

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SALO

И.С.Гук¹, А.Н.Довбня¹, С.Г.Кононенко¹, А.С.Тарасенко¹, J.I.M. Botman²

¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

²*Эндховенский технический университет, 5600 MB Эндховен, Нидерланды
E-mail: guk@kipt.kharkov.ua*

Приводятся сведения о существующих ускорительных установках Украины и их использовании в научных и прикладных исследованиях. Сформулированы основные требования к электронному ускорителю нового поколения, предназначенному для решения фундаментальных и прикладных исследований в ядерной физике. Приводится структура разрабатываемого в ННЦ ХФТИ ускорительного комплекса SALO на энергию до 730 МэВ. Он включает в себя два инжектора: источник поляризованных электронов и сильноточный источник на основе сверхпроводящей ВЧ-пушки. Ускоряющая система использует 12 сверхпроводящих ускоряющих секций TESLA. Магнитная система обеспечивает трехкратное прохождение пучка через ускоряющую структуру комплекса. Принятая схема рециркуляции пучка позволяет достаточно просто осуществить вывод пучка на несколько рабочих станций, предназначенных для решения задач в различных областях физики: экспериментальной ядерной физике, физике лазеров на свободных электронах, в области получения медицинских изотопов, физике радиационных повреждений, взаимодействия пучков электронов с периодическими структурами и др.

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних лет атомные электростанции Украины вырабатывают более 50% электроэнергии страны, поэтому подготовке специалистов, способных решать научно-технические проблемы атомной энергетики необходимо уделять достаточное внимание. К сожалению, в последние 15 лет в Украине наметились опасные тенденции в подготовке специалистов по одному из важнейших направлений исследований – ядерной физике. Основой ядерно-физических исследований являются экспериментальные исследования по взаимодействию пучков электронов, протонов, нейтронов и более тяжелых частиц с ядрами атомов, из которых состоит весь окружающий нас мир. Такие эксперименты дают возможность получить как фундаментальные знания о природе ядерных сил, синтезировать новые элементы, так и решать ряд важных задач по утилизации радиоактивных продуктов жизнедеятельности атомных электростанций и поиску новых технологий производства препаратов для диагностики и лечения онкологических заболеваний.

На пороге 90 годов прошлого столетия на территории Украины были расположены и работали на физические программы два крупнейших линейных ускорителя электронов – ЛУ-2000 и ЛУ-300 на энергию 2000 и 300 МэВ (ННЦ ХФТИ), а также несколько линейных ускорителей на энергию меньше 40 МэВ (ХФТИ) и микротрон на 25 МэВ в Ужгороде. В ИЯИ (Киев) работали: изохронный циклотрон У-240, позволяющий получать протоны и дейтроны с энергией до 80 МэВ, циклотрон У-120, позволяющий получать протоны с энергией 6.8 МэВ, дейтроны – 13.6 МэВ и альфа-частицы с энергией 27.2 МэВ. В ХФТИ и ИЯИ работали электростатические ускорители протонов и дейтронов на энергии до 10 и 15 МэВ. На Харьковском ускорителе тяжелых ионов ЛУМЗИ можно было ускорять ионы гелия, азота и аргона до энергий 8,5 МэВ/нуклон.

Несмотря на то, что большинство установок создавались в 50–60 годах и к этому времени морально и физически устарели, исследования на этих ускорителях охватывали практически все актуальные области ядерно-физических исследований и позволяли готовить специалистов высокой квалификации – кандидатов и докторов наук.

В начале 90-х все большие ускорители были остановлены. В первую очередь это было связано с энергетическими проблемами и прекращением выпуска важных комплектующих для этих ускорителей. В связи с этим резко сузился объем экспериментальных исследований по фундаментальным и прикладным проблемам ядерной физики, из этих исследований ушли молодые исследователи, потерявшие возможность научного роста, образовался почти пятнадцатилетний провал, который грозит исчезновением огромного опыта, накопленного в ХФТИ в этой области исследований предыдущими поколениями физиков. В связи с этим, Ученым советом Института физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ ХФТИ в 2002 году были инициированы работы по разработке программы актуальных исследований в ядерной физике с применением электронных пучков с энергией до 1 ГэВ [1] и разработке проекта ускорителя, на котором такую программу можно было бы реализовать [2].

В основу этого проекта положена схема рециркулятора с трёхкратным прохождением пучка через сверхпроводящую ускоряющую структуру [2–4]. На каналах вывода пучка в экспериментальные залы можно получать квазинепрерывные пучки неполяризованных и поляризованных электронов с энергией до 730 МэВ и током до 100 мкА. Для этого предполагается использовать ВЧ-пушку со сверхпроводящей ускоряющей структурой и источник поляризованных электронов на основе арсенида галлия [3,4]. Для ряда прикладных исследований предусмотрен режим работы ускорителя с энергией до 130 МэВ и током 1 мА [5].

Разработаны эскизные проекты всех дипольных и квадрупольных магнитов комплекса и эскизный проект магнитной системы рециркулятора [3,6].

Последние два года основное внимание уделялось совершенствованию магнитной структуры рециркулятора и изучению влияния пространственной и хроматической аберрации на параметры циркулирующего и выводимого пучка рециркулятора SALO.

2. ИЗМЕНЕНИЕ СХЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

Для ядерно-физических исследований, использующих пучки, выводимые из рециркулятора SALO, необходима плавная регулировка энергии на всех каналах вывода пучка. При постоянной энергии инжекции из-за особенности магнитооптической структуры рециркулятора SALO, а именно использование одних и тех же магнитов в качестве как разъединяющих, так и поворачивающих для первого и второго оборота рециркуляции, накладываются определенные ограничения на диапазон регулировки энергии выводимого пучка при постоянной энергии инжекции. Изменение энергии инжекции приводит к искажению равновесной орбиты пучка на втором кольце рециркуляции, которое имеет предел, связанный с конечной апертурой магнитных элементов, что ограничивает диапазон регулировки энергии рециркулятора. В работе [7] исследовались возможные схемы инжекции, позволяющие производить плавную регулировку энергии пучка на всех каналах вывода пучка из рециркулятора от минимальной – 59.5 МэВ до максимальной 730 МэВ.

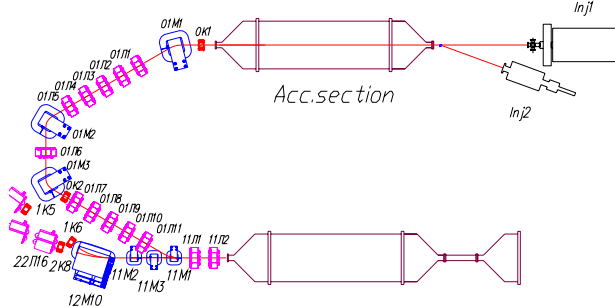


Рис.1. Система инжекции для диапазона изменения энергии 6,66...20 МэВ

Было показано, что наиболее целесообразно использование для ускорения пучков электронов после инжекторов дополнительного ускоряющего модуля (Acc.section). На Рис.1 представлен выбранный вариант схемы инжекции в диапазоне 6.66...20 МэВ, обладающий хорошими параметрами пучка на выходе инжекционного тракта, и имеющий наименьшее количество магнитных элементов.

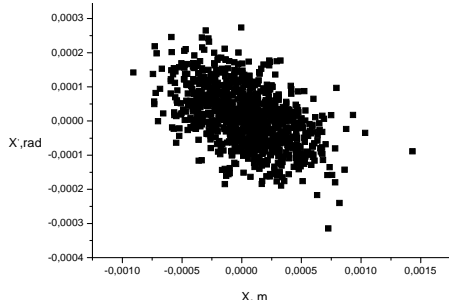


Рис.2. Фазовый портрет пучка на плоскостях x, x'

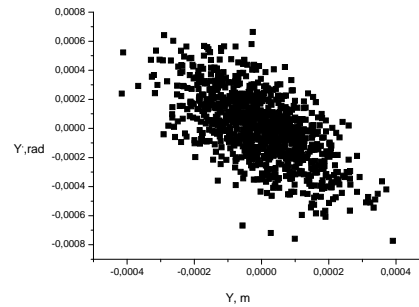


Рис.3. Фазовый портрет пучка на плоскостях y, y'

На Рис.2 и 3 приведены фазовые портреты пучка для энергии инжектируемого пучка 20 МэВ на входе в ускоряющую структуру рециркулятора.

3. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯТОРА

С целью улучшения параметров пучка на всех этапах ускорения была проведена оптимизация магнитооптической системы первого и второго кольца рециркуляции. Особое внимание было уделено второму обороту, поскольку выбранная ранее структура имела большое значение вертикальной β -функции и большую частотную производную дисперсионной функции [8]. Вариация геометрии структуры этого кольца позволила не только существенно улучшить фокусировку пучка, но и отказаться от сильных квадрупольных магнитов, которые были введены в структуру для уменьшения огибающей на этом участке. На Рис.4 и 5 приведены амплитудные и дисперсионная функции фокусировки для второго кольца после оптимизации.

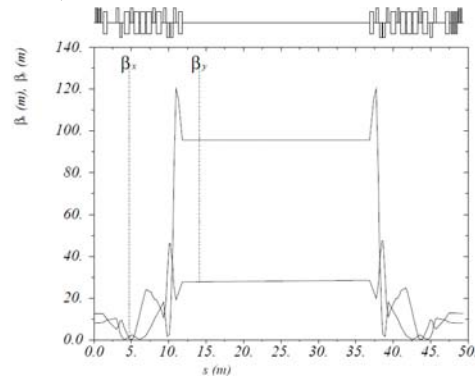


Рис.4. Амплитудные β_x - и β_y -функции фокусировки для второго кольца

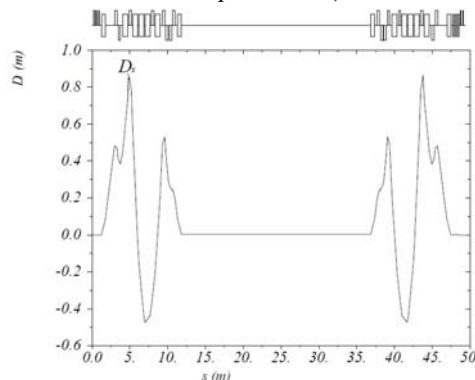


Рис.5. Дисперсионная функция фокусировки D_x для второго кольца

Новая структура магнитооптической системы рециркулятора представлена на Рис.6.

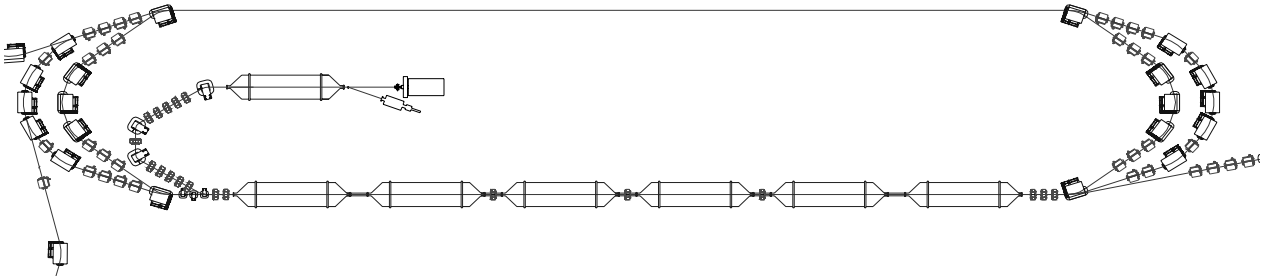


Рис.6. Магнитооптическая система рециркулятора после оптимизации

На Рис.7 и 8 представлены фазовые портреты пучка на выходе ускорителя в двух плоскостях при энергии инжекции 20 МэВ и конечной энергии 730 МэВ, а на Рис.9 – энергетический разброс пучка, рассчитанный для параметров источника неполяризованных электронов [3].

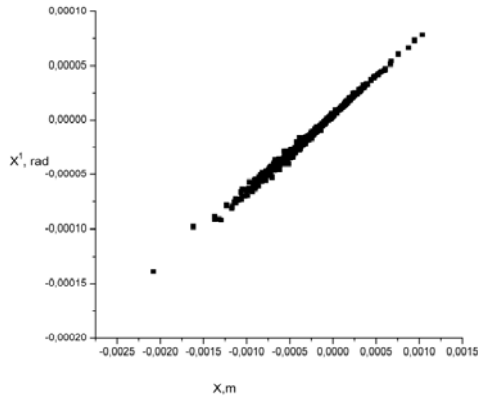


Рис.7. Фазовый портрет пучка на выходе ускорителя на плоскостях x', x

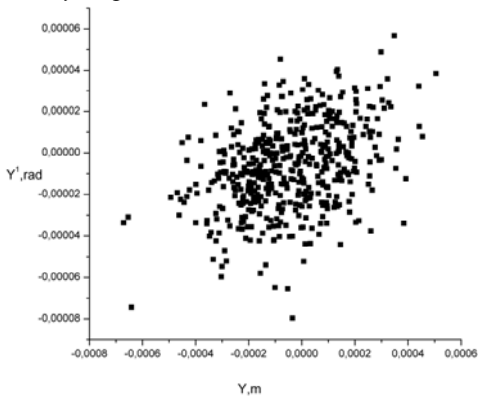


Рис.8. Фазовый портрет пучка на выходе ускорителя на плоскостях y', y

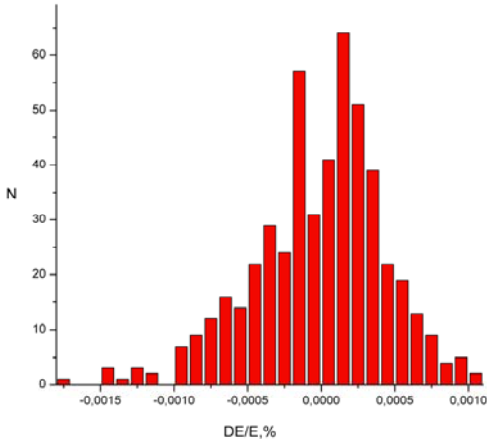


Рис.9. Энергетический разброс пучка на выходе ускорителя

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ ДО ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА, ВЫВОДИМОГО ИЗ РЕЦИРКУЛЯТОРА

Особенностью магнитооптической системы (МОС) рециркулятора является наличие большого числа дипольных магнитов, что делает её неосесимметричной. Поэтому, в отличие от осесимметричной, такая система может иметь aberrации второго порядка, которые могут играть определяющую роль в изменении эмиттанса. Методом численного моделирования с помощью программы TRANSPORT [9] исследовалось влияние aberrаций второго и третьего порядка, обусловленных неидеальностью МОС на характеристики пучка, выводимого из установки с максимальной энергией.

На основании геометрических характеристик дипольных магнитов были определены максимальные значения нелинейностей, обусловленных краевыми полями. В качестве модели распределения краевого поля дипольных магнитов использовалось, так называемое, «необостренное» (unclamped) распределение Роговского.

Мультипольные составляющие ведущего поля дипольных магнитов типа EUTERPE, из которых состоит первое кольцо рециркулятора, определялись из данных измерений, представленных в [10], и, с учетом геометрии, пересчитывались для магнитов других типов.

На Рис.10 представлены результаты моделирования действия монохроматической aberrации второго и третьего порядков, которую, по аналогии с оптическими системами, можно условно назвать сферической, на поперечные размеры пучка в точке вывода пучка для идеальной МОС рециркулятора и МОС, приближенной к реальной.

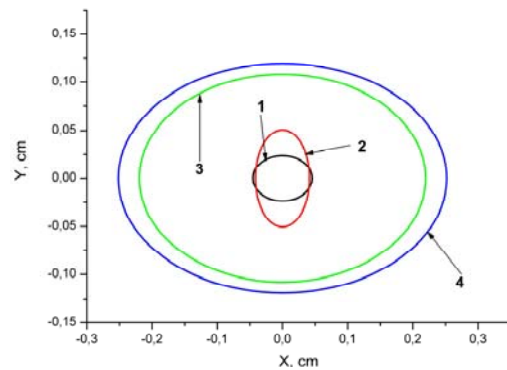


Рис.10. Поперечные размеры пучка в точке вывода из рециркулятора в каналы с максимальной энергией 730 МэВ

Кривая 1 соответствует учёту первого и второго порядков для магнитов с прямоугольной формой распределения поля, кривая 2 получена для первого порядка с принятой формой распределения магнитного поля, кривая 3 получена для второго порядка с краевым полем, а 4 кривая посчитана для третьего порядка с учётом краевых полей.

Максимальные отклонения центрoида пучка по углу и координате равнялись половине значения соответствующего начального размера и расходимости пучка и составляли, соответственно, 2 мм и 0.03 мрад.

Полученные результаты указывают на необходимость учёта влияния нелинейностей полей и поиска методов подавления этих эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Буки, В.Б. Ганенко, А.Ю. Корчин и др. *Фундаментальные и прикладные исследования на линейном ускорителе рециркуляторе электронов с энергией 730 МэВ (Проект SALO), часть 1*. НИЦ ХФТИ, Харьков, 2006, с.116.
2. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnaya, A.V. Glamazdin, I.S. Guk, et al. "SALO" project. Kharkiv, National Science Center Kharkov Institute of Physics, Technology, 2005, p.104.
3. A.N. Dovbnaya, I.S. Guk, S.G. Kononenko, et al. Accelerating Complex for Basic Researches in the Nuclear Physics // *Proc. of the 2-nd Intern. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy"*, 2008, Ukraine, Kyiv, 2009, p.790-795.
4. A.N. Dovbnaya, I.S. Guk, S.G. Kononenko, et al. Recirculator SALO Project in NSC KIPT // *Proc. of EPAC08*, Genoa, Italy, p.2710-2712.
5. A.N. Dovbnaya, I.S. Guk, S.G. Kononenko, et al. Variants of Use Superconducting Electron Accelerator SALO as a Driver of Subcritical Assembly // *The Journal of Kharkov National University, Physical series "Nuclei, Particles, Fields"*, Issue 4/36/, 2007, v.784, p.15-23.
6. И.С. Гук, А.Н. Довбня, Г.Г. Ковалёв и др. Эскизный проект электромагнитной системы рециркулятора SALO // *Вісник Харківського Університету, №784, Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*, вип.4/36/, 2007, с.3-14.
7. I.S. Guk, S.G. Kononenko, F.A. Peev, A.S. Tarasenko. Change of the Plan of Beam Injection in Recirculator SALO // *Proc. of RuPAC 2008*, Zvenigorod, Russia, p.327-329.
8. I.S. Guk, A.N. Dovbnaya, S.G. Kononenko, et al. Isochronous Magneto-optical Structure of Recirculator SALO // *Proc. of EPAC*. Edinburg, Scotland, 2006, p.2035-2037.
9. K.L. Brown, D.C. Carey, F. Rothacker. *Third-Order TRANSPORT with MAD Input A Computer Program for Designing Charged Particle Beam*, FERMLAB-Pub-98/310, 1998.
10. Boling Xi, J.I.M. Botman, C.J. Timmermans, H.L. Hagedoorn, Design study of storage ring EU-TERPE // *Nucl. Instr. and Meth.* B68 (1992), p.101.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

THE STATUS OF WORK ON DESIGNING ELECTRON ACCELERATING COMPLEX SALO

I.S. Guk, A.N. Dovbnaya, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko, J.I.M. Botman

The information on existing accelerating facilities in Ukraine and their use in scientific and applied researches is given. The basic requirements to the new generation of electron accelerator for fundamental and applied researches in a nuclear physics are proved. The description developed in NSC KIPT the accelerating complex SALO on energy to 730 MeV is given. It includes two injectors: the source of polarized electrons and high-current electron source on the basis of superconducting RF gun. The accelerating system will consist of 12 superconducting accelerating sections TESLA. The magnetic system provides the triple beam passage through the complex accelerating structure. The accepted circuitry with beam recycling allows to carry out simply enough the beam output to some workstations intended for solution problems in various areas of physics: the fundamental nuclear physics, physics of free electron lasers, reception of medical isotopes, physics of radiative damages, interaction of electrons with periodic structures and others.

СТАН СПРАВ ПО СТВОРЕННЮ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ SALO

I.S. Guk, A.M. Dovbnia, S.G. Kononenko, O.S. Tarasenko, J.I.M. Botman

Приводяться відомості про існуючі прискорювальні установки України та їх використання в наукових та прикладних дослідженнях. Сформульовані основні вимоги до електронного прискорювача нового покоління, який би відповідав вимогам проведення сучасних фундаментальних та прикладних досліджень в ядерній фізиці. Приводиться структура розроблюваного в НИЦ ХФТИ прискорювального комплексу SALO на енергію до 730 МєВ. Він включає в себе два інжектори: джерело поляризованих електронів та сильноточне джерело на основі надпровідної ВЧ-гармати. Прискорююча система містить 12 надпровідних секцій TESLA. Магнітна система забезпечує триразове проходження пучка через прискорюючу структуру комплексу. Запропонована схема рециркуляції пучка дозволяє досить просто вивести пучок на декілька робочих станцій, які призначені для вирішення задач в експериментальній ядерній фізиці, фізиці лазерів на вільних електронах, одержанні медичних ізоотопів, фізиці радіаційних пошкоджень та інших.