

ИНЖЕКЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ И ЛЕГКИХ ИОНОВ В СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СИНХРОТРОН НУКЛОТРОН

*А. М. Базанов^а, А. В. Бутенко^а, А. И. Говоров^а, Б. В. Головенский^а,
Д. Е. Донец^а, Е. М. Сыресин^а, В. В. Фимушкин^а, В. В. Кобец^а,
А. Д. Коваленко^а, К. А. Левтеров^а, Д. А. Люосев^а, А. А. Мартынов^{а,1},
В. В. Мялковский^а, В. А. Мончинский^а, Д. О. Понкин^а, Р. Г. Пушкарь^а,
В. В. Селезнев^а, К. В. Шевченко^а, А. О. Сидорин^{а,б}, И. В. Шириков^а,
А. В. Смирнов^а, Г. В. Трубников^{а,б}, С. В. Барабин^в, А. В. Козлов^в,
Г. Н. Кропачев^в, В. Г. Кузьмичев^в, Т. В. Кулевой^в, А. С. Белов^г,
С. М. Полозов^д*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^в Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

^г Институт ядерных исследований РАН, Москва

^д Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

В рамках программы экспериментов на ускоренных поляризованных пучках на синхротроне нуклотрон ускорительного комплекса ЛФВЭ ОИЯИ создан источник поляризованных дейтронов и протонов. Для работы с источником поляризованных ионов на форинжекторе линейного ускорителя ЛУ-20 электростатическая ускоряющая трубка была заменена ускорителем с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), также была заменена система питания источников ионов. В статье приводятся результаты 52–54-го сеансов по ускорению поляризованных протонов и легких ионов в нуклотроне.

A source of polarized deuterons and protons SPI has been developed and constructed for the experimental program on accelerated polarized beams in the superconducting synchrotron Nuclotron. Upgrade of the foreinjector had been done to put SPI into operation: the electrostatic accelerating tube was replaced by RFQ linac, the power system of electrical feeding of ion sources was also replaced. Results of the 52nd–54th Nuclotron runs with polarized protons and light ions are presented in this article.

PACS: 29.20.Ej

¹E-mail: martynovaa@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ОИЯИ (Дубна) ведется строительство ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1], задачей которого является доставка пучков заряженных частиц к внешним мишеням и детекторам коллайдера. Программа экспериментов на существующем ускорительном комплексе нуклотрон, как и запланированные работы на NICA, включает в себя эксперименты на пучках поляризованных ионов. Для этой цели в сотрудничестве с ИЯИ РАН (Троицк) разработан новый источник поляризованных ионов SPI (Source of Polarized Ions) [2].

Для ввода в эксплуатацию данного источника был модернизирован форинжектор линейного ускорителя ЛУ-20, так как система, использовавшаяся ранее для питания источников на высоковольтной платформе, была рассчитана на мощность до 5 кВт, в то время как мощность, потребляемая новым источником, составляет 25 кВт.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРИНЖЕКТОРА

В ходе модернизации форинжектора электростатическая ускоряющая трубка была заменена на ускоритель с ПОКФ [3], параметры которого приведены в таблице. Это позволило снизить потенциал на высоковольтной платформе с 600 до 100 кВ и использовать для питания источников разделительный трансформатор на 160 кВ – 35 кВА. Разработка ускорителя с ПОКФ была выполнена коллаборацией ОИЯИ, МИФИ (Москва) и ИТЭФ (Москва). Моделирование динамики пучка, резонатора ускорителя и его разработка, как и разработка и производство системы ВЧ-питания, были проведены в 2011–2013 гг. Резонатор ускорителя с ПОКФ был произведен во ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина (Снежинск).

Были разработаны и смонтированы каналы транспортировки пучков низкой энергии от выхода источника ионов до входа секции с ПОКФ и от выхода ПОКФ до входа в ЛУ-20. Линейный ускоритель с трубками дрейфа ЛУ-20 является инжектором синхротрона нуклотрон и в настоящее время используется для ускорения ионов с отношением заряда к массе $\geq 1/3$ на второй кратности ВЧ-поля до энергии 5 МэВ/нуклон [4]. Пучок от источника ионов транспортируется на вход ускоряющей электростатической трубки двумя электродами, а после ускорения на вход секции с ПОКФ — двумя короткофокусными магнитными линзами и двойным корректором. Канал транспортировки между ПОКФ и ЛУ-20 состоит из группирователя, двух триплетов квадрупольных линз и двойного корректора. Канал транспортировки пучка в нуклотрон включает в себя группирователь (дебанчер), два поворотных магнита, двенадцать квадрупольных линз и два двойных

Параметры ускорителя с ПОКФ

Параметр	Значение		
	Отношение заряда к массе Z/A	1,0	0,5
Энергия инжекции, кэВ	31,0	61,8	103
Максимальный ток, мА	10	20	10
Энергия на выходе, кэВ/нуклон	156		
Рабочая частота, МГц	145,2		

корректора. Диагностика пучка от источника до инъекции в нуклотрон осуществлялась четырьмя цилиндрами Фарадея: на входе секции с ПОКФ, на входе и выходе ЛУ-20 и на входе в нуклотрон.

УСКОРИТЕЛЬНЫЕ СЕАНСЫ НУКЛОТРОНА

В мае 2016 г. источник SPI был установлен на высоковольтной платформе нового форинжектора (рис. 1). В июне 2016 г. проведен первый технологический сеанс нуклотрона с дейтронным пучком, полученным с помощью нового источника и форинжектора. По результатам все основные системы ионного источника и инжектора подтвердили свою работоспособность и были введены в эксплуатацию.

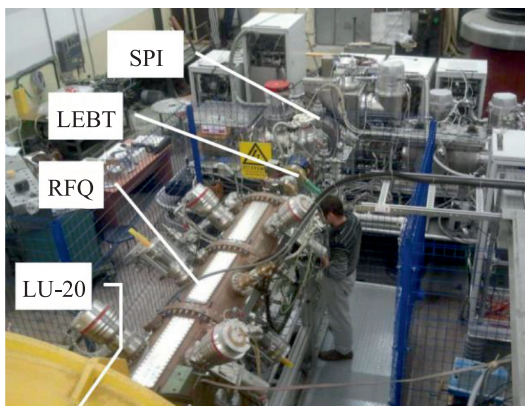


Рис. 1. Форинжектор ЛУ-20. SPI — источник поляризованных ионов; LEBT — канал транспортировки от источника до ускорителя с ПОКФ; предускоритель RFQ — ускоритель с ПОКФ

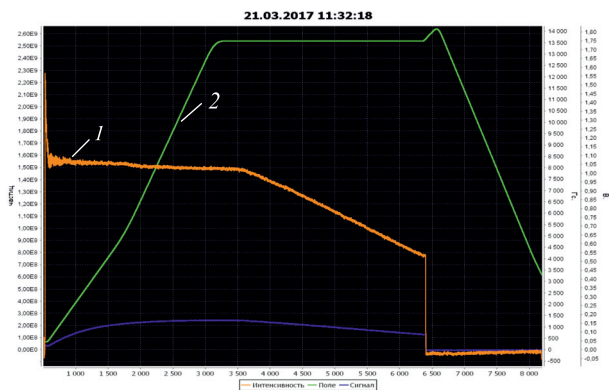


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Циклическая диаграмма поляризованного пучка дейтронов во время ускорения и медленного вывода из нуклотрона. Оранжевая линия (1) — интенсивность; зеленая (2) — основное магнитное поле

Сеанс, в основном посвященный экспериментальным исследованиям в области спиновой физики (с поляризованными дейтронами), начался 26 октября 2016 г., его общая продолжительность более 1500 ч. Средняя интенсивность поляризованного дейтронного пучка составила $(5-7) \cdot 10^8$ частиц/цикл, и во время следующего ускорительного сеанса, проведенного в феврале-марте 2017 г., она была увеличена до $2 \cdot 10^9$ частиц/цикл (рис. 2). Во время этого сеанса впервые в истории ЛВЭ/ЛФВЭ на ускорительном комплексе получен пучок поляризованных протонов. Исследование столкновений поляризованных протонов с целью получения новых экспериментальных данных, позволяющих определить кварк-партоновые структурные функции протона, является главной задачей программы поляризационных исследований на установке SPD комплекса NICA. Достижению результата предшествовала и способствовала напряженная работа по переводу источника SPI в режим генерации поляризованных протонов, обеспечению транспортировки и ускорения пучка поляризованных протонов в секции ПОКФ (предускорителе) в ЛУ-20 и далее инжектированию в кольцо нуклотрона, обеспечению режима устойчивой циркуляции, захвату в режим ускорения, а далее ускорению, выводу ускоренного пучка и регистрации уровня поляризации. Наиболее проблемным вопросом с точки зрения динамики протонного пучка являлась настройка режима циркуляции и захвата протонного пучка с энергией 5 МэВ в связи с необходимостью уменьшения амплитуды магнитного поля инжекции с 300 Гс (в случае дейтронов) до 150 Гс. Проблемным вопросом было также обеспечение захвата протонного пучка при низкой энергии инжекции в режим ускорения. Все указанные проблемы были успешно решены, и получен ускоренный пучок протонов от SPI в нуклотроне и в канале вывода, где был расположен поляриметр. Измерения поляризации были осуществлены на циркулирующем пучке и на выведенном пучке при энергии пучка 1 и 2 ГэВ. Режимы работы источника SPI на поляризованных протонах, поляриметров, системы сбора, обработки и представления данных о поляризации были проверены и отлажены в рабочих режимах на ускорительном комплексе.

Средние взвешенные значения поляризации пучка протонов были найдены как $0,017 \pm 0,021$ и $0,354 \pm 0,022$ для неполяризованного и поляризованного пучка соответственно [5]. Согласно расчетам переноса спина с учетом текущих магнитных условий в инжекционной линии нуклотрона поляризация на выходе SPI равна $-0,90 \pm 0,06$. Вертикальная составляющая поляризации пучка протонов во внутренней мишени может быть увеличена до этого значения путем установки двух соленоидов на выходе из SPI и в инжекционной линии нуклотрона [5].

УСТАНОВКА ГРУППИРОВАТЕЛЯ

В июне 2017 г. в эксплуатацию был введен группирователь, разработанный ОИЯИ с ИТЭФ. Он установлен под вакуумным кожухом ЛУ-20 на участке между выходом ускорителя с ПОКФ и входом ЛУ-20 и предназначен для согласования продольного эмиттанта пучка на выходе ПОКФ с акцептансом ЛУ-20. Испытания показали, что для дейтронного пучка группирователь дает увеличение тока пучка на выходе ЛУ-20 в 1,5 раза (рис. 3). При эксперименте с пучками C^{5+} и Li^{3+} ток увеличился в 2,5 раза.

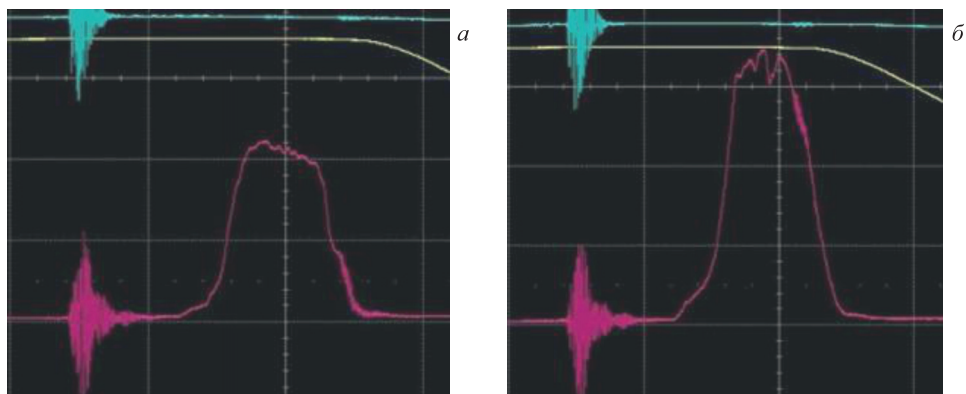


Рис. 3. а) Ток пучка дейтронов при выключенном группирователе на выходе ЛУ-20; б) ток пучка дейтронов при включенном группирователе на выходе ЛУ-20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе 52–54-го сеансов работы нуклотрона пучки поляризованных дейтронов и протонов от источника SPI инжектированы и ускорены в синхротроне. Модернизированный форинжектор обеспечил инжекцию в ЛУ-20 поляризованных дейтронов и протонов от нового источника SPI и пучков легких ионов от лазерного источника. Впервые на линейном ускорителе ЛУ-20 на второй кратности ускоряющего ВЧ-поля были ускорены протоны. Пучки поляризованных дейтронов и протонов с интенсивностью $2,0 \cdot 10^9$ и $1,8 \cdot 10^8$ соответственно были ускорены в нуклотроне и выведены на физические установки. Введенный в эксплуатацию группирователь для ЛУ-20 будет испытан в предстоящих ускорительных сеансах и позволит увеличить интенсивность частиц в нуклотроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Agapov N., Alexandrov V. et al.* Project of the Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. of IPAC'10. 2010. P. 693–695.
2. *Fimushkin V., Kovalenko A., Belov A. et al.* SPI for the JINR Accelerator Complex // Proc. of PSTP'15. PoS (PSTP2015). P. 041.
3. *Gusarova M. A., Dyubkov V. S., Polozov S. M. et al.* Research and Design of a New RFQ Injector for Modernization of the LU-20 Drift-Tube Linac // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. P. 915.
4. *Govorov A. I., Kalagin I. V., Kovalenko A. D., Monchinsky V. A., Ovsyannikov V. P., Pilipenko Yu. K., Popov V. A., Salimov E. H., Volkov V. I.* Linac LU-20 as Injector of Nuclotron // Proc. of LINAC-96. P. 394–396.
5. *Ladygin V. P. et al.* First Results on the Measurements of the Proton Beam Polarization at Internal Target at Nuclotron // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 938. P. 012008.