

ИТОГИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «НУКЛОТРОН-М»

*Н. Н. Агапов, А. В. Бутенко,
В. И. Волков, В. Н. Карпинский, А. Д. Коваленко,
Г. В. Трубников, А. О. Сидорин, Г. Г. Ходжибагиян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 916 |
| КРАТКИЙ ОБЗОР СЕАНСОВ | 918 |
| МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ | 922 |
| МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ | 925 |
| РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ | 928 |
| УСКОРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ | 933 |
| Оптимизация режима работы источника «Крион-2» | 934 |
| Подготовка ЛУ-20 к ускорению ионов с $q/A = 1/3$, | |
| модернизация канала инжекции | 935 |
| Отработка режимов работы нуклотрона. | |
| Ускорение ионов ксенона | 936 |
| СОЗДАНИЕ НОВОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И ЗАЩИТЫ СТРУКТУРНЫХ МАГНИТОВ. ДОСТИЖЕНИЕ ПРОЕКТНОГО ПОЛЯ | 938 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛФВЭ | 944 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 947 |

ИТОГИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «НУКЛОТРОН-М»

*Н. Н. Агапов, А. В. Бутенко,
В. И. Волков, В. Н. Карпинский, А. Д. Коваленко,
Г. В. Трубников, А. О. Сидорин, Г. Г. Ходжибагиян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Задачей проекта «Нуклотрон-М», принятого к реализации в 2007 г., являлась подготовка основных систем ускорителя для его надежной эксплуатации в составе ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), сооружаемого в ОИЯИ. Демонстрация возможности ускорения пучка тяжелых ионов (с атомным номером более 100), обеспечение стабильной и безопасной работы магнитной системы при поле дипольных магнитов 2 Тл были обозначены как критерии успешного выполнения проекта. Не менее важными задачами являлись обеспечение надежной длительной работы комплекса и увеличение интенсивности ускоренного пучка. К концу 2010 г. основные цели проекта «Нуклотрон-М» были достигнуты. В данной работе дается обзор хода реализации проекта и приводятся основные результаты работы ускорительного комплекса в период с 2007 по начало 2011 г.

The main goal of the Nuclotron-M project approved for realization in 2007 was formulated as follows: modernization of the main accelerator systems for reliable and safe Nuclotron operation in the framework of accelerator complex NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) being constructed at JINR. Demonstration of heavy-ion beam acceleration (with atomic mass number more than 100), safe and stable operation of the main superconducting magnetic system at magnetic field up to 2 T had been defined as criteria of the successful project fulfilment. Another very important issue is performance of safe long-term beam runs and increase of the accelerated beam intensity. All main goals of the Nuclotron-M project had been successfully achieved by the end of 2010. In this report, the authors give an overview of the project realization chronology and show main experimental results obtained at LHEP accelerator complex Nuclotron in the period from 2007 to 2011.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий ускоритель релятивистских ядер — нуклотрон — был разработан и создан в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в период с 1977 по 1993 г., в марте которого был проведен первый наладочный сеанс. На начальном этапе эксплуатации ускорителя эксперименты проводились на внутренней мишени, а с 2002 г. был реализован медленный вывод пучка для экспериментов на фиксированных мишенях. За первые 14 лет эксплуатации нуклотрона для экспериментальных исследований ускорялись пучки от протонов до ионов железа, была продемонстрирована возможность ускорения пучков поляризованных дейтронов [1]. С 2003 г. (после вывода из

эксплуатации синхрофазотрона) нуклотрон является единственной базовой установкой ОИЯИ, работающей в области релятивистских энергий ускоренных ионов.

В 2007 г. в ОИЯИ начаты работы по созданию нового ускорительно-накопительного комплекса NICA на базе синхротрона нуклотрон [2]. Основной целью этого проекта является проведение 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. Эксперименты будут реализованы в режиме столкновения встречных пучков. На втором этапе реализации проекта планируется осуществление столкновений встречных пучков легких ионов, пучков поляризованных протонов и дейтронов. Последнее позволит поставить эксперименты по исследованию физики спина частиц, продолжающие программу ОИЯИ в этой области на качественно новом уровне. 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.

Первая стадия реализации проекта NICA/MPD, в основном завершенная к началу 2011 г., включала в себя следующие работы:

- разработку технического проекта ускорительного комплекса,
- разработку проекта многоцелевого детектора MPD,
- проведение необходимых опытно-конструкторских работ по элементам ускорителей и детектора,
- поэтапную модернизацию инфраструктуры ЛФВЭ,
- закупку материалов и начало изготовления оборудования с длительным производственным циклом.

Ключевой частью первой стадии являлась модернизация синхротрона нуклотрон (проект «Нуклотрон-М»), имеющая целью продемонстрировать возможность его длительной и надежной работы при параметрах, близких к требованиям проекта NICA.

Необходимость проведения коренной модернизации ускорительного комплекса ЛФВЭ объяснялась двумя основными причинами. Во-первых, из-за экономических условий начала 1990-х гг., когда создавались основные системы нуклотрона, проект комплекса был реализован не в полном объеме. Так, осталась 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 магнитов кольца. Во-вторых, инфраструктура лаборатории не обновлялась

в течение нескольких десятилетий, основные технологические системы нуклотрона создавались в середине 1980-х гг. и многократно выработали свой ресурс, часть из них физически и морально устарела.

Критериями успешности проводимой модернизации были обозначены демонстрация возможности ускорения пучка тяжелых ионов с атомным номером более 100 (до начала проекта самыми тяжелыми ионами, ускоренными на нуклотроне, были ионы железа) и обеспечение стабильной, безопасной работы магнитной системы при уровне поля в дипольных магнитах 2 Тл (максимальная ранее достигнутая величина поля была 1,5 Тл). Не менее важными задачами являлись обеспечение надежной длительной работы комплекса и увеличение интенсивности ускоренного пучка (за счет снижения потерь частиц на всех стадиях ускорения).

Структурно проект «Нуклотрон-М» был разбит на 10 подпроектов, соответствующих основным системам ускорительного комплекса [3]. В ходе его реализации были существенно модернизированы или созданы заново многие системы ускорительного комплекса и проведено шесть сеансов работы, посвященных тестированию и вводу в эксплуатацию нового оборудования. Ход реализации проекта подробно представлен в публикациях [4–9], в данной статье приводятся лишь наиболее значимые результаты.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР СЕАНСОВ

В ходе реализации проекта «Нуклотрон-М» было проведено шесть сеансов работы нуклотрона, № 37–42, общей продолжительностью около 3200 ч. В первую очередь в ходе сеансов решались задачи по вводу в эксплуатацию, исследованию и оптимизации режимов работы модернизированного и вновь установленного оборудования. Физические эксперименты на ускоренных пучках планировались в случае успешного выполнения «ускорительных» задач. В общей сложности по программе физических исследований было отработано около 500 ч, что составило примерно 15 % времени сеансов. В ходе сеансов использовались дуоплазматрон, лазерный источник и источник «Крион-2». Ускорялись дейтроны, ядра лития, ионы C^{4+} , $^{124}Xe^{42+}$. Для оценки давления в пучковой камере нуклотрона использовались ионы H_2^+ от дуоплазматрона. Подробная статистика сеансов приведена на сайте диспетчерской службы нуклотрона <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/statist/stat-main.htm>, а на рис. 1 показана сводная диаграмма распределения времени работы ускорителя за весь период модернизации.

В 2010 г. проект «Нуклотрон-М» был официально завершен, и сеанс № 43 (февраль–март 2011 г.) проводился уже в рамках нового проекта «Нуклотрон-НІСА». Примерно 40 % времени сеанса составили работы по программе физических экспериментов. Для сравнения в таблице приведены сводные данные по работе ускорительного комплекса, начиная с 2005 г. Снижение как общего

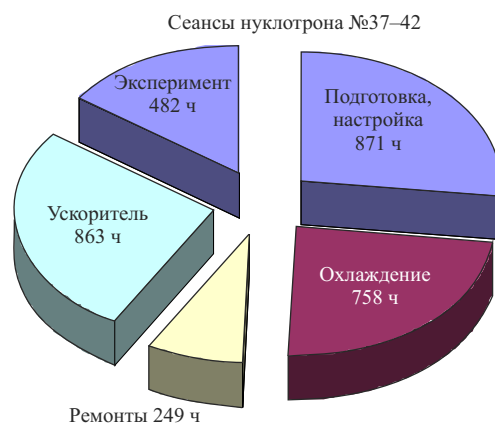


Рис. 1. Распределение времени работы ускорительного комплекса в течение реализации проекта «Нуклотрон-М», полное время работы 3214 ч

Продолжительность работы ускорительного комплекса ЛФВЭ по годам

| Год | Общее время работы, включая охлаждение, ч | Работа по программе физических экспериментов, ч |
|------|---|---|
| 2005 | 1430 | 930 |
| 2006 | 1101 | 387 |
| 2007 | 1017 | 332 |
| 2008 | 559 | 61 |
| 2009 | 1078 | 199 |
| 2010 | 1152 | 123 |
| 2011 | 2072 | 685 |

времени работы, так и доли времени, приходящейся на физические эксперименты, с 2005 по 2007 г. в основном объясняется как раз недостаточной надежностью выработавшего свой ресурс оборудования, что подтверждает необходимость проведения модернизации. В 2011 г. вышли на уровень 2000 ч работы. Обсуждается возможность в 2012 г. увеличения времени работы до 3000 ч, при предоставлении 60–70 % времени для физических экспериментов. Основные проблемы, которые при этом необходимо решить, скорее кадровые, чем технические.

В данном разделе кратко перечислены задачи, решенные в ходе сеансов, а в последующих разделах описаны направления и результаты модернизации основных систем ускорительного комплекса.

Сеанс № 37, проведенный с 29 октября по 16 ноября 2007 г., был в основном посвящен комплексной ревизии состояния всех систем ускорителя нака-

нуне модернизации. Кроме того, была испытана схема электрического питания с последовательным включением дипольных и квадрупольных структурных магнитов нуклотрона, намеченная к реализации. Также были выполнены

- подготовительные работы по оценке параметров ВЧ-системы, необходимых для реализации адиабатического захвата пучка на столе инъекции;
- исследование режимов работы канала транспортировки пучка из ЛУ-20 в нуклотрон и возможности его согласования при инъекции;
- оценка давления остаточного газа в пучковой камере за счет измерения времени жизни пучка H_2^+ .

Сеанс №38 (26 мая–18 июня 2008 г.) был в первую очередь посвящен тестированию и настройке вновь установленного откачного и диагностического вакуумного оборудования. Улучшение вакуумных условий в камере нуклотрона контролировалось с помощью вакуумметров и по времени жизни циркулирующего пучка дейтронов. Были продолжены работы по подготовке к реализации адиабатического захвата и по исследованию возможностей согласования пучка при инъекции. По завершении сеанса была начата работа по коренной модернизации криогенного оборудования.

39-й сеанс работы ускорительного комплекса нуклотрон (1–23 июня 2009 г.) имел главной задачей тестирование и ввод в эксплуатацию модернизированного криогенного оборудования. Основными итогами «ускорительных» смен явилось следующее:

- введена в опытную эксплуатацию новая система управления циклом магнитного поля, в течение всего сеанса проводилась ее поэтапная наладка, отработано несколько режимов работы ускорителя;
- успешно введена в эксплуатацию первая очередь системы автоматического контроля и управления вакуумным оборудованием;
- испытана аппаратура, подготовленная для реализации адиабатического захвата пучка в режим ускорения, продемонстрирована ее работоспособность;
- успешно испытаны прототипы элементов цифровой системы измерения и коррекции орбиты;
- проведено комплексное испытание систем питания и защиты при поле в магнитах 1,5 Тл;
- введена в эксплуатацию и протестирована система контроля токов в элементах магнитной оптики на каналах выведенных пучков.

При подготовке к сеансу №39 была предложена, опробована и налажена новая схема восполнения утечек гелия. Гелий в жидком состоянии подвозился автотранспортом в сосудах Дьюара и, исключая обычный при этом процесс газификации, переливался непосредственно в сборники жидкого гелия работающих рефрижераторов КГУ1600/4,5. В последующих сеансах данная схема использовалась в качестве основной.

Поэтапный ввод в эксплуатацию и наладка нового оборудования, монтируемого на ускорителе в промежутках между сеансами, продолжались в ходе

40-го сеанса, проведенного в период с 18 ноября по 11 декабря 2009 г. Одной из основных задач 41-го сеанса, состоявшегося с 25 февраля по 25 марта, являлось ускорение в нуклотроне ионов с атомным номером ≥ 100 .

К основным результатам ускорительных смен 40-го сеанса можно отнести

- исследование эксплуатационных характеристик модернизированных аппаратов системы криогенного обеспечения;

- продолжение работ по вводу в эксплуатацию и отладка новой аппаратуры управления параметрами цикла магнитного поля;

- ввод в опытную эксплуатацию цифровой системы управления частотой ускоряющего поля;

- испытание опытного образца нового источника питания корректирующих магнитов;

- опробование методики измерений потерь при транспортировке выведенного пучка из нуклотрона;

- ввод в опытную эксплуатацию АСУ системы инъекции.

В ходе 41-го сеанса получены следующие основные результаты:

- осуществлено ускорение пучка ионов ксенона до энергии 1,5 ГэВ/нуклон, на энергии 1 ГэВ/нуклон осуществлен медленный вывод;

- проверена работа магнитной системы кольца нуклотрона при уровне поля дипольных магнитов около 1,8 Тл;

- полностью завершена модернизация вакуумной системы пучковой камеры, проведен цикл исследований вакуумных условий в кольце нуклотрона;

- продолжена работа по модернизации системы криогенного обеспечения, опробован режим работы кольца с управляемым частичным отоплением магнитно-криогенной системы до азотной температуры, разработанный для проведения профилактических работ без прекращения сеанса;

- опробован режим работы ускорителя с питанием структурных магнитов и линз от источников постоянного тока, которые в двух последующих сеансах использовались как штатные при тестировании систем диагностики и коррекции орбиты;

- установлен на кольце и протестирован новый источник питания электростатического септума, предназначенного для медленного вывода пучка при ускорении, соответствующем величине поля в дипольных магнитах 2 Тл;

- испытаны первые серийные источники питания корректирующих магнитов;

- испытан новый датчик перехода структурных магнитов и линз из сверхпроводящего в нормальное проводящее состояние.

42-й «технологический» сеанс, проведенный с 10 по 30 декабря 2010 г., главной задачей имел ввод в эксплуатацию новой системы электропитания и защиты структурных магнитов и линз. Его важным результатом явилась демонстрация надежной работы магнитной системы при проектном значении поля магнитов, равном 2 Тл, что являлось одной из основных задач проекта

«Нуклотрон-М». Кроме того, была испытана цифровая система измерения положения равновесной орбиты, введены в опытную эксплуатацию новые источники питания корректирующих магнитов. При работе с циклом поля в этом сеансе все структурные магниты (дипольные и квадрупольные) питались от одного силового источника тока, при этом возможность оптимизации рабочей точки ускорителя отсутствовала и устойчивый режим ускорения не был реализован. В завершение сеанса в качестве резервного был отработан режим ускорения с регулировкой рабочей точки с помощью семейства квадрупольей, предназначенного для медленного вывода пучка. В этом режиме пучок дейтронов был ускорен примерно до 1,3 ГэВ/нуклон.

В ходе 43-го сеанса, проведенного уже в рамках нового проекта «Нуклотрон-НИСА» в период с 21 февраля по 23 марта 2011 г., продолжались работы по вводу в эксплуатацию новой системы питания и защиты структурных магнитов нуклотрона. Обеспечено ускорение и медленный вывод пучка дейтронов до энергии 3,2 ГэВ/нуклон. Проводились работы по тренировке электростатического септума, напряжение на котором было доведено примерно до 120 кВ (на стенде новый источник высоковольтного питания генерировал напряжения до 200 кВ). Продолжались работы по коррекции орбиты пучка, в том числе по реализации «бампа» орбиты в районе электростатического септума. Интенсивность пучка, захваченного в режим ускорения и ускоренного до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 кГс, была доведена примерно до $5 \cdot 10^{10}$ ионов. Основные задачи ускорительных смен как этого сеанса, так и на ближайшую перспективу — это подготовка к поэтапному повышению энергии и интенсивности ускоренного пучка, обеспечение требуемого качества медленного вывода во всем диапазоне энергий, вплоть до максимальной проектной.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Система криогенного обеспечения ускорительного комплекса ЛФВЭ [10] — крупнейшее в России сооружение для производства жидкого гелия, состоящее из целого ряда машин и аппаратов, выпущенных такими крупными предприятиями криогенной отрасли страны, как ОАО «НПО Гелиймаш», ОАО «Криогенмаш», ОАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», завод «Борец» и др. Это оборудование было запущено в эксплуатацию в начале 1990-х гг. и успешно использовалось для проведения всех сеансов нуклотрона, а также для промышленного производства жидкого гелия.

Однако со временем ресурс многих элементов криогенной системы был выработан. Это привело к существенному снижению надежности и экономической эффективности криостатирования сверхпроводящего кольца ускорителя.



Рис. 2. Модернизация криогенного оборудования. а) Транспортировка МО-800 в ОИЯИ после ремонта; б) демонтаж оборудования на КГУ-1600/4,5; в) демонтаж танка устройства тонкой очистки гелия; г) общий вид комплекса КГУ-1600/4,5 с установленным после ремонта блоком МО-800

теля в течение сеансов № 37, 38. В связи с этим перед сеансом № 39 был проведен капитальный ремонт и полномасштабная модернизация всех низкотемпературных аппаратов установок КГУ-1600, блока очистки сжатого гелия МО-800, сепараторов масла и другого оборудования. При этом было необходимо сначала разобрать агрегаты, транспортировать их на заводы-изготовители в Москву и Балашиху, а после этого — привезти обратно, смонтировать и провести комплексные пусконаладочные работы (рис. 2). В ходе работ были 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.

Тестирование и ввод в эксплуатацию модернизированных установок КГУ-1600/4,5 были начаты в марте и успешно завершены в мае 2009 г. Для обеспечения длительной бесперебойной работы в ходе подготовки к сеансу № 39

была предложена, опробована и налажена новая схема снабжения системы жидким гелием. Вместо газообразного гелия, доставляемого в специальном железнодорожном вагоне (как это делалось для всех предыдущих сеансов), жидкий гелий подвозился автотранспортом в сосудах Дьюара. Это позволяет обеспечивать поставки жидкого гелия абсолютной чистоты в любое время и бесперебойно. В дальнейшем эта схема применялась в качестве основной, а в ходе 43-го сеанса технология пополнения криогенной системы гелием из сосудов Дьюара была существенно усовершенствована. Жидкий гелий из сосудов переливался непосредственно в сборники гелиевых установок (без промежуточной газификации), что уменьшало энергозатраты на закачку и ожижение гелия.

В 39-м сеансе обновленное оборудование проработало без каких-либо сбоев. Наиболее серьезной проблемой, не позволявшей гарантировать надежную работу системы криогенного обеспечения, оставалось техническое состояние не прошедшего модернизацию компрессорного оборудования. В конце 2009 г. была достигнута договоренность о передаче ОИЯИ второго винтового компрессора «Каскад-80/25» в дополнение к работающему в системе. В период подготовки к 41-му сеансу был проведен монтаж линии нагнетания этого компрессора в коллектор высокого давления для включения его в систему криостатирования нуклотрона. Были отработаны пуск, остановка и проведены испытания совместной работы двух винтовых компрессоров.

В ходе 41-го сеанса новое оборудование было введено в эксплуатацию. Работа в 41-м сеансе подтвердила значительное повышение надежности криогенного комплекса при работе с применением двух компрессоров «Каскад-80/25». В этом же сеансе были отработаны сателлитные режимы работы, при которых на одной из установок КГУ-1600/4,5 отключаются все газовые турбодетандеры. При этом в работе находятся один винтовой компрессор «Каскад-80/25» и один поршневой компрессор 305НП-20/30, что приводит к ощутимой экономии потребления электроэнергии. Такая работа может обеспечить до 80 % режимов ускорителя. Также реализация сателлитных режимов позволяет производить некоторые виды ремонтов на установках КГУ-1600/4,5, не прекращая криостатирования кольца. В ходе 41-го сеанса был реализован режим с частичным управляемым отоплением кольца до азотной температуры, использование которого планируется в дальнейшем при проведении длительных сеансов работы ускорителя. Оптимизация режимов работы системы продолжалась в ходе сеансов № 42, 43.

Параллельно с модернизацией основного оборудования проводились работы по созданию современных систем диагностики и автоматического управления. В 2009 г. был приобретен, протестирован и введен в эксплуатацию специализированный газоанализатор, позволяющий осуществлять постоянный контроль процентного содержания примесей в газообразном гелии. В 43-м сеансе на криогенном комплексе была введена в работу автоматизированная си-

стема диагностики установок КГУ-1600/4,5 № 1 и № 2, позволяющая следить за изменением температур, уровней жидкого азота и жидкого гелия, числом оборотов турбодетандеров в реальном времени. В настоящее время система имеет выход в сеть интернет, что дает возможность ведущим технологам быть постоянно в курсе дел, а при необходимости и оперативно корректировать технологический процесс.

В результате модернизации хладопроизводительность системы достигла 4 кВт при температуре 4,5 К. Для полного криогенного обеспечения вновь создаваемых сверхпроводящих ускорителей планируется удвоить эту холодопроизводительность, доведя ее до 8 кВт при 4,5 К. С этой целью разрабатывается ожижитель гелия ОГ-1000 производительностью 1000 л/ч жидкого гелия и соединенные с ним сателлитные рефрижераторы колец бустера и коллайдера. Срок службы модернизированного оборудования существенно продлен, и оно уже сейчас вполне применимо для задач будущего проекта NICA/MPD.

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

К началу реализации проекта «Нуклотрон-М» восемь магниторазрядных насосов, которые были установлены на нуклотроне в 1990-х гг. для откачки пучковой камеры, нуждались в ревизии, ремонте и замене источников питания. Вакуум в пучковой камере достигался в основном за счет криогенной откачки элементами магнитной системы, находящимися при гелиевой температуре. Система измерения давления в пучковой камере практически отсутствовала. По оценкам, давление в пучковой камере нуклотрона составляло примерно 10^{-7} Торр [11].

До начала сеанса № 37 была произведена замена уплотнений на трубках дрейфа ЛУ-20, проведены работы по снижению интенсивности натекания в камеру нуклотрона. В ходе сеанса № 37 среднее давление на орбите нуклотрона было оценено по измерению времени жизни ионов H_2^+ на столе инжекции. Основным процессом, определяющим потери этих ионов, является их диссоциация при столкновениях с атомами остаточного газа. Измеренное характерное время жизни составило величину порядка 10 мс, что при сечении развала ионов H_2^+ на азоте при энергии 5 МэВ/нуклон примерно 10^{-16} см² дает оценку среднего вакуума в нуклотроне $\sim (1-2) \cdot 10^{-8}$ Торр. Независимая оценка была сделана по характерному времени уменьшения интенсивности циркулирующего пучка дейтронов, которое составляло примерно 1,1 с. Основным процессом, приводящим к потерям дейтронов, является однократное рассеяние на углы, соответствующие аксептансу камеры, и для параметров нуклотрона измеренное время жизни соответствует давлению азота $P \sim 1,5 \cdot 10^{-8}$ Торр, что находится в хорошем согласии с оценкой по време-

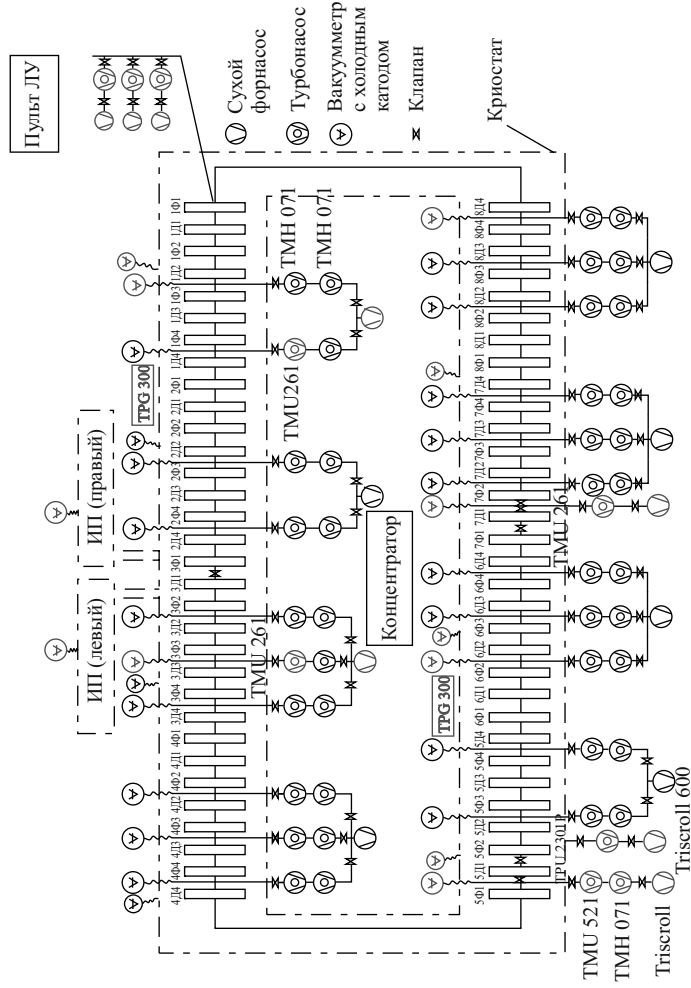


Рис. 3. План расположения оборудования, установленного на кольце нуклотрона в ходе модернизации вакуумной системы

ни жизни ионов H_2^+ . Во всех последующих сеансах среднее давление на орбите оценивалось по времени жизни пучка дейтронов на поле инжекции.

Модернизация вакуумной системы нуклотрона проводилась в два этапа. Первый этап включал в себя переделку проблемных участков вакуумной камеры с заменой уплотнений и шиберов, закупку, установку на кольцо и тестирование новых средств откачки и диагностики. Вновь установленное оборудование включает в себя 10 форвакуумных насосов, 18 турбомолекулярных, 12 форвакуумных датчиков, 26 вакуумметров с холодным катодом, масс-спектрометр (рис. 3). Кроме того, были отремонтированы и вновь установлены на кольцо магниторазрядные насосы. В сеансе № 43 для повышения скорости откачки по водороду был установлен и испытан насос с нераспыляемым геттером.

На втором этапе была создана система автоматического контроля и управления вакуумным оборудованием, обеспечивающая удаленное включение и выключение оборудования, измерение параметров и передачу информации на пульт управления, защиту оборудования в нештатных ситуациях.

Модернизация вакуумной системы, проведенная в тесном сотрудничестве с чешскими фирмами «Vacuum Praha» и FOTON, была полностью завершена в 2010 г. к началу 41-го сеанса. В дальнейшем улучшение вакуумных условий достигалось за счет выявления и устранения источников натекания газа и оптимизации работы откачного оборудования. В сеансе № 43 постоянная времени жизни пучка дейтронов, циркулирующего на поле инжекции, достигла 35–40 с (рис. 4), что соответствует среднему статическому давлению примерно $(4-8) \cdot 10^{-10}$ Торр (азотный эквивалент при комнатной температуре).

Таким образом, модернизация вакуумной системы позволила уменьшить давление остаточного газа в пучковой камере нуклотрона не менее чем на два порядка. Этого достаточно для решения основной задачи нуклотрона как элемента инжекционной цепочки тяжелоионного коллайдера — ускорения без потерь ядер тяжелых элементов от 0,6 до 4,5 ГэВ/нуклон.

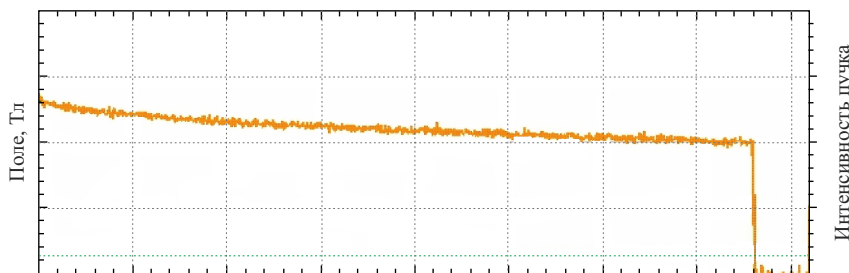


Рис. 4. Зависимость интенсивности пучка дейтронов от времени при циркуляции на столе инжекции. Полная шкала по горизонтальной оси соответствует времени 8 с. Начальная интенсивность примерно $3 \cdot 10^{10}$ ионов. 43-й сеанс работы нуклотрона

4. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ

Одной из основных задач проекта «Нуклотрон-М» являлась минимизация потерь частиц на всех стадиях ускорения пучка. Снижение потерь по поперечному движению планировалось достичь за счет оптимального выбора рабочей точки, согласования пучка при инжекции из ЛУ-20, коррекции равновесной орбиты и обеспечения стабильности ее положения в процессе ускорения. Для минимизации потерь по продольному движению планировалось ввести в эксплуатацию цифровую систему задания связи частоты ускоряющего напряжения и магнитного поля и реализовать адиабатический захват частиц в режим ускорения. Большая часть этих работ была выполнена, остальные находятся в завершающей стадии. В течение всего времени выполнения проекта проводилось поэтапное обновление элементов системы управления на основе современных компьютерных технологий.

В ходе сеанса №37 была проведена комплексная ревизия элементов системы коррекции орбиты — пикап-станций и корректоров. Определена временная стабильность результатов измерения. Для всех пикап-станций сняты функции отклика на изменение тока корректоров. По результатам проверки была проведена ревизия трех существующих пикап-станций (№ 2, 11 и 16), после которой они были протестированы при комнатной температуре, температуре жидкого гелия и вновь установлены на кольцо. Было принято решение об изготовлении и установке на кольцо восьми дополнительных пикап-станций в окрестностях фокусирующих линз. Первая из них, с электродами эллиптической геометрии, была изготовлена в ЦОЭП ЛФВЭ, прошла «холодные» испытания на стенде и испытана в ходе сеансов №42, 43. По результатам испытаний ее конструкция дорабатывается, и в ближайшее время будут изготовлены необходимые дополнительные станции. Аналогичные по конструкции пикап-станции планируется использовать в бустере комплекса NICA.

В течение всего времени реализации проекта проводились работы по развитию методов измерения интенсивности пучка в нуклотроне. К началу 38-го сеанса был установлен новый современный индукционный датчик тока циркулирующего пучка, позволяющий измерять интенсивность как сгруппированного, так и распущенного пучка. Большой объем работ по развитию диагностики пучков низкой интенсивности был выполнен при подготовке к ускорению тяжелых ионов. В 42-м сеансе был испытан новый профилометр на основе микроканальных пластин, установленный в «теплом» промежутке, в 43-м сеансе продолжалась оптимизация его работы. Начиная с 41-го сеанса проводились работы по измерению дробового шума пучка, которые планируется развивать в рамках тестирования элементов системы стохастического охлаждения на нуклотроне.

К началу 39-го сеанса нуклотрона была подготовлена и протестирована модернизированная система формирования магнитных полей, состоящая из следующих основных узлов:

- индукционных датчиков магнитных полей и аппаратуры преобразования сигналов с датчиков в цифровые серии;
- циклозадающей и обрабатывающей аппаратуры, формирующей опорные функции и обрабатывающей цифровые серии реальных полей, преобразующей с гальванической развязкой цифровые сигналы в аналоговые для регуляторов источников питания;
- источников питания, формирующих поле и градиент поля в магнитах и линзах нуклотрона в соответствии с опорными сигналами и сигналами обратной связи.

В ходе 39-го сеанса был проведен первый этап комплексных пусконаладочных работ по вводу системы в эксплуатацию. В процессе ее испытаний выявлен и устранен ряд технических проблем, осуществлена отладка программного обеспечения. Отработаны некоторые новые режимы работы магнитной системы, например, с двумя столами магнитного поля. С 40-го сеанса новая система эксплуатируется в штатном режиме. Созданная циклозадающая и обрабатывающая аппаратура позволяет

- формировать задающие полевые сигналы и обрабатывать сигналы реальных полей во всем динамическом диапазоне от 0 до 20 кГц с точностью 0,1 Гс (18 бит);
- обеспечивать гальваническую развязку опорных сигналов и сигналов обратной связи для регуляторов источников питания структурных магнитов и линз;
- осуществлять коррекцию частот бетатронных колебаний в течение цикла с шагом 1 Гс;
- осуществлять оперативный контроль всех управляющих и служебных сигналов;
- существенно расширить пользовательский интерфейс и диагностику системы формирования полей.

Существенное уменьшение потерь частиц в процессе ускорения было достигнуто за счет использования цифровой системы управления частотой ускоряющего поля, которая была введена в опытную эксплуатацию в ходе 40-го сеанса. В ходе последующих сеансов цифровая система использовалась в качестве основной, а аналоговая — в качестве резервной.

В отличие от использовавшейся в предыдущих сеансах аналоговой системы, в которой весь диапазон изменения частоты разбит на ряд поддиапазонов с независимой подстройкой закона изменения частоты в каждом из них, в цифровой системе частота ВЧ f_{rf} во всем диапазоне следует изменению

магнитного поля $B(t)$ в соответствии с теоретической формулой

$$\frac{f_{\text{rf}}(t)}{h} = \frac{c}{2\pi R} \frac{B(t)}{\sqrt{\left(\frac{E_0 A}{0,3\rho Z}\right)^2 + B(t)^2}},$$

где h — номер гармоники частоты обращения; $2\pi R$ — периметр орбиты в нуклотроне; ρ — радиус поворота частиц в дипольных магнитах. Энергия покоя иона $E_0 A$ задается для каждого изотопа с учетом реальной величины дефекта массы. Тонкая подстройка закона осуществляется подбором шага программы по магнитному полю ΔB_0 таким образом, чтобы точно соответствовать реальной серии магнитного поля.

Цифровая система позволяет в кратчайшее время (практически в течение одного цикла) переходить с ускорения одного сорта ионов на другой и (при необходимости) изменять номер гармоники ускоряющего поля. В ходе 40-го сеанса было опробовано ускорение дейтронов на 5, 6 и 7-й гармониках частоты обращения, что в зависимости от требуемой энергии ионов позволяет оптимизировать величину продольного акцептанса ускорителя и режим захвата в процесс ускорения.

Для проведения коррекции равновесной орбиты было необходимо расширение диапазона регулируемых токов в корректорах, кроме того, существовавшие источники питания корректоров не обеспечивали стабильного положения орбиты в процессе ускорения (измерение положения орбиты в разных точках цикла было проведено в ходе сеанса №38). Для решения этих проблем совместно с Электротехническим исследовательским и проектным институтом (EVPU a. s., г. Нова Дубница, Словакия) были разработаны новые источники питания корректоров. Опытный образец источника прошел «холодные» испытания на стенде, был установлен на кольце нуклотрона и испытан в ходе 40-го сеанса. На основе результатов испытаний в конструкцию были внесены необходимые изменения, первые четыре серийных источника были испытаны в 41-м сеансе. К началу 42-го сеанса была создана новая система коррекции орбиты, включающая в себя 32 источника питания. Поэтапный ввод ее в эксплуатацию, начатый в 42-м сеансе, продолжался и в ходе 43-го сеанса.

К началу 42-го сеанса были завершены работы по модернизации системы оперативного измерения положения орбиты и разработано необходимое программное обеспечение. Новая цифровая система обладает хорошей помехозащищенностью и позволяет контролировать положение орбиты в течение всего процесса ускорения. В течение 42-го и 43-го сеансов эта система проходила тестирование параллельно с существовавшей ранее аналоговой системой.

Для тестирования и оптимизации работы систем коррекции и измерения положения орбиты активно использовался впервые испытанный в ходе 41-го

сеанса режим работы ускорителя с питанием структурных магнитов и линз от источников постоянного тока. Ток в структурных магнитах, соответствующий полю инжекции (примерно 80 А), возбуждается источником стабилизированного тока фирмы Glassman, а второй аналогичный источник используется для питания структурных линз. В будущем планируется изготовить специализированные источники тока и использовать этот режим как штатный при тестировании устройств диагностики и измерении параметров ускорителя.

В результате модернизации системы коррекции орбиты в ходе 43-го сеанса интенсивность пучка дейтронов, захваченного в режим ускорения и ускоренного до энергии, соответствующей полю в дипольных магнитах 2 кГс, была доведена примерно до $5 \cdot 10^{10}$ частиц (рис. 5).

Дальнейшее повышение интенсивности ускоренного пучка планируется достичь за счет его согласования при инжекции, реализации адиабатического захвата в процесс ускорения и стабилизации орбиты в процессе ускорения (в сеансах № 42, 43 система коррекции использовалась в статическом режиме).

В ходе сеансов № 37, 38 исследовалось несколько режимов работы канала транспортировки пучка из ЛУ-20 в нуклотрон. Достигнута устойчивая работа при параметрах, позволяющих независимое согласование дисперсионной функции и параметров Твисса в точке инжекции. Завершение этих работ планируется на ближайшие сеансы.

Существенного увеличения интенсивности ускоренного пучка планируется достичь после реализации адиабатического захвата в процесс ускорения. В настоящее время инжекция пучка осуществляется в линейно растущее магнитное поле при амплитуде ВЧ-напряжения до 8 кВ, при этом более половины частиц оказываются за пределами сепаратриссы. Кроме того, такой режим ведет к существенному возрастанию разброса по импульсу и пульсациям тока пучка на начальной стадии ускорения. Суть адиабатического захвата сводится к инжекции пучка на стол магнитного поля при амплитуде

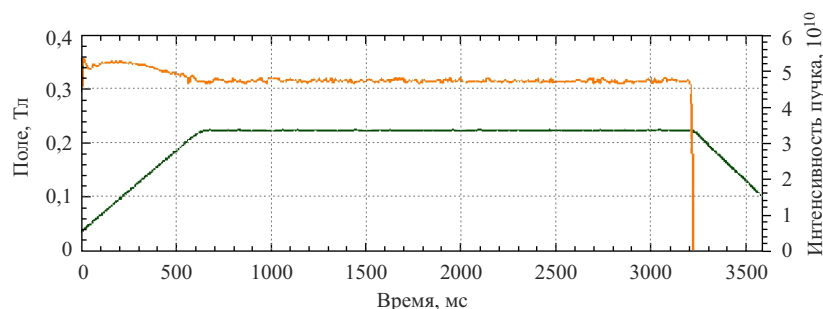


Рис. 5. Интенсивность пучка дейтронов в процессе ускорения. Поле на столе 2 кГс, интенсивность на столе $4,8 \cdot 10^{10}$ ионов. 43-й сеанс работы нуклотрона

ВЧ-напряжения на уровне нескольких сот вольт. При захвате частиц амплитуда ВЧ-напряжения «квазиadiaбатически» повышается, после чего осуществляется переход к параболическому, а затем к линейному росту магнитного поля. При этом в сепаратрису захватывается практически 100 % инжектированных частиц при минимальном росте разброса по импульсу [12].

Подготовительные работы по оценке параметров ВЧ-системы, необходимых для реализации адиабатического захвата, были выполнены в ходе 37-го сеанса. К 39-му сеансу был разработан прототип системы управления амплитудой ускоряющего поля, подготовленная аппаратура была испытана в ходе сеанса и продемонстрирована ее работоспособность. Ввод системы в эксплуатацию планируется по завершении модернизации системы электропитания структурных магнитов и линз, когда будет достигнута проектная стабильность поля на столе инъекции.

В ходе реализации проекта «Нуклотрон-М» продолжались работы по развитию диагностики на канале медленного вывода. С конца 2008 г. проводились работы по созданию системы контроля токов в элементах магнитной оптики на выведенных пучках, предназначенной для осуществления персоналом ускорительных служб и физических экспериментов оперативного контроля и протоколирования величин токов магнитных элементов каналов формирования и транспортировки выведенных пучков, а также других медленно меняющихся сигналов. Система была успешно протестирована в ходе 39-го сеанса и в штатном режиме использовалась в сеансе №43. В настоящее время пользовательская компонента программного обеспечения системы обеспечивает следующие возможности:

- отображение в удобной табличной форме средних значений сигналов и их вариаций (нестабильность) по серии измерений в цикле ускорителя;
- контроль отклонения среднего от заданного значения и превышение заданного уровня нестабильности;
- запись/загрузка конкретного режима (таблицы);
- ведение протокола, т. е. последовательная запись в каждом цикле измеренных средних и вариаций;
- графическое отображение измеренной в цикле серии (графики изменения сигнала в цикле) во временном и частотном представлении;
- сохранение графических экранов.

К началу 40-го сеанса были изготовлены два детектора, одинаковые по геометрии и содержащие уменьшенное количество вещества в области прохождения пучка, с помощью которых были проведены измерения потерь ионов по каналу транспортировки на участке трассы от выходного фланца ускорителя до фокуса f_4 канала ВП-1 общей протяженностью около 70 м. Измеренное значение величины потерь на всей длине тестируемого сегмента транспортировки выведенного пучка (от выхода из ускорителя до фокуса f_4) составило примерно 27 %.

По результатам измерений видно, что для эффективного проведения физических экспериментов на выведенном пучке, критичных к его параметрам, требуется существенная модернизация каналов транспортировки, включая систему электропитания.

В 43-м сеансе нуклотрона на выведенном пучке успешно испытаны новые профилометры, включающие аналоговые проволочные пропорциональные камеры и прикамерную электронику, которыми в 2011–2012 гг. будут оснащены каналы транспортировки выведенных пучков. В этом сеансе было произведено первое включение новой подсистемы диагностики пучка медленного вывода. Подсистема предназначена для измерения пространственных характеристик выведенного пучка в четырех точках начальной части канала транспортировки с использованием проволочных пропорциональных камер и измерения интенсивности пучка с помощью ионизационной камеры. Предусмотрен удаленный просмотр данных.

5. УСКОРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Демонстрация возможности ускорения тяжелых ионов в нуклотроне рассматривалась как комплексная проверка всех основных систем ускорительного комплекса. Основными проблемами, которые необходимо было решить для успешного ускорения тяжелых ионов, являлись обеспечение высокой интенсивности пучка при инжекции, достаточной для настройки режимов циркуляции пучка и захвата в процесс ускорения, и минимизация потерь ионов в процессе их ускорения. Величина отношения заряда к массе ионов в источнике электронно-струнного типа «Крион-2», используемом на ускорительном комплексе нуклотрон для получения тяжелых ионов в высоком зарядовом состоянии, ограничена максимально возможной энергией электронов в струне, и для ионов с $A \geq 100$ она не может существенно превышать $1/3$. Ускоритель ЛУ-20 рассчитан на ускорение ионов с отношением заряда к массе начиная с $q/A = 1/3$, однако ни ЛУ-20, ни канал транспортировки, ни нуклотрон никогда ранее не использовались для ускорения таких ионов.

Поэтапная подготовка всех элементов и систем ускорительного комплекса к решению этой задачи проводилась с начала 2009 г. в промежутках между сеансами нуклотрона и была завершена в ходе 41-го сеанса. Она включала в себя следующие, относительно независимые работы:

- оптимизацию режимов работы источника «Крион-2» для получения многозарядных тяжелых ионов;
- модернизацию источников питания элементов канала транспортировки от ЛУ-20 до нуклотрона;
- подготовку ЛУ-20 к работе с ионами с $q/A = 1/3$;

— отработку режимов работы кольца нуклотрона при ускорении ионов с $q/A = 1/3$.

Основные потери тяжелых ионов в процессе ускорения связаны с их взаимодействием с атомами остаточного газа, приводящим к изменению зарядового состояния ионов. Для тяжелых ионов на начальном участке ускорения превалирует процесс захвата электрона, а при высокой энергии — процесс обдирки. Так, полное сечение потерь ионов $^{124}\text{Xe}^{42+}$ на азоте составляет примерно 10^{-16} см² при энергии инжекции и снижается до нескольких единиц 10^{-19} см² при увеличении энергии до 1 ГэВ/нуклон. При таком уровне сечений и при темпе роста поля 0,6 Тл/с можно рассчитывать на ускорение нескольких процентов от начальной интенсивности пучка при давлении остаточного газа не хуже, чем несколько нТорр.

Требуемые вакуумные условия в пучковой камере нуклотрона были достигнуты по завершении первого этапа модернизации вакуумной системы [4, 5], что явилось основной предпосылкой к ускорению тяжелых ионов. Однако даже при оптимистичных оценках потерь ионов на разных этапах процесса ускорения ожидаемое количество ускоренных ионов не может превышать примерно 0,1 % от их количества на выходе из источника, поэтому самое серьезное внимание было уделено развитию средств диагностики пучков низкой интенсивности. Минимизация потерь ионов в процессе ускорения была достигнута в основном за счет использования цифровой системы управления частотой ускоряющего поля, введенной в опытную эксплуатацию в ходе 40-го сеанса, и за счет оптимизации режима работы циклозадающей аппаратуры.

5.1. Оптимизация режима работы источника «Крион-2». В качестве кандидатов на ускорение в нуклотроне рассматривалось несколько сортов ионов, в том числе, например, йода. Основными критериями при отборе были энергия ионизации до требуемого зарядового состояния, простота инжекции атомов в электронную струну, возможность реализации ион-ионного охлаждения и т. д. В результате предварительных экспериментов окончательный выбор был сделан в пользу разделенного изотопа ^{124}Xe , у которого в зарядовом состоянии 42+ отношение заряда к массе $q/A = 42/124 = 0,3387 \geq 1/3$, что удовлетворяет требованиям ЛУ-20, а энергия ионизации составляет 3,07 кэВ.

В течение 2009 г. на источнике «Крион-2» было проведено четыре сеанса (по пять недель каждый) с целью отработки оптимальных режимов получения высокозарядных ионов Хе. Сначала для отработки режимов инжекции и ионизации использовался разделенный изотоп криптона ^{84}Kr . Отношение заряда к массе, равное 1/3, соответствует у этого иона зарядовому состоянию 28+, энергия ионизации для которого равна 2,95 кэВ. Идентификация ионов на выходе источника проводилась времяпролетным (TOF) методом. Во времяпролетном спектре ионов криптона наблюдается хорошее разделение

по зарядовым состояниям. В дальнейшем положение линий Кг использовалось для определения зарядностей ионов Хе, в спектре которого линии не разделяются.

В результате оптимизации была достигнута интенсивность ионов целевой зарядности на уровне несколько единиц 10^7 в импульсе длительностью, соответствующей периоду обращения частиц в нуклотроне на энергии инъекции.

5.2. Подготовка ЛУ-20 к ускорению ионов с $q/A = 1/3$, модернизация канала инъекции. После 39-го сеанса нуклотрона на ускорителе ЛУ-20 и канале транспортировки пучка в нуклотрон проводился ряд работ, ориентированных на оптимизацию режима ускорения, уменьшение потока газонатекания из канала инъекции в кольцо нуклотрона, улучшение средств диагностики пучка, замену источников питания корректоров канала транспортировки. Кроме того, в промежутках между сеансами нуклотрона на ЛУ-20 было проведено три специализированных сеанса работы.

В сентябре 2009 г. была осуществлена юстировка трубок дрейфа ускоряюще-фокусирующей структуры ЛУ-20 с целью повышения эффективности процесса ускорения, по завершении которой был проведен сеанс по ускорению ионов дейтерия.

Сразу после завершения 40-го сеанса нуклотрона на ЛУ-20 был проведен сеанс с пучком от лазерного источника, в ходе которого генератор «Родонит» был подготовлен к работе на максимальном уровне мощности и осуществлено ускорение ионов C^{4+} .

Для транспортировки ускоренных в ЛУ-20 ионов с $q/A = 1/3$ необходимо было увеличить токи питания структурных элементов канала инъекции пучка в нуклотрон в полтора раза по сравнению с режимом транспортировки дейтронов и протонов. Наиболее серьезная модернизация потребовалась для цепи питания одного из поворотных магнитов. При существовавшей схеме питания ток в цепи этого магнита был ограничен потерями в силовой трассе. В ходе подготовки к ускорению тяжелых ионов была доработана схема используемого источника питания, увеличено сечение силовых кабельных трасс в корпусах 1 и 1А, в переключающем пункте корпуса 1Б. В результате потери в силовой трассе были снижены в три раза, что позволило обеспечить требуемую величину тока. За счет использования разработанного и введенного в работу активного фильтра была получена относительная стабильность тока на уровне $3 \cdot 10^{-5}$, что позволило осуществить эффективную проводку пучка по каналу.

Ключевым в подготовке к ускорению ионов ксенона в нуклотроне являлся сеанс работы ЛУ-20 с источником «Крион-2» по ускорению тяжелых ионов, проведенный накануне 41-го сеанса нуклотрона. В конце января 2010 г. источник «Крион-2» был перевезен в здание инжектора и после проведения необходимых подготовительных работ установлен на высоковольтном терми-

нале инжекционного комплекса ЛУ-20. В ходе сеанса ЛУ-20 источник обеспечил следующие сорта пучков высокозарядных ионов в каждом импульсе продолжительностью 6,7 мкс:

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| $^{84}\text{Kr}^{28+}$ | ($3,5 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{84}\text{Kr}^{29+}$ | ($3,2 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{84}\text{Kr}^{30+}$ | ($3,0 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{124}\text{Xe}^{41+}$ | ($3,0 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{124}\text{Xe}^{42+}$ | ($3,0 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{124}\text{Xe}^{43+}$ | ($2,7 \cdot 10^7$ ионов за импульс), |
| $^{124}\text{Xe}^{44+}$ | ($1,5 \cdot 10^7$ ионов за импульс). |

Пучки ионов $^{84}\text{Kr}^{29+}$ (время ионизации 500 мс) и $^{124}\text{Xe}^{42+}$ (время ионизации 1000 мс) были ускорены в ЛУ-20 до энергии 5 МэВ/нуклон и доведены до области инжекции в нуклотрон с эффективностью 30 %.

Для контроля тока пучка при инжекции в нуклотрон была проведена модификация профилометра, расположенного на участке инжекции в кольце. Был разработан и изготовлен специализированный высокочувствительный преусилитель, а 60 позолоченных вольфрамовых нитей профилометра, диаметром 50 мкм каждая, были объединены друг с другом, что позволило производить настройку режимов инжекции пучков тяжелых ионов низкой интенсивности.

5.3. Отработка режимов работы нуклотрона. Ускорение ионов ксенона.

До 41-го сеанса ускорение ионов с $q/A = 1/3$ на нуклотроне не проводилось, а достигнутая интенсивность пучка тяжелых ионов не позволяла провести настройку циркуляции и коррекцию орбиты с использованием существующих средств диагностики. Поэтому работа в сеансе была начата с лазерным источником. Первоначально проверка управляющей и диагностической аппаратуры и настройка циркуляции при инжекции были проведены на пучке дейтронов. После этого был осуществлен переход на ускорение ионов C^{4+} , интенсивность которого сравнима с интенсивностью пучка дейтронов. Необходимость оптимизации режимов работы нуклотрона на ионах углерода вызвана тем, что поле в дипольных магнитах при инжекции ионов с $q/A = 1/3$ в полтора раза выше, чем при ускорении дейтронов и протонов, и, соответственно, требуется перестройка источников питания корректирующих магнитов.

Настройка режимов ускорителя на ионах углерода была завершена в течение двух рабочих смен, после чего была проведена замена лазерного источника на источник «Крион-2» и начаты работы по ускорению ионов ксенона. Первоначально процесс ускорения был настроен при тех же режимах, что и при ускорении углерода (амплитуда поля составляла 5250 Гс). Измерение относительной интенсивности пучка в процессе ускорения производилось ионизационным датчиком. Для управления частотой ВЧ использовалась цифровая система, а положение рабочей точки соответствовало минимуму потерь. По

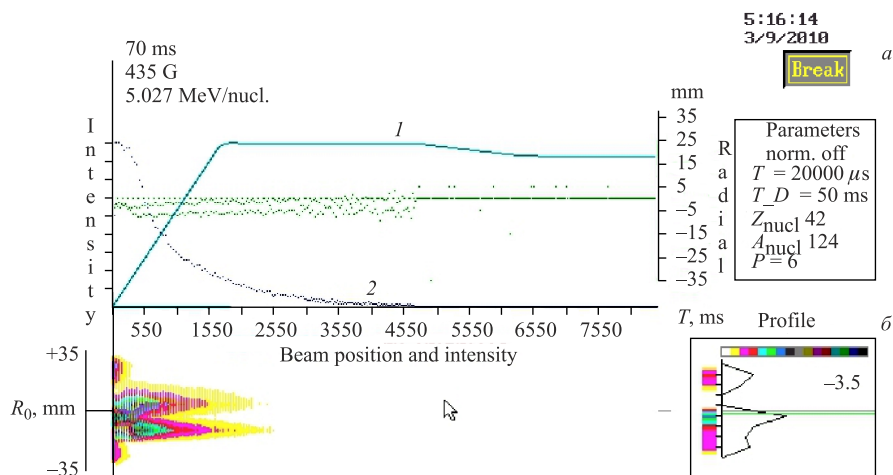


Рис. 6. Ускорение $^{124}\text{Xe}^{+42}$. а) Магнитное поле на столе (кривая 1) 5250 Гс. Кривая 2 — интенсивность пучка в процессе ускорения, измеренная ионизационным датчиком. Экспоненциальный спад интенсивности на столе поля соответствует потере ионов из-за перезарядки на остаточном газе. б) Горизонтальный профиль пучка на начальном этапе ускорения. 41-й сеанс

времени жизни ускоренного пучка на столе магнитного поля была сделана оценка среднего вакуума на орбите ускорителя. В зависимости от состава газа давление лежит в пределах 5–8 нТорр.

Примерно через сутки после начала работы с ксеноном штатными датчиками в канале медленного вывода были зарегистрированы ионы на выходе ускорителя. После этого работа с пучком была приостановлена на время проведения профилактических работ в системе криогенного обеспечения. В это время был реализован режим работы комплекса с частичным управляемым отеплением криомагнитной системы кольца нуклотрона до азотных температур, использование которого планируется в дальнейшем при проведении длительных сеансов работы ускорителя.

15 марта были восстановлены основные режимы работы ускорителя (рис. 6), а 16 марта реализован медленный вывод ионов ксенона на поле 7,9 кГс, что примерно соответствует энергии ионов 1 ГэВ/нуклон. Интенсивность выведенного пучка на выходном фланце ускорителя составляла несколько тысяч ионов за цикл. На этой энергии были проведены методические исследования по регистрации ионов и проведено облучение мишени по программе «Энергия + трансмутация». В завершение сеанса с источником «Крион-2» осуществлено ускорение ионов ксенона до поля 10 кГс, что соответствует энергии 1,5 ГэВ/нуклон.

6. СОЗДАНИЕ НОВОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И ЗАЩИТЫ СТРУКТУРНЫХ МАГНИТОВ. ДОСТИЖЕНИЕ ПРОЕКТНОГО ПОЛЯ

Основной задачей развития систем питания и защиты структурных магнитов и линз нуклотрона являлось обеспечение надежной и длительной работы с магнитным полем до 2 Тл (что соответствует току в обмотках, равному 6000 А) и реализация возможности оптимизации рабочей точки ускорителя. Решение этой задачи было невозможно при существовавшей схеме электропитания магнитной системы, показанной на рис. 7. Основой силовой части источников 19ТВ (питающего квадрупольные линзы) и 20ТВ (питающего дипольные магниты) являлся доработанный шестифазный выпрямитель типа ТПВ-3150/230 с номинальными параметрами 150 В × 3150 А. Источник 19ТВ состоял из двух таких выпрямителей, соединенных параллельно и совместно образующих 12-фазную схему выпрямления с номинальными параметрами 150 В × 6300 А. Источник 20ТВ также состоял из двух таких же выпрямителей, соединенных последовательно и совместно образующих 12-фазную схему выпрямления с номинальными параметрами 300 В × 3150 А. Соответственно, источник 20ТВ мог обеспечить номинальный ток 6000 А в цепи диполей только при среднем токе, не превышающем 3150 А. Работа с длинными столами тока на уровне 6000 А была возможна только при низкой частоте повторения циклов.

Кроме того, оптимальные настройки регулятора 19ТВ, определяемые условиями ускорения пучка, таковы, что использование существующего токодобавочного источника 42ТВ-Ф для гибкого выбора рабочей точки ускорителя было практически невозможно. Фактически до проведения модернизации ускоритель эксплуатировался при равных токах в фокусирующих и дефокусирующих линзах, что позволяло перемещать рабочую точку на диаграмме частот только вдоль прямой линии.

Еще одним серьезным минусом существовавшей схемы, ограничивающим возможности ее эксплуатации при поле 2 Тл, являлась недостаточная надежность системы эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов и линз в случае возникновения нормальной проводящей зоны. Это выражалось прежде всего в невозможности предварительной комплексной проверки и тестировании силовых элементов и электроники устройств системы эвакуации энергии — тиристорных ключей (КТ), предназначенных для включения резисторов гашения поля в силовые цепи по внешнему сигналу от системы детектирования нормальной зоны. Особенную озабоченность вызывало расположение силовых полупроводниковых приборов и электроники КТ2 и КТ4 в непосредственной близости к криостату нуклотрона в зоне серьезных радиационных нагрузок, которые еще более возрастут при достижении проектных величин NICA/MPD. Кроме того, в существовавшей схеме (фактически маке-

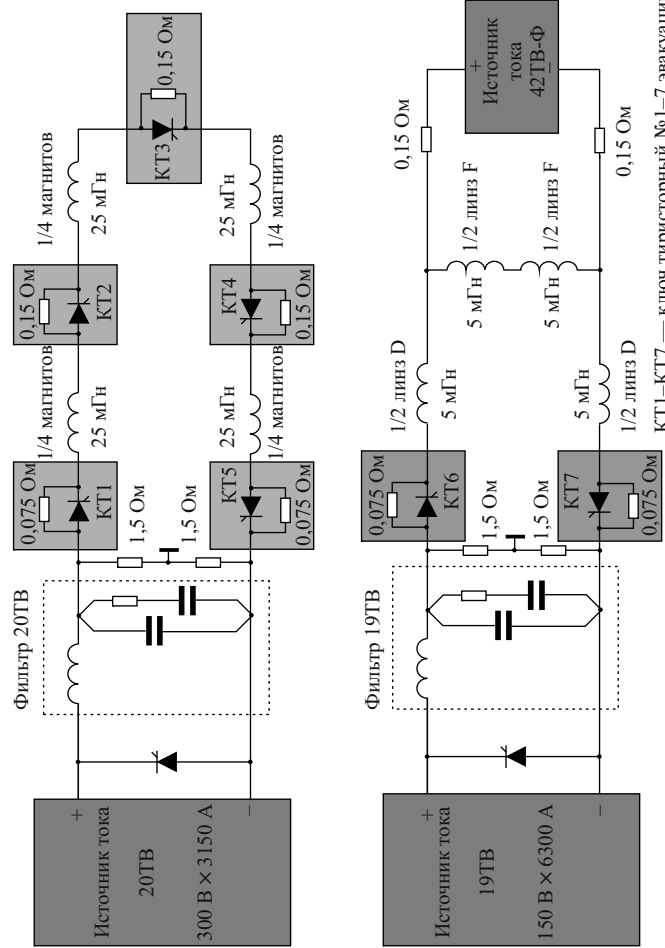


Рис. 7. Схема электропитания структурных магнитов (20ТВ) и фокусирующих (F) + дефокусирующих (D) (19ТВ) линз нуклотрона, существовавшая до модернизации

тном варианте, построенном для запуска нуклотрона и с тех пор не модернизированном) для эвакуации энергии из сверхпроводящих элементов использовалось семь устройств КТ (пять КТ в цепи питания дипольных магнитов и два КТ в цепи квадрупольных линз). Как показали расчеты, в случае срыва сверхпроводимости и одновременном возможном выходе из строя одного из силовых тиристоров ключа КТ при эвакуации тока 6000 А может возникнуть недопустимый перегрев элемента сверхпроводящей цепи.

При подготовке проекта «Нуклотрон-М» была разработана концепция модернизации системы электропитания структурных дипольных и квадрупольных магнитов, основанная на принципе общей связи этих структурных элементов кольца нуклотрона, источников питания 19ТВ и 20ТВ, ключей эвакуации энергии КТ1–КТ6(КТ7) и системы датчиков перехода (рис. 8). Принципиальная возможность такого подхода основана на том, что при интегральных значениях магнитного поля в диполях и градиента в квадрупольях, заданных на этапе проектирования нуклотрона, номинальные токи их питания отличаются не более чем на $\pm 10\%$ в требуемом диапазоне изменения бетатронных частот.

Практическая реализация этой схемы предполагала модернизацию существующих источников 19ТВ и 20ТВ, разработку и создание двух новых источников разбаланса тока — для фокусирующих и дефокусирующих линз, демонтаж старых кабельных трасс и монтаж нескольких километров новых. Для повышения надежности системы защиты необходимо было разработать и создать новые датчики обнаружения перехода сверхпроводящих магнитов в резистивное состояние, разработать и создать новые ключи эвакуации энергии.

Тестирование возможностей новой схемы электропитания структурных магнитов и линз нуклотрона было проведено в ходе сеанса № 37. При этом в качестве основного использовался источник 20ТВ, а источник 19ТВ обеспечивал токодобавку в цепи квадрупольных линз. Была продемонстрирована устойчивая работа схемы на малых уровнях тока, в результате были уточнены требования к динамическим характеристикам вновь разрабатываемых источников токодобавки для линз F и D.

На основании анализа результатов сеанса № 37 принято окончательное решение о реализации новой схемы электропитания структурных магнитов и линз нуклотрона, конкретизирована программа работ. С конца 2008 г. были начаты работы по демонтажу старых кабельных трасс и монтажу кабельных трасс для новой схемы питания. В цокольном этаже синхрофазотрона в радиационно-защищенной зоне было подготовлено место для размещения шести новых ключей эвакуации энергии с удаленным управлением. После снятия характеристик тиристоров и резисторов новых ключей были сформированы сборки силовых полупроводниковых приборов с допустимым разбросом параметров, произведен монтаж и наладка шести устройств КТ.

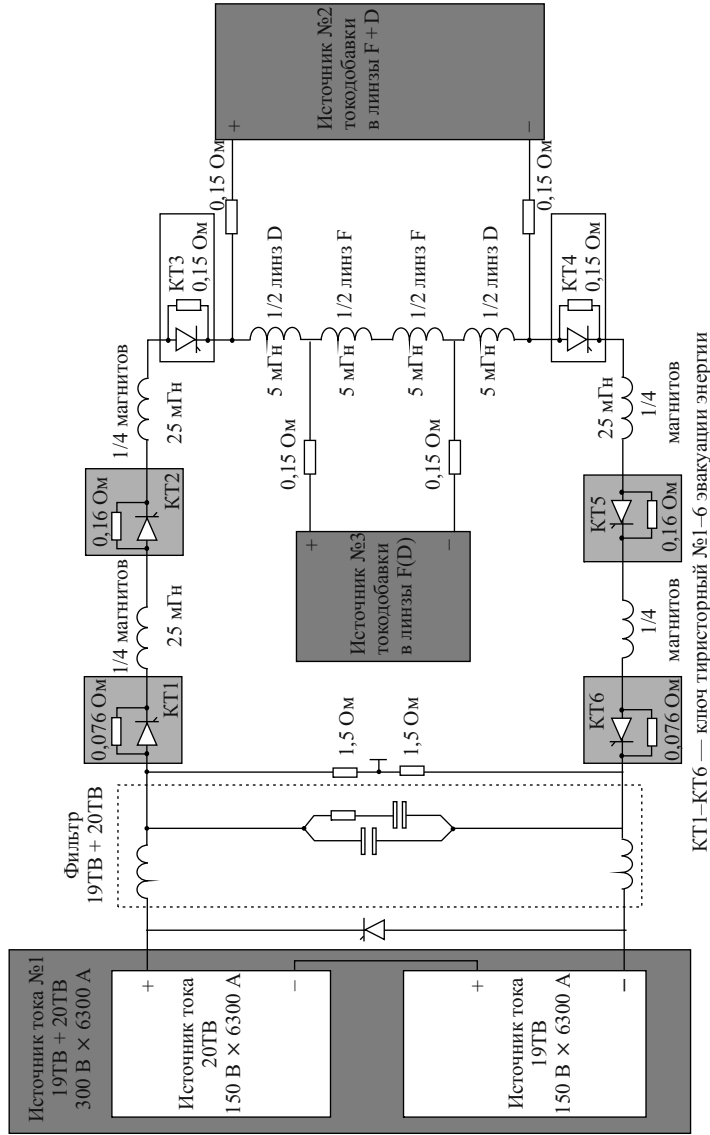


Рис. 8. Схема электропитания при последовательном соединении структурных дипольных магнитов, фокусирующих (F) и дефокусирующих (D) линз нуклотрона

Для обеспечения надежной работы магнитной системы нуклотрона при проектной величине поля была создана новая система датчиков перехода в нормально проводящее состояние. Испытания макета датчика перехода проводились в ходе сеанса № 39, после чего в его конструкцию были внесены необходимые изменения. В ходе 41-го сеанса с помощью нового датчика впервые на нуклотроне зафиксирован реальный переход в активную фазу, и этот процесс показан визуально. Для перевода выбранного для испытаний магнита из сверхпроводящего в резистивное состояние использовался нагреватель, вмонтированный в обмотку магнита. Была продемонстрирована устойчивая и надежная работа нового датчика перехода, после чего начато их серийное изготовление.

Все технические решения, положенные в основу новой системы электропитания, последовательно проверялись в ходе сеансов нуклотрона. В ходе 39-го сеанса проведено комплексное испытание систем защиты и электропитания при работе в цикле с полем на столе величиной 1,5 Тл. При этом было осуществлено ускорение пучка дейтронов до энергии примерно 3,8 ГэВ/нуклон. На основании анализа результатов работы магнитной системы при поле 1,5 Тл проведена доработка ключей эвакуации энергии, что позволило в 41-м сеансе провести новое испытание. При поэтапном повышении уровня поля от 1 до 1,5 Тл имитировалось срабатывание датчиков перехода и записывались режимы работы ключей эвакуации энергии. В результате был сделан вывод о возможности безопасного повышения уровня поля. В течение нескольких сотен циклов магнитная система отработала на максимальном поле 1,8 Тл. За этот период произошло несколько срывов цикла при выходе на стол поля, при этом ключи эвакуации отработали штатным образом. Дополнительной задачей этого эксперимента было убедиться, что за прошедшие примерно 17 лет параметры магнитов, которые до установки в кольцо нуклотрона были испытаны на стенде при работе с полем до 2,2 Тл, существенно не изменились.

Основной объем монтажных работ по созданию новой схемы электропитания и защиты выполнен в 2010 г. по завершении 41-го сеанса. До начала 42-го сеанса основной источник питания, созданный на основе доработанных источников 19ТВ и 20ТВ, и система эвакуации энергии были протестированы на эквивалентной нагрузке (рис. 9). В начале сеанса основной источник и источник токоотбора для квадрупольных линз тестировались в цикле с малым уровнем поля. На основе полученных результатов основной источник был оптимизирован для надежной работы при максимальном поле. В ходе сеанса продолжалась оптимизация режимов работы системы криогенного обеспечения, что позволило гарантированно обеспечить требуемый расход жидкого гелия при повышенном уровне поля и длительной активной части цикла.

В течение 29 декабря 2010 г. основной источник питания и система защиты были последовательно протестированы в циклах с полем на столе

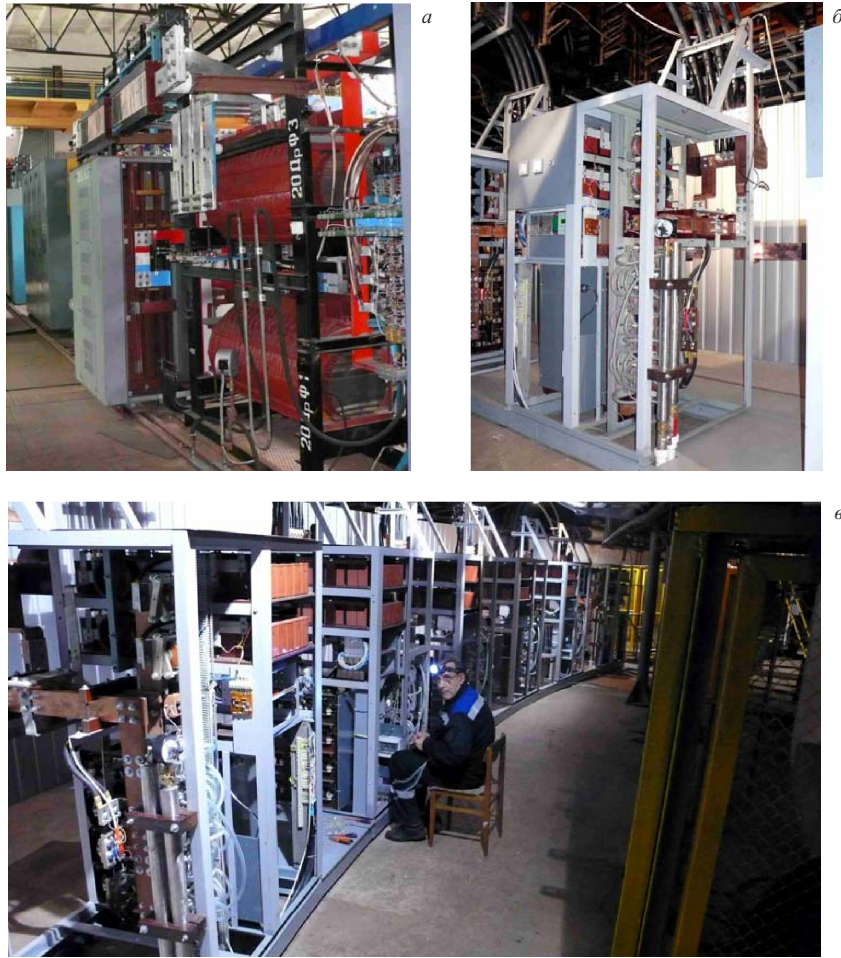


Рис. 9. Модернизация оборудования электропитания нуклотрона: а) тиристорный выпрямитель и фильтр источника 20ТВ; б) тиристорный ключ КТ4; в) общий вид устройств системы эвакуации энергии КТ1–КТ6

1,4, 1,6 и 1,8 Тл. Все системы работали штатным образом, после чего поле на столе было увеличено до 2 Тл. В этом эксперименте темп роста и спада поля составлял 6 Тл/с, что соответствовало длительности активной части цикла 7 с при периоде следования циклов 12 с (рис. 10).

Обеспечение надежной работы магнитной системы при проектном уровне поля явилось прямым подтверждением правильности основных технических решений, положенных в основу новой системы электропитания и защиты.

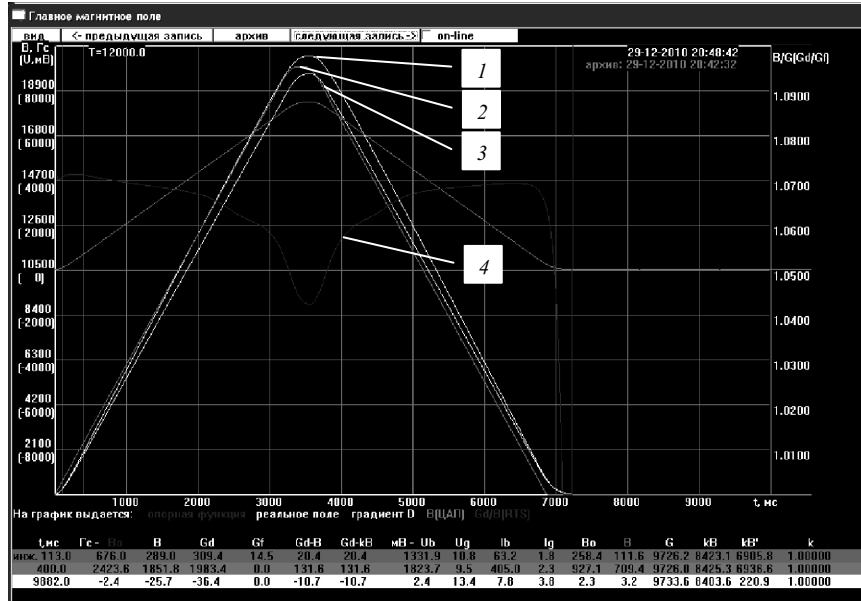


Рис. 10. Диаграмма цикла с полем дипольных магнитов на столе 2 Тл. Кривая 2 — опорная функция, кривые 3 и 1 — поле магнитов и градиент квадрупольных линз соответственно. Кривая 4 — отношение градиента линз к полю дипольных магнитов

В 43-м сеансе продолжался ввод в эксплуатацию элементов системы электропитания и защиты: были отработаны режимы работы источника токоотбора квадрупольных линз, позволившие осуществить ускорение пучка дейтронов и медленный вывод до энергии 3 ГэВ/нуклон. Получены необходимые данные для оптимизации схемы источника при подготовке к следующему сеансу с целью обеспечения требуемого качества растяжки при медленном выводе. Завершение работ по модернизации системы электропитания магнитов предполагает ввод в эксплуатацию еще одного источника питания линз (для гибкой настройки рабочей точки ускорителя), обеспечение требуемого качества медленного вывода во всем диапазоне энергий, вплоть до максимальной проектной. Эти задачи планируется решить до конца 2012 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЛФВЭ

Успешное завершение проекта «Нуклотрон-М» открыло путь к дальнейшему развитию ускорительного комплекса ЛФВЭ, цель которого — создание современного ускорительно-коллайдерного комплекса NICA с широкой

программой фундаментальных и прикладных исследований. В области фундаментальных исследований эта программа на качественно новом уровне продолжает традиционные для ЛФВЭ исследования по релятивистской ядерной физике и физике спина частиц.

Для достижения этих целей на базе существующего синхротрона нуклотрон создается новый ускорительный комплекс, призванный обеспечить осуществление

- экспериментов на выведенных пучках ионов (от протонов до ядер золота или урана) и кинетической энергией до 13,8 ГэВ (для протонов), 6 ГэВ/нуклон (для дейтронов) и до 4,5 ГэВ/нуклон для тяжелых ядер (таких, как свинец, золото или уран);

- экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов с кинетической энергией в диапазоне от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон при светимости на уровне $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

- экспериментов на встречных пучках ионов и легких ядер в указанном выше диапазоне энергий и уровне светимости;

- экспериментов на встречных поляризованных пучках легких ионов с кинетической энергией в диапазоне от 5 до 12,5 ГэВ для протонов и в диапазоне от 2 до 5,8 ГэВ/нуклон для дейтронов при уровне светимости не ниже чем $10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Вновь создаваемый ускорительный комплекс будет состоять из (рис. 11)

- нового тяжелоионного источника электронно-струнного типа,
- источника поляризованных протонов и дейтронов,
- модернизированного линейного ускорителя ЛУ-20,
- нового тяжелоионного линейного ускорителя,
- нового сверхпроводящего бустерного синхротрона (бустера),
- существующего сверхпроводящего тяжелоионного синхротрона нуклотрона,
- установки на встречных пучках, состоящей из двух сверхпроводящих колец с двумя точками встречи пучков,
- нового набора каналов транспортировки пучка, а также набора каналов для вывода пучка на экспериментальные установки.

Реализация проекта подразумевает необходимое развитие криогенного комплекса ЛФВЭ (установка для ожижения гелия, компрессорный парк и т. п.) и создание новой системы автоматизированного управления комплекса, а также развитие и модернизацию необходимой инженерной инфраструктуры.

Для пользователей пучков комплекса NICA будут доступны следующие основные экспериментальные площади и установки:

- здание 205 для проведения экспериментов на фиксированных мишенях (в ближайшие два года планируется провести его реконструкцию);
- в здании 1Б планируется осуществить медленный вывод пучка из бустера для проведения прикладных исследований;

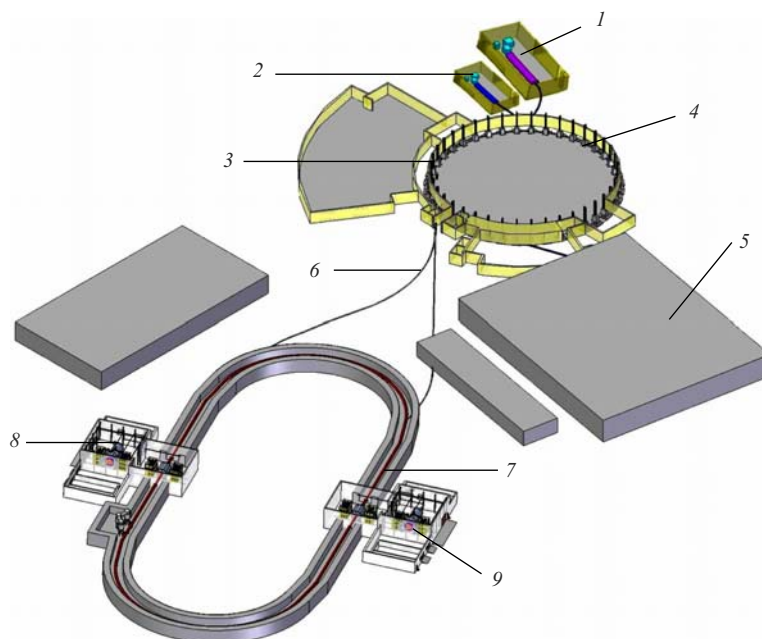


Рис. 11. Предварительная схема размещения элементов комплекса NICA на площадке ЛФВЭ: 1 — источник ионов и тяжелоионный линейный ускоритель; 2 — источник поляризованных ионов и ЛУ-20; 3 — бустер (расположен внутри яма магнита синхрофазотрона); 4 — нуклотрон; 5 — существующий экспериментальный комплекс зд. 205 — для проведения экспериментов на выведенных пучках; 6 — канал транспортировки пучка в коллайдер; 7 — кольца коллайдера; 8 — павильон детектора MPD; 9 — павильон детектора SPD

— для фундаментальных исследований предназначен коллайдер тяжелых и легких поляризованных ионов с детекторами MPD и SPD;

— нуклотрон кроме основной задачи будет использоваться как базовая установка для исследований в области ускорительной физики и техники, отработки современных методик диагностики, тестирования прототипов систем коллайдера (стохастическое охлаждение, поляриметрия, устройства управления спином, измерение параметров ускорителя: структурные функции, бетатронные частоты, хроматичность, связь, критическая энергия, элементы системы управления — перепуск сгустка из бустера в нуклотрон);

— станция внутренних мишеней.

Главной экспериментальной установкой комплекса NICA будет коллайдер, работающий в режиме накопителя, основным элементом инжекционной цепочки которого является нуклотрон, обеспечивающий ускорение пучков

ионов до энергии эксперимента. Для перевода пучка в коллайдер нуклотрон будет оборудован системой быстрого однооборотного вывода (ее планируется разместить в четвертом прямолинейном промежутке на месте ускоряющей ВЧ-станции).

Ввод в эксплуатацию колец коллайдера и начало экспериментов по столкновению пучков тяжелых ионов планируется на 2017 г. Начало экспериментов на фиксированных мишенях с поляризованными пучками дейтронов связано с созданием нового источника поляризованных пучков (завершение этой работы, проводимой совместно с ИЯИ РАН, планируется во второй половине 2012 г.). Кроме того, необходима замена высоковольтного форинжектора ЛУ-20 на секцию ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). Работы в этом направлении уже начаты, и их завершение планируется на 2012 г. Получение на нуклотроне пучков тяжелых ионов с максимальной энергией и интенсивностью в первую очередь предполагает создание бустера, ввод в эксплуатацию которого запланирован на 2014 г.

В заключение необходимо выразить благодарность сотрудникам института и нашим коллегам из стран-участниц ОИЯИ, чей творческий самоотверженный труд сделал возможным успешное проведение модернизации нуклотрона.

Объединенный институт ядерных исследований: А. С. Аверичев, А. В. Алфеев, В. А. Андреев, А. А. Балдин, А. М. Базанов, В. И. Батин, Н. А. Блинов, О. И. Бровка, Б. В. Василишин, А. И. Говоров, Е. В. Горбачев, С. В. Гудков, И. К. Джакупов, Е. Д. Донец, Е. Е. Донец, Д. Е. Донец, А. В. Елисеев, Е. В. Иванов, А. Е. Кириченко, А. Г. Кобец, О. С. Козлов, Н. И. Лебедев, И. Н. Мешков, В. А. Михайлов, В. А. Мончинский, А. В. Нестеров, П. И. Никитаев, А. Л. Осипенков, В. А. Попов, С. В. Романов, П. А. Рукояткин, В. В. Сальников, Н. В. Семин, В. М. Слепнев, И. В. Слепнев, А. В. Смирнов, А. В. Тузиков, А. В. Филиппов, Д. С. Швидкий, В. Б. Шутов.

Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София: А. Ангелов, В. Ангелов, И. Гешков, Д. Динев, И. Цаков, Й. Стаменов.

INOE 2000, Бухарест: Д. Савастру, М. Сорин.

Электротехнический исследовательский и проектный институт, Нова Дубница, Словакия: И. Грек, А. Юрнечка.

Институт проблем измерений САН, Братислава: Л. Ондриш.

«Вакуум Прага», «Фотон», Чехия: П. Хедбавны, Р. Башта, Я. Моравец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А. А., Коваленко А. Д. Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа и развитие) // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 6(123). С. 11–40.

2. Design and Construction of Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA). Conceptual Design Report. JINR: Dubna, 2008;
http://nucloserv.jinr.ru/nica_webpage/Nica_files/reports/CDR_07/CDR_NICA%20.html.
3. Kovalenko A. D. *et al.* Nuclotron-M Project. Dubna: JINR, 2007.
4. Агапов Н.Н. и др. Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38). Сообщ. ОИЯИ Р9-2009-38. Дубна, 2009.
5. Аверичев А.С. и др. Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.
6. Аверичев А.С. и др. Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
7. Agarov N. *et al.* Status of the Nuclotron. «Nuclotron-M» project // Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010. P. 684–686.
8. Agarov N. *et al.* Status of the Nuclotron // Proc. of RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010. P. 127–129.
9. Агапов Н.Н. и др. Прогресс в развитии ускорительного комплекса нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 731–736.
10. Агапов Н.Н. Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.
11. Иссинский И.Б., Бровко О.И., Бутенко А.В. Эксперименты по исследованию потерь интенсивности пучка нуклотрона (2002–2005 гг.). Сообщ. ОИЯИ Р9-2007-107. Дубна, 2007.
12. Волков В.И. и др. Моделирование адиабатического захвата пучка нуклотрона в режим ускорения. Сообщ. ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003.