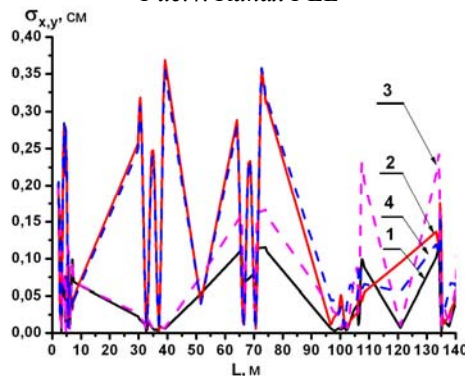


Рис.5. Канал FEEL, начало

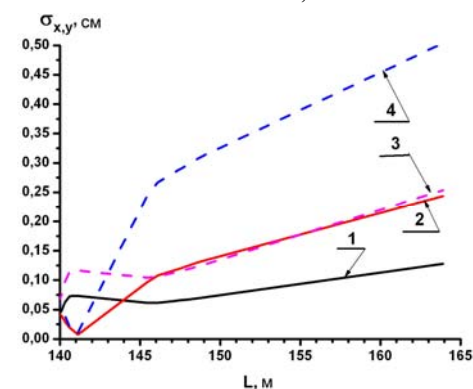


Рис.6. Канал FEEL, выход

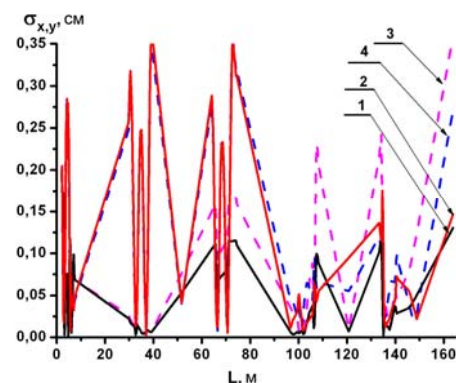


Рис.7. Канал ABC

Поскольку вычисления по программе TRANSPORT основываются на формализме матриц Твисса, она позволяет вычислять лишь эллиптические формы распределения частиц в поперечном сечении и на фазовой плоскости, а для более подробного исследования влияния секступольной и октупольной нелинейности на параметры пучка в рециркуляторе было проведено моделирование путем расчетов

по траекториям с помощью вычислительной программы MAD-X [9]. Расчеты выполнялись для 400 частиц в предположении нормального закона их начального распределения по углам и координатам.

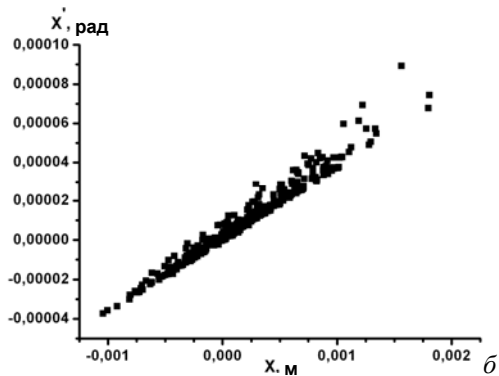
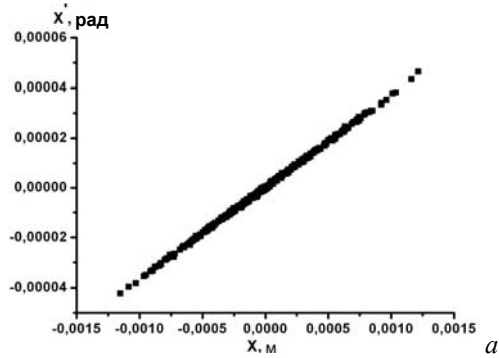


Рис.8. Фазовые портреты пучка на входе в пучковые линии ABC в горизонтальной плоскости

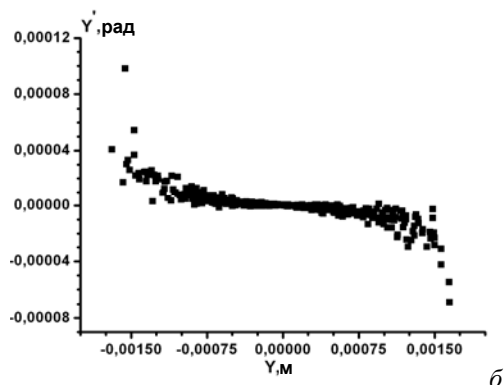
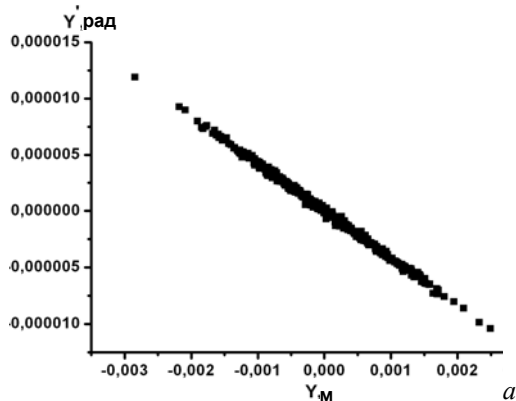


Рис.9. Фазовые портреты пучка на входе в пучковые линии ABC в вертикальной плоскости

На Рис.8,а,б и Рис.9,а,б приведены фазовые портреты пучка на входе в пучковые линии ABC в горизонтальной (X, X') и вертикальной (Y, Y') плоскостях при наличии (Рис.8,б и Рис.9,б) и отсутствии

секступольной и октупольной составляющих магнитного поля в дипольных и квадрупольных магнитах (Рис.8,а и Рис.9,а) при эмиттансе инжекционного пучка $\sigma_{mix}=\sigma_{inj}=0,02$ см·мрад.

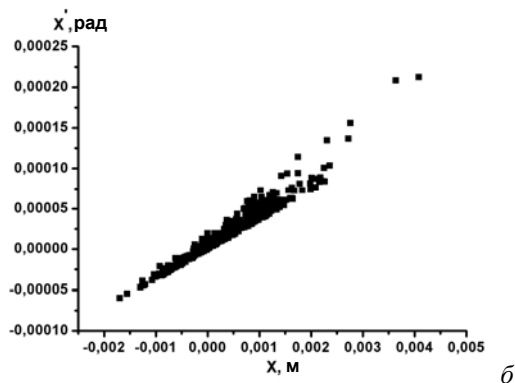
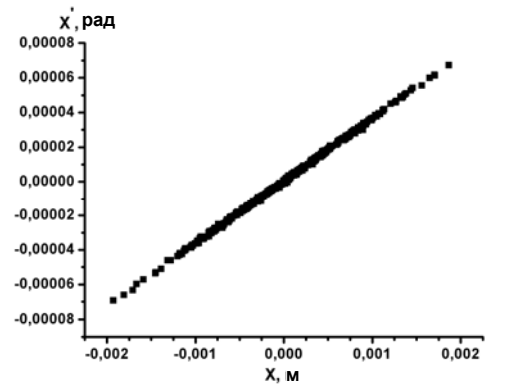


Рис.10. Фазовые портреты пучка

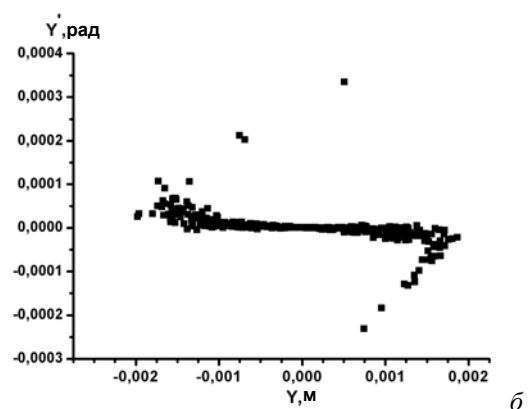
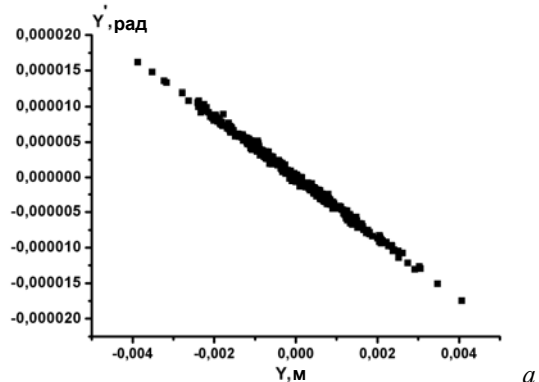


Рис.11. Фазовые портреты пучка на входе пучковых линий ABC в горизонтальной плоскости при эмиттансе инжекционного пучка $\sigma_{injx}=\sigma_{injy}=0,04$ см·мрад

На Рис.10,а,б и Рис.11,а,б показаны фазовые портреты пучка на входе пучковых линий ABC в горизонтальной (X, X') и вертикальной (Y, Y') плоскостях без учета (см. Рис.10,а и Рис.11,а) и с учетом (см. Рис.10,б и Рис.11,б) секступольной и октупольной составляющих магнитного поля в магнитных элементах рециркулятора при эмиттансе инжекционного пучка $\sigma_{\text{in}x}=\sigma_{\text{in}y}=0,04$ см·мрад.

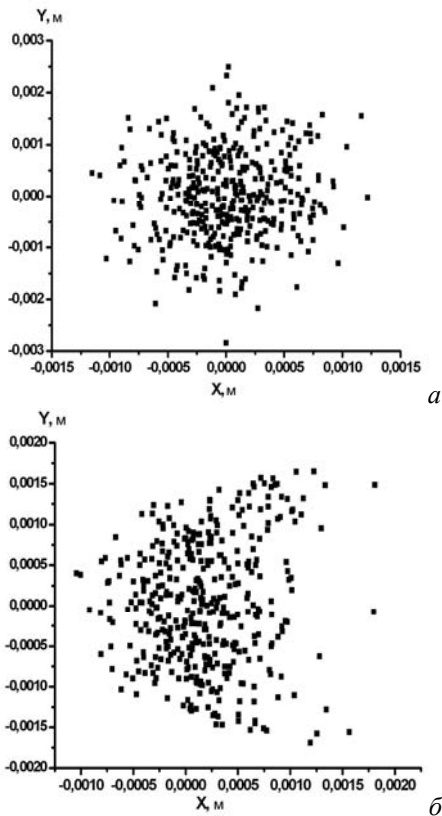


Рис.12. Распределения частиц пучка на входе пучковых линий ABC при эмиттансе инжекционного пучка $\sigma_{\text{in}x}=\sigma_{\text{in}y}=0,02$ см·мрад

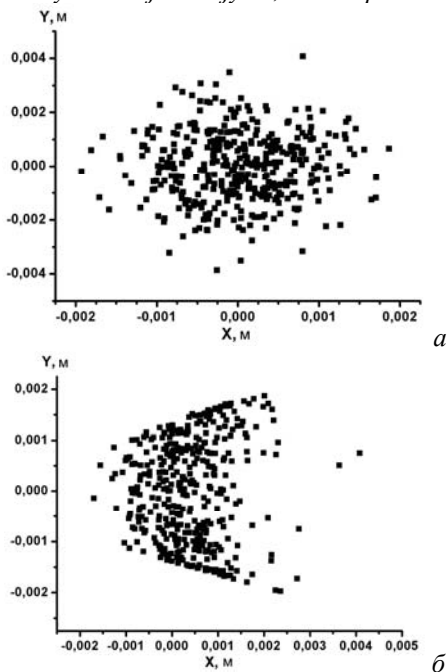


Рис.13. Распределения частиц пучка на входе пучковых линий ABC при эмиттансе инжекционного пучка $\sigma_{\text{in}x}=\sigma_{\text{in}y}=0,04$ см·мрад

На Рис.12,а,б и Рис.13,а,б показаны распределения частиц на входе пучковых линий ABC для двух значений эмиттанса инжектируемого пучка: $\sigma_{\text{in}x,y}=0,02$ см·мрад (см. Рис.12) и $\sigma_{\text{in}x,y}=0,04$ см·мрад (см. Рис.13). На Рис.12,а и Рис.13,а представлены распределения для случая, когда в магнитных полях дипольных и квадрупольных магнитов отсутствуют секступольная и октупольная компоненты, на Рис.12,б и Рис.13,б – при наличии этих компонент.

ВЫВОДЫ

Полученные в результате выполненных расчетов данные позволяют сделать следующие выводы:

1) влияние секступольной и октупольной компонент магнитного поля дипольных и квадрупольных магнитов на поперечные размеры пучка возрастает с увеличением числа магнитных элементов в каналах вывода, и на длинных каналах может привести более чем к двукратному увеличению размеров;

2) моделирование влияния отклонения магнитных элементов от идеальности путем расчетов по траекториям указывает на изменение формы радиального и вертикального эмиттансов пучка, а также вида распределения частиц в поперечном сечении пучка. Это влияние растет с увеличением эмиттанса инжектируемого пучка;

3) для компенсации увеличения размеров пучка на длинных каналах необходимо использовать нелинейные магнитные элементы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnya, A.V. Glamazdin, I.S. Guk, S.G. Kononenko, M. Van der Wiel, J.I.M. Boutman, F.A. Peev, A.S. Tarasenko. "SALO" PROJECT. Kharkiv, "National Science Center Kharkiv Institute of Physics & Technology", 2005, p.104.
2. J.I.M. Boutman, Boling Xi, C.J. Timmermans, H.L. Hagedoorn "The EUTERPE facility" // *Rev. Sci. Instrum.* 1992, v.63(1), p.1569.
3. Ю.Л. Мартиросян. Исследование эффектов краевых магнитных полей в накопительных кольцах // *ЖТФ.* 2003, 73(10), с.113.
4. Е.Б. Левичев, П.А. Пименов. *Влияние краевого поля на нелинейный сдвиг бетатронной частоты.* Препринт ИЯФ СО РАН, 2000-14, 1999.
5. И.С. Гук, С.Г. Кононенко, Ф.А. Пеев, А.С. Тарасенко. Магнитооптическая система рециркулятора SALO с непрерывной регулировкой энергии в диапазоне 60...740 МэВ // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования».* 2010, в.67(3), с.44.
6. И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, В.И. Лященко, А.О. Мьщыков, В.П. Ромасько, А.С. Тарасенко, В.И. Щербинин. Дипольный магнит системы инжекции рециркулятора SALO // *Доклад на IX Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященном памяти профессора В.П. Саранцева,* Алушта, сентябрь, 2011.
7. H.A. Enge. Effect of Extended Fringing Fields on Ion Focusing Properties of Deflecting Magnets. // *Rep. Sci. Instrum.* 1964, v.35, p.278.

8. D.C. Carey, K.L. Brown, F. Rothacker. Third-Order TRANSPORT with MAD Input A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems // *FERMILAB-Pub-98*, 1998, p.310.

9. <http://mad.home.cern.ch/mad/>

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NON-LINEAR PARAMETERS OF DIPOLE AND QUADRUPOLE MAGNETS ON THE BEAM PARAMETERS IN RECIRCULATOR SALO

I.S. Guk, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

Because the magnet system of designed SALO recirculator consists of a large number of magnetic elements, it can be expected a significant effect of nonideality of these elements on expected parameters of the output beam. The investigation of this issue by mathematical modeling the particles dynamics is the goal of this work.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИПОЛЬНИХ І КВАДРУПОЛЬНИХ МАГНІТІВ НА ПАРАМЕТРИ ПУЧКА В РЕЦИРКУЛЯТОРІ SALO

I.S. Guk, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

Оскільки магнітна система рециркулятора SALO, що проектується, складається із значної кількості магнітних елементів, то цілком ймовірний істотний вплив неідеальності цих елементів на очікувані параметри пучка, що виводиться. Дослідженню цього питання методом математичного моделювання динаміки частинок присвячена ця робота.