

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

УДК 621.384.6

РЕЦИРКУЛЯТОР SALO. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

И.С. Гук¹, А.Н. Довбня¹, С.Г. Кононенко¹, Ф.А. Пеев¹, J.I.M. Botman²

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

*²Эйндховенский технический университет, Эйндховен, Нидерланды
E-mail: guk@kipt.kharkov.ua*

Представлены результаты исследований по созданию проекта ускорительного комплекса с энергией до 740 МэВ с непрерывным пучком электронов для работ по физике высоких энергий и ядерной физике. Выбраны технологические и схемные решения для инжекторов, высокочастотной системы комплекса. Обоснован выбор магнитооптической схемы рециркулятора и каналов вывода пучка. Исследована динамика пучка в установке и параметры выведенного пучка.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная физика является экспериментальной наукой, изучающей структуру атомного ядра и превращения, которые происходят в нём в результате ядерных процессов под действием как внешних, так и внутренних причин. На данный момент в Украине практически отсутствует экспериментальная база, в первую очередь ускорители частиц, для проведения исследований во всём диапазоне энергий, представляющих интерес для ядерной физики и прикладных исследований в этой области. Поэтому в 2003 году решением Ученого совета ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ была поставлена задача по выбору перспективных направлений в создании базовой ускорительной установки ННЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий [1 - 4]. Эта работа выполнялась совместно с Эйндховенским техническим университетом (королевство Нидерланды) на основе соглашения о совместном создании в ННЦ ХФТИ ускорителя, отвечающего требованиям современного физического эксперимента. В результате проведенных исследований наиболее перспективной для будущей установки признана схема рециркулятора с использованием сверхпроводящей ускоряющей структуры TESLA, разработанной для международного сверхпроводящего линейного коллайдера электронов. Предлагаемый вариант ускорителя позволяет получить не только непрерывные поляризованные пучки электронов, необходимые для проведения экспериментов по фундаментальным и прикладным проблемам ядерной физики и физики высоких энергий. На основе этого ускорителя может быть создан мощный источник нейтронов с рядом уникальных характеристик. Такой источник крайне необходим для решения большого числа задач ядерной энергетики, медицины, биологии и других областей науки и техники. На ускорителе также будут созданы условия для исследований в области мощных лазеров на свободных электронах и производства диагностических изотопов для медицины.

В работе приведены основные решения, принятые в результате проведенных исследований для реализации проекта ускорителя.

1. РАСПОЛОЖЕНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

С целью уменьшения затрат на капитальное строительство для размещения комплекса выбран зал мишени, а для вывода пучка – существующие каналы вывода пучка в зал магнитных спектрометров и прилегающие к залу мишени канал параллельного переноса линейного ускорителя ЛУ 2000 и зал загрузки [1 - 4]. Общий вид комплекса (и возможных каналов вывода пучка) представлен на Рис. 1. В зал спектрометров может быть выведен пучок с энергией от 50 МэВ до максимальной энергии 740 МэВ, которую пучок получит при трёхкратном прохождении ускоряющей структуры, расположенной в прямолинейном промежутке рециркулятора (максимальный градиент ускоряющего поля принят равным 20 МэВ/м). Далее с помощью системы магнитов пучок может быть направлен в один из каналов (А, В, С) с возможностью реализации программ в области ядерной физики, лазера на свободных электронах и нейтронного источника [4]. При двукратном прохождении через ускоряющую структуру пучок может с использованием магнитной структуры рециркулятора направлен в канал Е (зал загрузки) или канал D (канал параллельного переноса линейного ускорителя). Максимальная энергия пучка в этих залах может достигать 490 МэВ. В этих залах может осуществляться программа по ядерной физике и лазера на свободных электронах. При установке ондулятора FEL во второй длинный прямолинейный промежуток возможна работа на программу по ядерной физике на канале D и получение излучения из лазера в зале Е. При однократном прохождении через ускоряющую структуру с пониженным ускоряющим градиентом (≈ 10 МэВ/м) возможно получение мощных пучков электронов (с непрерывной мощностью до 130 кВт) для исследований со вторичными пучками нейтронов, для чего электроны могут быть направлены по каналам N1-N3 [5].

Использование инжектора с поляризованными электронами позволит получить квазинепрерывные поляризованные пучки в залах А, В, С, D и Е.



Рис. 4. Ускоряющий модуль фирмы ACCEL

Последние разработки технологии производства секций TESLA дают уверенность на существенный рост ускоряющего градиента секций нового поколения. Замена клистронов на твердотельные усилители уменьшит стоимость источников ВЧ почти вдвое при существенном повышении надёжности оборудования [7].

Размеры пучка после первого прохождения ускоряющей структуры приведены на Рис. 5.

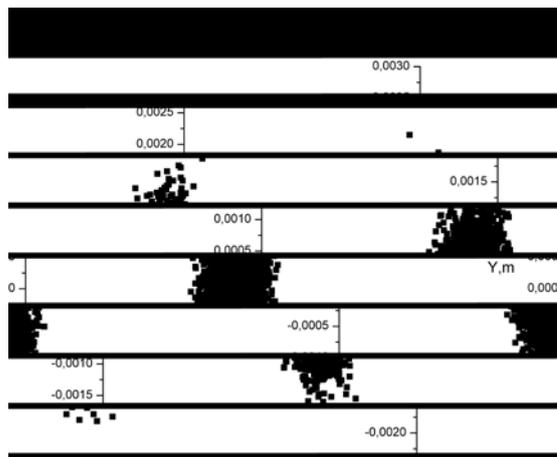


Рис. 5. Поперечные размеры пучка

4. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯТОРА

На Рис. 6 приведена магнито-оптическая структура рециркулятора SALO. Эта структура была выбрана в результате оптимального подбора пространственного расположения и силы магнитных элементов с целью получения на выходе каналов пучков с заданными параметрами.

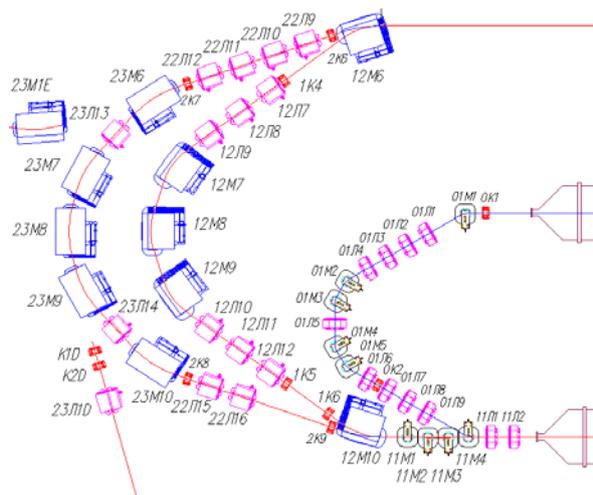
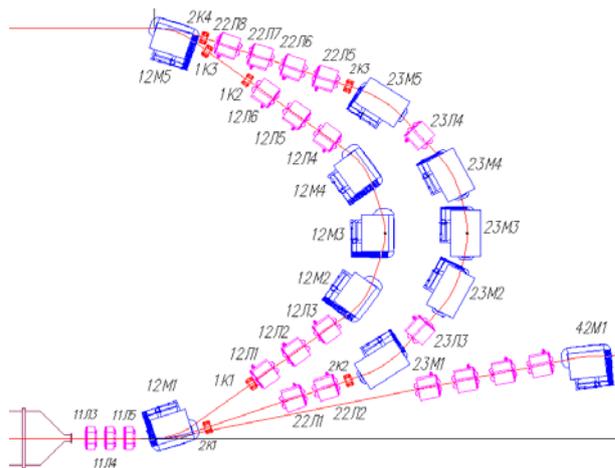


Рис. 6. Магнитооптическая система рециркулятора

Дуплет квадрупольных линз 11Л1, 11Л2 и триплет 11Л3-11Л5, расположенных до и после ускорителя, позволяют компенсировать дефокусировку пучка в ускоряющей структуре и осуществить его тонкую настройку на входе в структуру после первого оборота, не изменяя режимов магнитной системы арок первого и второго поворотов. Максимальный градиент, необходимый для выполнения указанных процедур, не превышает 4,4 Тл/м.

Точка на входе в магнит 12М1 является исходной для реализации первых каналов вывода пучка из рециркулятора.

Основными требованиями к выбору структуры и режимов работы магнитных элементов дуг первого кольца являлись ахроматичность, изохронность и устойчивость движения пучка в структуре. Длина равновесной траектории пучка выбрана кратной длине волны ускоряющего поля для обеспечения прихода электронных банчей в ускоряющую струк-



туру синхронно с инжектируемым пучком, при этом учитывалось изменение длины траектории, вносимое наличием змейки магнитов 11М1-11М4. Углы поворота пучка во всех магнитах одинаковые и равны 36°. В составе кольца – 10 дипольных магнитов – 12М1-12М10 и 12 квадрупольных линз – 12Л1-12Л12. Максимальное поле в дипольных магнитах – 1,02 Тл, максимальный градиент линз – 9,2 Тл/м.

Размеры пучка при движении по первому кольцу рециркуляции на выходе из магнита 12М5 и на входе в ускоряющую структуру приведены на Рис. 7, 8.

К выбору параметров магнитной системы второго кольца рециркуляции предъявлялись те же требования, что и для первого, как по геометрии, так и по оптимизации режимов. Особенностью этого кольца является отсутствие места для размещения квадрупольных линз на участке, примыкающем к каналу вывода пучка в зал СП-103. Это связано с тем, что магниты 12М1, 12М5, 12М6 и 12М10 используются

как поворотные, так и разделяющие кольца рециркуляции. Магнит 12M1 используется также для вывода пучка на максимальной энергии.

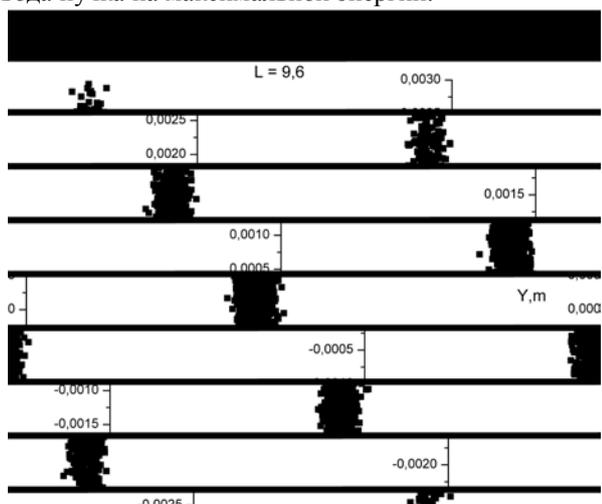


Рис. 7. Размеры пучка на выходе из магнита 12M5

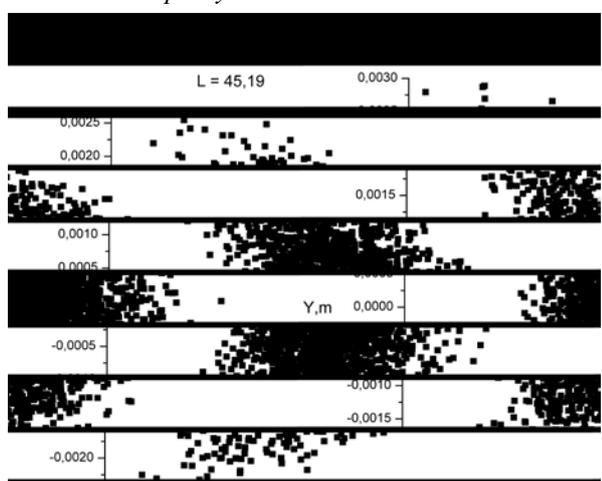


Рис. 8. Размеры пучка на входе в ускоритель

Угол поворота пучка в магнитах 23M1-23M10 равен $28,516^\circ$. Максимальное значение индукции поля в дипольных магнитах этого кольца достигает величины 1,25 Тл, а градиент квадрупольных линз – 15,6 Тл/м.

После прохождения ускоряющих структур второй раз энергия электронов достигает величины около 500 МэВ.

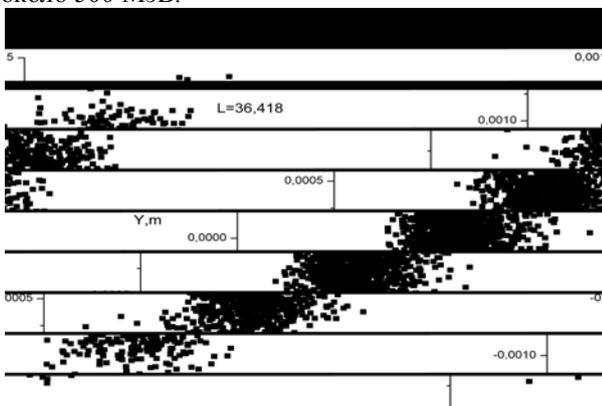


Рис. 9. Поперечные размеры пучка после магнита 12M6

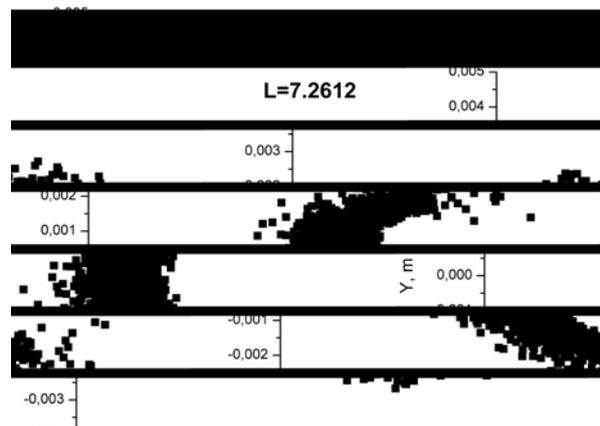


Рис. 10. Размеры пучка на входе в зал СП 103

Размеры пучка на втором кольце после дипольного магнита 12M6 представлены на Рис. 9.

Максимальную энергию электроны получают при третьем прохождении ускорителя. После этого пучок может быть выведен в зал СП 103.

Размеры пучка после дипольного магнита 42M1 представлены на Рис. 10.

При изучении движения пучка в выбранной магнитооптической системе для получения результатов, наиболее приближенных к реально реализуемым в будущей установке, использовались значения эффективной длины дипольных магнитов, квадрупольные и секступольные составляющие поля дипольных магнитов, полученные из экспериментально измеренных распределений полей в магнитах, а также модели описания полей в диполях и квадрупольях, широко используемые в литературе, показавшие хорошее совпадение с экспериментально измеренными характеристиками этих магнитных элементов [4].

Было установлено, что наблюдаемые распределения плотности пучка в различных точках траектории объясняются влиянием секступольных составляющих поля дипольных магнитов на движение пучка в системе. Это влияние несущественно изменяет размеры пучка и не требует специальной компенсации [4].

В целом полученные параметры пучка на выходе каналов транспортировки удовлетворяют требованиям экспериментов, которые планируется проводить на установке [4, 8].

Проведенные исследования позволили определить требования к магнитным элементам установки и разработать их эскизные проекты. Создан опытный образец дипольного магнита системы инжекции и змейки, исследованы его характеристики. Адаптированы для использования в проекте переданные Эйндховенским университетом дипольные и квадрупольные линзы накопительного кольца EUTERPE.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования составляют основу для дальнейшей разработки систем рециркулятора и подготовки к реализации проекта в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко. *Выбор варианта базовой ускорительной установки НИЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий*: Препринт ХФТИ 2003-3, Харьков: НИЦ ХФТИ, 2003, 72 с.
2. Ю.М. Аркатов, А.В. Гламаздин, И.С. Гук и др. *Базовая ускорительная установка НИЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий, THE "SALO" PROJECT*. Харьков: НИЦ ХФТИ, 2004, 94 с.
3. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnya, A.V. Glamazdin, et al. *"SALO" project*. Kharkov: NSC KIPT, 2005, 104 p.
4. И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, Ф.А. Пеев, J.I.M. Botman. *Базовая ускорительная установка НИЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий, физическое обоснование*. Харьков: НИЦ ХФТИ, 2014, 225 с.
5. A.N. Dovbnya, 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"*. 2007, v. 784, issue 4/36/, p. 15-23.
6. Peter vom Stein, Stefan Bauer, Michael Pekeler, et al. *Nuclear size and structures Fabrication and installation of superconducting accelerator modules for the ERL prototype (ERLP) at DARESBURY // Proc. of EPAC 2006*. Edinburg, Scotland. 2006, p. 178-180.
7. H. Büttig, A. Arnold, A. Büchner, et al. *RF power upgrade at the superconducting 1.3 GHz CW LINAC "ELBE" with solid state amplifiers // NIM*. 2013, v. A704, p. 7-13.
8. 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*. Харьков: НИЦ ХФТИ, 2006, 116 с.

Статья поступила в редакцию 14.10.2015

RECIRCULATOR SALO. THE PHYSICAL FOUNDATION

I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, F.A. Peev, J.I.M. Botman

It is presented the results of research carried out for the creation of a modern accelerator complex that could solve fundamental and applied problems of nuclear physics. It is selected and optimized scheme of magneto-optical system that meets all the requirements of the experiments with beams. Designs of magnetic devices have been developed and pre-production models have been made. Examination of influence non-linear component of magnet fields on beam parameters on an accelerator exit has been spent.

РЕЦИРКУЛЯТОР SALO. ФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

I.S. Guk, A.M. Dovbnya, S.G. Kononenko, F.A. Peev, J.I.M. Botman

Представлено результати досліджень із створення проекту прискорювального комплексу з енергією до 740 МеВ з безперервним пучком електронів для робіт з фізики високих енергій і ядерної фізики. Обрано технологічні і схемні рішення для інжекторів, високочастотної системи комплексу. Обґрунтовано вибір магнітооптичної схеми рециркулятора і каналів виводу пучка. Досліджено динаміку пучка в установці і параметри виведеного пучка.