

ПРОГРЕСС В РАЗВИТИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН

*Н. Н. Агапов, А. В. Алфеев, В. А. Андреев, В. И. Батин,
О. И. Бровко, А. В. Бутенко, Б.-Р. В. Василишин, В. И. Волков,
А. И. Говоров, Е. Д. Донец, Е. Е. Донец, Д. Е. Донец, А. В. Елисеев,
И. Б. Иссинский, В. Н. Карпинский, В. Д. Кекелидзе, А. Д. Коваленко,
О. С. Козлов, И. Н. Мешков, В. А. Михайлов, В. А. Мончинский,
П. А. Рукояткин, Н. В. Семин, А. О. Сидорин, А. Н. Сисакян,
В. М. Слепнев, А. С. Сорин, Г. В. Трубников, Г. Г. Ходжибагиян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Сверхпроводящий синхротрон нуклотрон был сооружен в 1987–1992 гг. [1] и является первым в мире синхротроном, построенным на основе быстрогоциклирующих электромагнитов типа «оконная рама» со сверхпроводящей обмоткой. При проектной величине поля дипольных магнитов, равной 2 Тл, магнитная жесткость составляет 45 Тл·м, что соответствует энергии ядер тяжелых элементов, например ядер золота, 4,5 ГэВ/нуклон. В настоящее время осуществляется модернизация ускорительного комплекса нуклотрон (проект «Нуклотрон-М»), которая рассматривается как ключевая часть первой стадии реализации нового проекта ОИЯИ — проекта NICA/MPD (Nuclotron-based Ion Collider fAcility and Multy-Purpose Detector). Важной задачей проекта является подготовка основных систем нуклотрона для его надежной эксплуатации в составе ускорительного комплекса NICA. Приводятся основные результаты работ по программе проекта, начатых в середине 2007 г., анализируются результаты последних сеансов работы нуклотрона.

Superconducting synchrotron Nuclotron was constructed in 1987–1992 [1]. It is the first in the world synchrotron based on fast cycling electromagnets of the «window frame» type with superconducting coil. At design magnetic field of 2 T the magnetic rigidity is 45 T·m that corresponds to the energy of heavy element nuclei, for instance, the gold, of about 4.5 GeV/u. Presently the modernization of the Nuclotron complex is being realized (the «Nuclotron-M» project), which is considered as a key part of the first stage of new JINR project NICA/MPD (Nuclotron-based Ion Collider fAcility and Multi-Purpose Detector). Important task of the project is to prepare all the Nuclotron systems to its safe operation in the framework of the NICA complex. Main results of the project realization, started in 2007, are presented, the results of the last Nuclotron runs are analyzed.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

В 2007 г. в ОИЯИ начаты работы по созданию нового ускорительно-коллайдерного комплекса NICA на базе синхротрона нуклотрон [2]. Основной целью этого проекта является начало в ближайшие 5–7 лет экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной кварк-глюонной материи и поиск возможного образования

«смешанной фазы» такой материи. Эти эксперименты будут реализованы в режиме столкновения пучков тяжелых ионов и обеспечены многоцелевым детектором MPD. На втором этапе реализации проекта планируется осуществление столкновений встречных пучков легких ионов и пучков поляризованных протонов и дейтронов. Кроме того, планируется продолжение экспериментов на выведенном пучке нуклотрона и на внутренней мишени. Реализация проекта NICA/MPD призвана вывести ОИЯИ на лидирующие позиции в мире в этих областях исследований.

Главной экспериментальной установкой комплекса NICA станет коллайдер — два кольца со сверхпроводящими магнитами, предназначенные для проведения экспериментов со встречными пучками ядер, протонов с ядрами тяжелых элементов и поляризованными пучками ядер легких элементов (протонов, дейтронов). Реализация проекта предполагает создание высокоинтенсивных источников ионов, модернизацию существующего линейного ускорителя ЛУ-20 и создание нового линейного ускорителя тяжелых ионов, создание бустерного синхротрона и необходимых каналов транспортировки пучков. Основным элементом инжекционной цепочки коллайдера, работающего в режиме накопителя, является нуклотрон, который должен обеспечивать ускорение пучков ионов до энергии эксперимента, составляющей от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон для тяжелых ионов и от 5 до 12,6 ГэВ для протонов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА «НУКЛОТРОН-М»

Ключевой частью первой стадии реализации проекта NICA/MPD является модернизация синхротрона нуклотрон, имеющая целью подтвердить возможность его длительной и надежной работы при параметрах, близких к требованиям проекта NICA.

Ускорительный комплекс нуклотрон включает в себя несколько типов источников ионов, линейный ускоритель ЛУ-20, ускоряющий протоны до энергии 20 МэВ и ионы с отношением заряда к массе $Z/A \geq 1/3$ до энергии 5 МэВ/нуклон, сверхпроводящий синхротрон с периметром 251,52 м, оборудованный системой медленного вывода пучка. Кроме того, в одном из прямолинейных промежутков нуклотрона размещается станция внутренних мишеней, предназначенная для экспериментов на циркулирующем пучке. Необходимо обеспечить длительную надежную работу ускорительного комплекса и ускорение интенсивного пучка тяжелых ионов (до 10^9 частиц за импульс) с минимальными потерями до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 Тл. В последние два года, в связи с реализацией проекта, работа нуклотрона с пучком ограничивалась одним-двумя сеансами в год, общей протяженностью примерно 600 ч. Максимальная величина поля в дипольных магнитах, допускаемая системой защиты магнитов от переходов, составляет 1,5 Тл. Количество ускоренных частиц составляет не меньше 30 % от числа инжектированных в нуклотрон. Стабильность работы комплекса зависит как от надежности работы основных систем ускорителя, так и от общего состояния инфраструктуры лаборатории. Из-за экономических сложностей 1990-х гг. осталась, во-первых, незавершенной программа по модернизации ускорителя ЛУ-20, не был сооружен бустерный синхротрон, высокочастотная система нуклотрона была реализована на уровне действующего макета, предназначенного на период пусконаладочных работ, не в полном объеме была создана система диагностики циркулирующего пучка, практически полностью отсутствовала система контроля вакуумных условий в пучковой камере, не в полной мере отвечали требованиям надежности системы питания и защиты структурных магни-

тов кольца. Во-вторых, инфраструктура лаборатории (в первую очередь это касается систем водоснабжения и бесперебойного питания) не обновлялась в течение нескольких десятилетий, основные технологические системы нуклотрона создавались в середине 80-х и многократно выработали свой ресурс, часть из них физически и морально устарела. Несмотря на это за период с 1993 по 2007 г. было проведено 37 сеансов работы нуклотрона общим объемом более 11 тыс. ч и 14 сеансов работы синхрофазотрона, который был выведен из эксплуатации только в 2003 г. Опыт 15-летней эксплуатации нуклотрона показал, что наиболее дорогостоящая часть ускорителя — его магнитная система — находится в хорошем техническом состоянии, к настоящему времени не обнаружено никаких признаков деградации ее параметров и она способна устойчиво работать еще на протяжении многих лет. На основании этого было принято решение об использовании нуклотрона, после его модернизации, в качестве основы вновь создаваемого ускорительного комплекса.

Весь комплекс работ, которые необходимо выполнить на ускорителе для его успешной эксплуатации в составе комплекса НИСА, включает в себя:

- модернизацию и развитие системы криогенного обеспечения;
- модернизацию вакуумной системы;
- модификацию системы питания магнитов и модернизацию системы эвакуации энергии;
- модернизацию ускоряющих ВЧ-станций;
- развитие диагностики, минимизацию потерь на всех стадиях ускорения;
- разработку и создание канала транспортировки пучка из бустера в нуклотрон, станции обдирки, системы сепарации и поглотителя пучка нецелевой зарядности;
- создание новой системы инжекции из бустера на энергии примерно 600 МэВ/нуклон;
- создание устройств по диагностике поляризации, управлению спиновой частотой для ускорения поляризованного пучка протонов;
- создание систем быстрого и медленного вывода на энергии тяжелых ионов до 4,5 ГэВ/нуклон;
- модернизацию системы управления.

Кроме того, необходимо провести модернизацию существующего линейного ускорителя ЛУ-20, которая включает в себя:

- модернизацию системы вакуумной откачки ускорителя;
- модернизацию канала транспортировки от ЛУ-20 до нуклотрона;
- замену морально и физически устаревших ВЧ-генераторов на современные;
- замену основной части трубок дрейфа.

Ввиду ограниченного объема финансирования и сжатых сроков выполнения только часть этих работ была включена в состав проекта «Нуклотрон-М», основной целью которого является демонстрация в 2010 г. возможности ускорения пучка тяжелых ионов ($A \sim 100$) с интенсивностью 10^7 – 10^8 частиц в импульсе до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов около 2 Тл.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР СЕАНСОВ РАБОТЫ

С момента начала реализации проекта проведены три сеанса работы ускорительного комплекса: № 37 в ноябре–декабре 2007 г., № 38 в мае–июне 2008 г. [3] и № 39 в июне

2009 г. [4]. Задачей сеанса № 37 являлась комплексная ревизия состояния всех систем ускорителя, тестирование новой схемы питания дипольных и квадрупольных магнитов, позволяющей достичь проектного уровня магнитного поля, оценка давления остаточного газа в пучковой камере. До начала сеанса № 38 на ускорительном комплексе были проведены работы по модернизации вакуумной системы кольца, связанные с установкой большого количества откачного и диагностического оборудования, а также с модернизацией проблемных участков вакуумной камеры. Была проведена модернизация системы откачки ЛУ-20. Сеанс № 38 был в первую очередь посвящен тестированию и настройке вновь установленного оборудования. Улучшение вакуумных условий в камере нуклотрона контролировалось с помощью вакуумметров и путем измерения времени жизни циркулирующего пучка дейтронов. В результате среднее по орбите кольца давление остаточного газа составило $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ Торр, что примерно соответствует проектной величине на первом этапе модернизации. По завершении сеанса № 38 была начата работа по коренной модернизации криогенного оборудования, тестирование и ввод в эксплуатацию которого являлось главной задачей 39-го сеанса работы ускорительного комплекса.

Кроме того, в ходе сеансов проводились эксперименты по оптимизации динамики частиц, включающие в себя тестирование аппаратуры измерения и коррекции орбиты пучка, поэтапную модернизацию и тестирование элементов высокочастотной ускоряющей системы, имеющей целью реализацию адиабатического захвата частиц в режим ускорения. Была создана новая система формирования цикла магнитного поля, отладка которой проводилась в ходе сеанса № 39. Одним из главных результатов ускорительных смен этого сеанса явилось также успешное комплексное испытание систем защиты и электропитания, проведенное в ходе эксперимента по увеличению магнитного поля. В течение смены все системы ускорителя устойчиво отработали в цикле с полем на столе величиной 1,5 Тл, и было осуществлено ускорение пучка дейтронов до энергии примерно 3,8 ГэВ/нуклон.

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

К началу реализации проекта «Нуклотрон-М» давление остаточного газа в пучковой камере нуклотрона, по оценкам, составляло примерно 10^{-7} Торр [5]. Для эффективного ускорения ядер тяжелых элементов при инъекции в кольца коллайдера необходимо обеспечить давление не хуже 10^{-9} Торр. Перед сеансом № 37 была произведена замена уплотнений на трубках дрейфа ЛУ-20, проведены работы по снижению интенсивности натекания в камеру нуклотрона. Были заключены контракты на поставку датчиков давления, турбомолекулярных насосов и анализатора состава остаточного газа. Перед установкой нового оборудования в ходе сеанса № 37 среднее давление на орбите нуклотрона было оценено по измерению времени жизни ионов H^{2+} на столе инъекции. Основным процессом, определяющим потери этих ионов, является их диссоциация при столкновениях с атомами остаточного газа, сечение которой известно с достаточно хорошей точностью. Измеренное характерное время жизни ионов H^{2+} составило величину порядка 10 мс, что при сечении развала ионов H^{2+} на азоте при энергии 5 МэВ/нуклон, составляющем примерно 10^{-16} см², дает оценку среднего вакуума в нуклотроне $\sim (1-2) \cdot 10^{-8}$ Торр. В разумном согласии с этой оценкой находилось и время жизни дейтронов с энергией 5 МэВ/нуклон, равное 1,1 с, что соответствует давлению азота $P \sim 1,5 \cdot 10^{-8}$ Торр.

Модернизация вакуумной системы нуклотрона проводится в два этапа. Первый этап включал в себя переделку проблемных участков вакуумной камеры с заменой уплотнений и шиберов, закупку, установку на кольца и тестирование новых средств откачки и диагностики. Эта работа была в основном завершена к 38-му сеансу, в ходе которого было проведено комплексное тестирование вновь установленного оборудования. Для определения среднего значения давления на орбите было проведено измерение времени жизни пучка дейтронов на столе инъекции, которое превысило 10 с, что соответствует улучшению вакуумных условий как минимум на порядок по сравнению с сеансом № 37. Оценка среднего давления на орбите по времени жизни циркулирующего пучка находится в хорошем согласии с прямыми измерениями с помощью датчиков давления. Соответственно, задачу первого этапа модернизации вакуумной системы нуклотрона можно считать выполненной.

В настоящее время реализуется второй этап модернизации, имеющий целью создание системы автоматического контроля и управления вакуумным оборудованием. Эта система будет обеспечивать удаленное включение и выключение оборудования, измерение параметров и передачу информации на пульт управления, защиту оборудования в нестандартных ситуациях. Система создается в тесном сотрудничестве с чешскими фирмами (Vacuum Praha, FOTON) на основе современного электронного оборудования. Работа начата в июле 2008 г. и сейчас находится в завершающей стадии.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Система криогенного обеспечения ускорительного комплекса ЛФВЭ [6] — крупнейшее в России сооружение для производства жидкого гелия, состоящее из целого ряда машин и аппаратов, выпущенных головными предприятиями криогенной отрасли страны: ОАО «НПО ГЕЛИЙМАШ», ОАО «КРИОГЕНМАШ», ОАО «НИИТурбокомпрессор», завод «Борец» и др. Это оборудование было запущено в эксплуатацию в начале 1990-х гг. и успешно использовалось для проведения всех сеансов нуклотрона и при промышленном производстве жидкого гелия.

Развитие криогенного комплекса направлено на поддержание его долговременной работоспособности, дальнейшее повышение надежности и энергетической эффективности, а также снижение эксплуатационных расходов. Развитие проводится с расчетом на дальнейшее увеличение производительности, необходимое для обеспечения новых сверхпроводящих установок в составе комплекса NICA, бустера и колец коллайдера. При реализации проекта «Нуклотрон-М» усилия сосредоточены на трех основных направлениях:

- создание автоматизированной системы диагностики и управления комплексом криогенных установок нуклотрона;
- разработка и запуск системы реконденсации жидкого азота;
- капитальный ремонт и обновление оборудования, прошедшего длительную эксплуатацию.

Со временем ресурс многих элементов криогенной системы был выработан, что привело к существенному снижению надежности и экономичности криостатирования сверхпроводящего кольца ускорителя в течение сеансов № 37, 38 [3]. В связи с этим перед сеансом № 39 был проведен капитальный ремонт и полномасштабная модернизация

всех низкотемпературных аппаратов установок КГУ-1600, блоков очистки сжатого гелия МО-800, сепараторов масла и др. оборудования. При этом было необходимо сначала разобрать агрегаты, транспортировать их на заводы-изготовители в Москву и Балашиху и обратно, а после этого смонтировать и провести комплексные пусконаладочные работы.

В ходе работ применены современные самоочищающиеся фильтры, убраны старые и засыпаны новые адсорбенты (активированные угли и цеолиты) в 38 крупных аппаратах, работающих при высоком давлении как при температуре окружающей среды, так и при низких температурах. Кроме того, промывкой специальными реактивами с последующей продувкой горячим воздухом были удалены все масляные загрязнения в теплообменной аппаратуре и других элементах системы.

Обновленное оборудование проработало в сеансе № 39 без каких-либо сбоев. Срок службы модернизированного оборудования существенно продлен, и оно уже сейчас вполне применимо для задач будущего проекта NICA/MPD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье подробно описаны только некоторые основные результаты, достигнутые за время реализации проекта «Нуклотрон-М». Практически по всем основным системам нуклотрона проводятся работы по их модернизации с максимально напряженным графиком, ориентированным на завершение в 2010 г. В завершающей стадии находятся реконструкция и коренная модернизация систем электропитания и защиты структурных магнитов и линз, направленные на обеспечение устойчивой работы ускорителя при поле 2 Тл и достижение темпа роста поля 1 Тл/с [7]. Ведутся работы по созданию высокоинтенсивного источника тяжелых ионов в высоком зарядовом состоянии и источника поляризованных пучков ядер легких элементов. Начаты работы по модернизации ускорителя ЛУ-20. До окончания проекта «Нуклотрон-М» планируется провести еще два сеанса: один — осенью 2009 г., второй — в первой половине 2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baldin A. M. et al.* Heavy Ion Accelerator Complex. JINR Preprint 9-11796. Dubna, 1978.
2. *Sissakian A. N. for NICA collaboration.* Nuclotron-Based Ion Collider Facility // Intern. Conf. «LP'07», Daegu, Korea, 2007.
3. *Агапов Н. Н. и др.* Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38). Сообщение ОИЯИ Р9-2009-38. Дубна, 2009.
4. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
5. *Иссинский И. Б., Бровко О. И., Бутенко А. В.* Эксперименты по исследованию потерь интенсивности пучка нуклотрона (2002–2005 гг.). Сообщение ОИЯИ Р9-2007-107. Дубна, 2007.
6. *Агапов Н. Н.* Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.
7. *Карпинский В. Н. и др.* Развитие системы питания нуклотрона // Наст. вып. С. 835.