

**ПРОЕКТ SALO (СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**

*А.Н. Довбня<sup>1</sup>, И.С. Гук<sup>1</sup>, С.Г. Кононенко<sup>1</sup>, М. van der Wiel<sup>2</sup>, J.I.M. Botman<sup>2</sup>, Ф.А. Пеев<sup>1</sup>,  
А.С. Тарасенко<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
Харьков, 61108, Украина*

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

В 2003 году в ННЦ ХФТИ начата работа по разработке проекта рециркулятора SALO, состоящего из инжектора электронов на основе сверхпроводящей ВЧ-пушки, источника поляризованных электронов со сверхпроводящим ускоряющим модулем, системы инъекции пучка в рециркулятор, ускоряющей системы на основе сверхпроводящих ускоряющих секций TESLA, двух колец рециркуляции пучка. Максимальная энергия ускоренных электронов – 730 МэВ при токе менее 100 мкА. Разработаны варианты транспортировки пучка на физические установки. Разработан эскизный проект электромагнитного оборудования ускорительного комплекса.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Согласно решению учёного совета Института физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ ХФТИ, в 2002 году была создана рабочая группа по выбору основных направлений разработки ускорителя электронов, который бы являлся базовой установкой ИФВЭИЯФ на будущее десятилетие.

В 2003 году было подписано соглашение с Эндховенским техническим университетом (Королевство Нидерланды), безвозмездно передавшим ИФВЭИЯФ часть оборудования накопительного кольца EUTERPE, о совместной работе над будущим проектом.

Изучение мирового опыта создания современных ускорительных установок [1-3] привело к убеждению, что использование последних достижений в области создания сверхпроводящих ускоряющих структур в сочетании с идеей многократного прохождения пучка через ускоряющую структуру, позволяет создать достаточно компактную установку на энергию порядка 730 МэВ [4]. Эта установка может быть размещена в существующих помещениях ускорительного комплекса ЛУ-2000, что не потребует капитального строительства и существенно уменьшит общую стоимость комплекса. Электронные и фотонные пучки, получаемые на этой установке, могут быть использованы в существующих экспериментальных залах, кроме того, имеется возможность создания новых пучковых линий.

**2. СТРУКТУРА РЕЦИРКУЛЯТОРА**

Базовая установка ИЯФВЭ ННЦ ХФТИ – электронный рециркулятор SALO на максимальную энергию 730 МэВ, проектируется, в первую очередь, как установка для фундаментальных исследований в области ядерной физики [2]. Одно из перспективных направлений экспериментальных исследований на новой установке ННЦ ХФТИ может быть связано с прецизионными исследованиями процессов фото- и электрообразования пионов, комптоновского рассеяния на нуклонах и ядрах, с исследованием влияния ядерной среды на свойства адронов и их взаимодействия в ядерной материи, изучением трехчас-

тичных сил и мезонных обменных токов в ядрах. Другое перспективное направление, которое можно развивать, связано с исследованием взаимодействия электронов с периодическими структурами и созданием новых источников интенсивного и поляризованного излучения [5].

Являясь базовой установкой ИФВЭИЯФ, проектируемая установка должна генерировать пучки, удовлетворяющие наиболее широкому классу экспериментов, которые могут быть выполнены на пучках с энергией до 730 МэВ, в том числе и для прикладных исследований. В связи с этим установку планируется оснастить инжекторами как поляризованных, так и неполяризованных электронов. Для уменьшения времени, необходимого для создания установки, предполагается использовать богатый опыт, накопленный в ведущих мировых центрах по созданию инжекторов и ускоряющих систем.

В качестве прототипа источника поляризованных частиц выбран инжектор, разработанный для установки SEBAF [6], являющийся в настоящее время лучшим в своём классе источников. Поскольку энергия электронов на выходе этого источника не превышает 100 кэВ, в состав инжектора будет включена ускоряющая секция, позволяющая увеличить энергию электронов до 9.5 МэВ.

В качестве прототипа источника неполяризованных электронов выбран инжектор, разрабатываемый на протяжении нескольких лет в центре ELBE в Розендорфе (Германия) [7]. Сверхпроводящая ускоряющая структура инжектора на частоту 1.3 ГГц изготовлена фирмой ACCEL (Германия) [8]. Предполагается изготовление серии инжекторов после проведения испытаний головного образца для линейного ускорителя ELBE. Максимальная энергия электронов на выходе инжектора 9.5 МэВ.

Для ускорения электронов выбрана сверхпроводящая ускоряющая структура TESLA на частоту 1.3 ГГц, разработанная в DESY [9]. Эта структура позволяет получить планируемый для нашей установки ускоряющий градиент 20 МэВ/м и минимальный энергетический разброс. Для нашей установки мы выбрали модуль, содержащий две стандартные

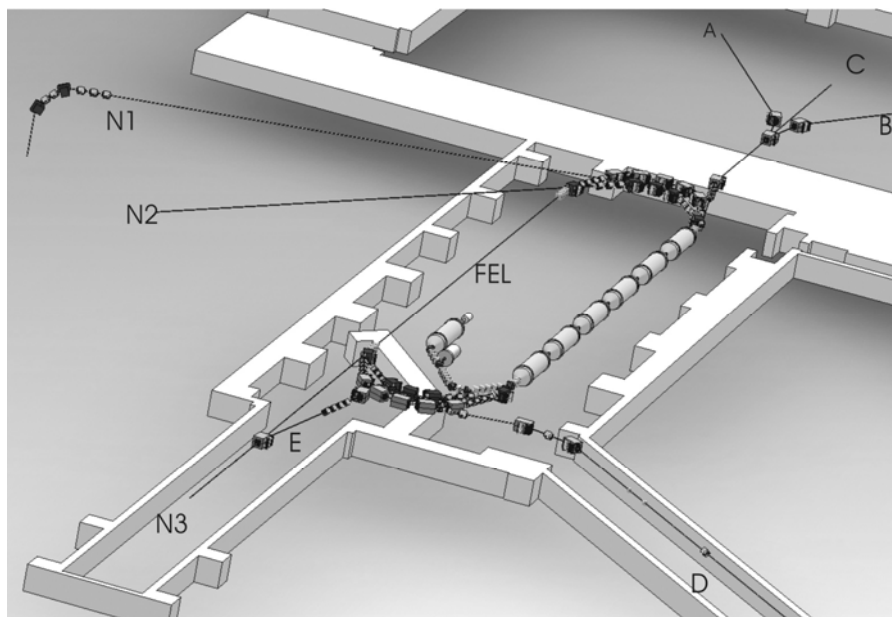


Рис.1. Общая схема рециркулятора SALO на максимальную энергию 730 МэВ

секции TESLA, изготавливаемый серийно фирмой ACCEL [9]. Шесть таких модулей будут располагаться в большом прямолинейном промежутке рециркулятора, один будет использоваться в инжекторе поляризованных электронов.

На Рис.1 показана схема размещения рециркулятора в мишенном зале ускоряющего комплекса ЛУ2000 с каналами вывода пучка и прилегающими помещениями.

### 3. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO

На основе проведенных исследований [2, 4] были сформулированы следующие основные требования к системе инжекции и магнитооптической структуре (МОС) рециркулятора:

- инжекция пучка в установку должна осуществляться с помощью петли (chicane) из трёх магнитов (см., например, [3]), что позволяет максимально пространственно развязать инжектируемый и циркулирующий пучки;
- длина траектории пучка на каждом обороте рециркуляции должна быть кратна длине волны сверхпроводящего ускорителя ( $\lambda = 23.060961$  см);
- на длинных прямолинейных промежутках должно выполняться условие ахроматичности;
- для траекторий пучка на всех четырёх арках должно выполняться условие изохронности.

Для инжекции используется магнит, входящий в состав петли из трёх магнитов. Три дипольных магнита, расположенные перед ускоряющей секцией, вызывают слабый изгиб траектории для основного пучка и позволяют производить инжекцию 9.5 МэВ пучка, минуя магниты арок.

Четыре дипольных магнита на тракте инжекции и три магнита в «chicane» имеют одинаковую конструкцию. 14 квадрупольных линз, используемых на тракте инжекции, и четыре линзы, установленные на длинном прямолинейном промежутке рециркулятора, идентичны. Общий вид этих элементов показан на Рис.2 и 3.

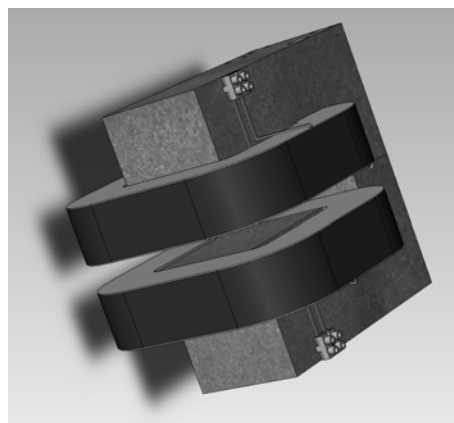


Рис.2. Общий вид дипольного магнита инжекционного тракта

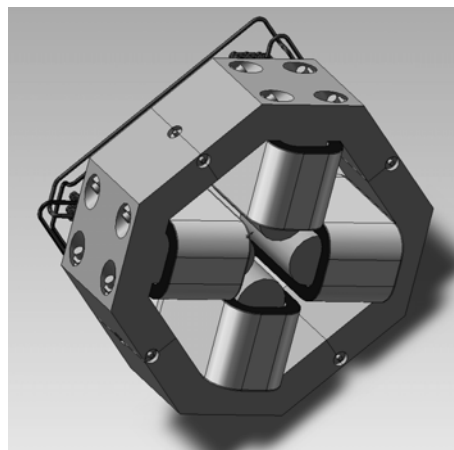


Рис.3. Общий вид квадрупольного магнита инжекционного тракта

Из-за необходимости вывода пучка в зал СП-103 [2] была изменена первоначальная структура второго оборота рециркуляции [4] – удалены две квадрупольные линзы.

На Рис.4,5 приведены амплитудные и дисперсионная функции фокусировки второго оборота рециркуляции после этой операции.

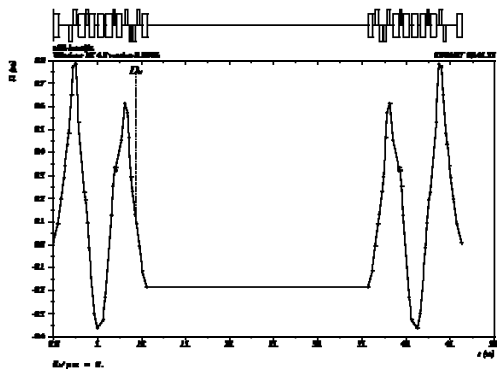


Рис.4. Структура второго оборота рециркуляции и дисперсионная функция фокусировки

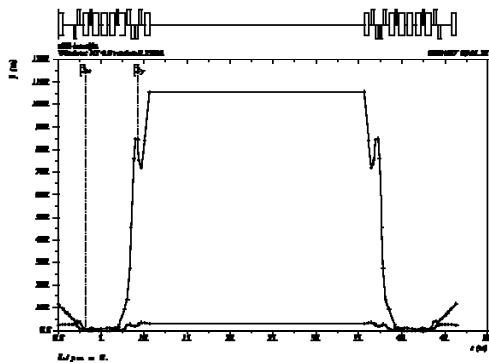


Рис.5. Структура второго оборота рециркуляции и амплитудные функции фокусировки

В МОС первого оборота используются 12 квадрупольных линз из 32 накопительного кольца EUTERPE, переданных НИЦ ХФТИ Эндховенским техническим университетом [2].

В состав МОС второго оборота кроме магнитных элементов накопительного кольца EUTERPE входят дипольные магниты и сильные квадрупольные. Конструкция этих магнитных элементов разработана специально для рециркулятора SALO (см. Рис.6,7).

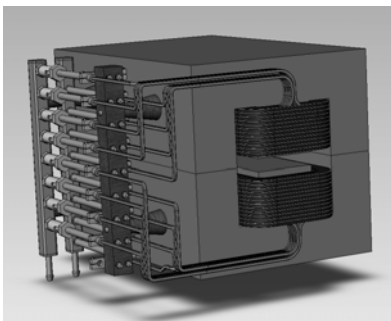


Рис.6. Общий вид дипольного магнита второго оборота рециркуляции

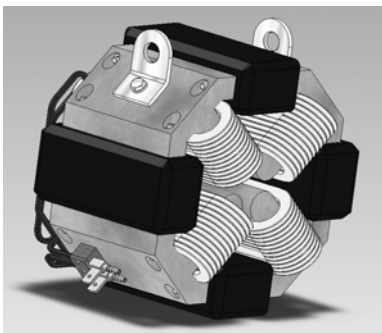


Рис.7. Общий вид квадрупольного магнита второго оборота рециркуляции

Все параметры электромагнитного оборудования, его привязки к осям существующих капитальных сооружений, требования к точности юстировки, индикации и коррекции положения пучка содержатся в эскизном проекте электромагнитной системы рециркулятора SALO [10].

#### 4. КАНАЛЫ ВЫВОДА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO НА ФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Для работы на физическую программу [5] предусматривается создание пяти пучковых линий А, В, С, D и E (см. Рис.1). Магнитооптическая структура пучковых линий выбрана из соображений удовлетворения требований эксперимента: поперечные размеры пучка -  $\pm 0.02$  см; расходимость -  $\pm 0.05$  мр.

На Рис.8 приведены для примера огибающие пучка для пучковых линий А и В.

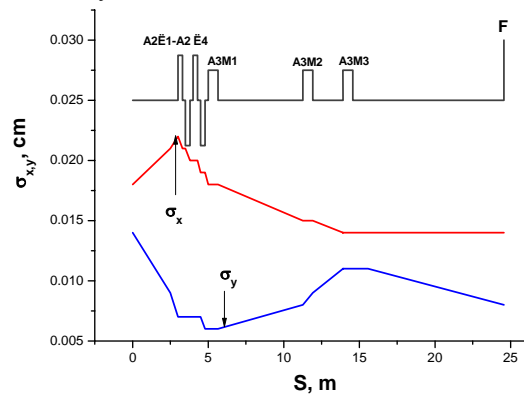


Рис.8. Структура каналов А и В и огибающие пучка

Проектом базовой установки предусматривается возможность работы ее как драйвера в составе подкритического реактора [11]. Для этого предполагается создание специальной пучковой линии, возможные направления которой на Рис.1 обозначены N1-N3. При проектировании этой линии основное внимание должно уделяться минимизации потерь пучка, средняя мощность которого будет близка к 130 кВт. С этой целью размеры пучка на всем тракте транспортировки должны быть минимальными.

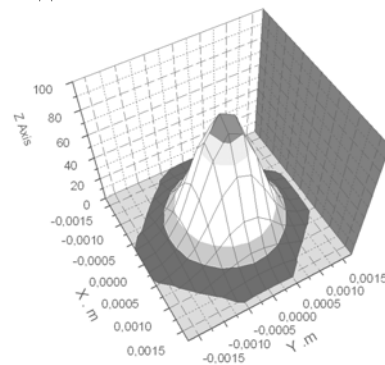


Рис.9. Распределение плотности пучка на входе триплета на конце канала

На Рис.9 показано распределение плотности пучка на входе системы формирования пучка на мишени. С другой стороны, для уменьшения плотности тепловыделения в мишени, размер пучка на поверхности мишени должен быть максимальным. Выбранная система формирования пучка позволяет выполнить это условие. На Рис.10 представлено распределение плотности электронного пучка на поверхности мишени.

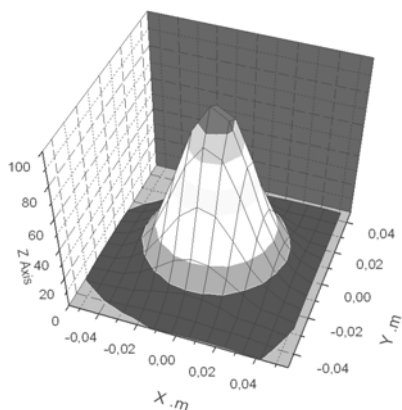


Рис.10. Распределение плотности пучка на поверхности нейтронообразующей мишени

Лазер на свободных электронах (FEL) может быть размещён в свободном прямолинейном промежутке рециркулятора, а излучение может быть выведено в направлении канала E. Второе место для размещения лазера – канал C.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные работы позволяют выделить два возможных этапа в запуске рециркулятора. Первый этап предполагает максимальное использование имеющихся сооружений и оборудования и закупку готовых разработок модулей ускоряющих структур и инжекторов. Этот этап предполагает запуск ускорителя на энергию 490 МэВ и потребует затрат в 9.5 млн. евро. Второй этап предполагает разработку и изготовление магнитной системы второго кольца и инжектора поляризованного электронного пучка. Затраты составят около 3 млн. евро.

Для максимальной энергии пучка 730 МэВ эмиттанс на выходе рециркулятора будет равен  $0.004 \text{ п.мм.мрад}$ , а энергетический разброс –  $2 \cdot 10^{-5}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

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. НИЦ ХФТИ, 2003.
2. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnya, A.V. Glamazdin, I.S. Guk, S.G. Kononenko, M. van der Weil, J.I.M. Botman, F.A. Peev, A.S. Tarasenko. *SALO*

*project*. National Science Center Kharkov Institute of Physics, Technology, Kharkiv, 2005, 104 p.

3. K. Aulenbacher, B. Aune, J. Aysto, J.-L. Baldy, H. Burkhardt (Ed.), F. Bradamante et. al. *ELFE AT CERN. Conceptual Design Report*. CERN, NuPECC, CERN 99-10, Dec. 1999.
4. I.S. Guk, J. A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, F.A. Peev, A.S. Tarasenko, M. van der Wiel, J.I.M. Botman. "Isochronous Magneto-optical Structure of Recirculator SALO." Proc. of EPAC, Edinburgh, Scotland, 26-30 June 2006, pp. 2035-2037.
5. А.Ю. Буки, В.Б. Ганенко, А.Ю. Корчин, В.В. Котляр, Н.И. Маслов, В.И. Трутень, С.П. Фомин, А.В. Шебеко, Н.Г. Шевченко, Н.Ф. Шульга. *Фундаментальные и прикладные исследования на линейном ускорителе-рециркуляторе электронов с энергией 730 МэВ (Проект SALO), часть 1*. НИЦ ХФТИ, Харьков, 2006, с.116.
6. P. Adderley, M. Baylac, J. Clark, A. Dey, J. Grames, J. Hanscneht, M. Poelker, V. Stutman. *Jefferson Lab polarized electron source*. SRF Seminar Jlab's Polarized Electron Source Power Point Slide Presentation, September 25, 2002.
7. A. Arnold, H. Buettig, D. Janssen, et al. *IST RF-measurements @ 3.5-cell srf-photo-gun cavity in Rossendorf*. Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany, p.567-570.
8. [http://www.accel.de/\\_struktur/rf\\_accelerating\\_units.htm](http://www.accel.de/_struktur/rf_accelerating_units.htm)
9. L. Lilje. "High-gradient superconducting radiofrequency cavities for particle acceleration". Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p. 2752-2754.
10. И.С. Гук, А.Н. Довбня, Г.Г. Ковалёв, С.Г. Кононенко, А.Ю. Мыщиков, Ф.А. Пеев, А.С. Тарасенко. Эскизный проект электромагнитной системы рециркулятора SALO // *Тезисы докладов XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. 9-15 сентября 2007. Харьков, НИЦ ХФТИ. 2007, с.92.
11. M.I. Bratchenko, V.V. Gann, I.S. Guk, A.N. Dovbnya, et al. Superconducting driver for sub-critical assembly // *Proceedings of the International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy"*. May 29-June 03, 2006 Kyiv, Ukraine, 2007, p.622-632.

### SALO PROJECT (STATUS AND PROSPECTS)

*A.N. Dovbnya, I.S. Guk, S.G. Kononenko, M. van der Wiel, J.I.M. Botman, F.A. Peev, A.S. Tarasenko*

Development of accelerator project SALO is begun in NSC KIPT in 2003. The recirculator SALO includes: an injector of electrons on the basis of superconducting RF gun; a source of the polarized electrons with the superconducting accelerating module; system of injection of a beam in recirculator; accelerating system on the basis of superconducting accelerating section TESLA; two rings of a recycling of beam. Peak energy of the accelerated electrons – 730 MeV at a current less than 100  $\mu\text{A}$ . Variants of beam transportation lines on physical installations are developed. The outline sketch of electromagnetic equipments of the accelerating complex is developed.

### ПРОЕКТ SALO (СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ)

*А.М. Довбня, І.С. Гук, С.Г. Кононенко, М. van der Wiel, J.I.M. Botman, Ф.А. Пеев, О.С. Тарасенко*

В 2003 р. в НИЦ ХФТИ розпочато роботу по розробці проекту рециркулятора SALO, який містить в собі інжектор електронів на основі надпровідної ВЧ-гармати, джерело поляризованих електронів з надпровідним прискорювальним модулем, систему інжекції пучка в рециркулятор, прискорювальну систему на основі надпровідних секцій TESLA, два кільця рециркуляції пучка. Максимальна енергія прискорених електронів – 730 MeV при струмі менше 100 мкА. Розроблені варіанти транспортування пучка на фізичні установки. Розроблений ескізний проект електромагнітного устаткування прискорювального комплексу.