

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
Дубна

P9-2010-68

ИТОГИ 40-ГО И 41-ГО СЕАНСОВ НУКЛОТРОНА

2010

Аверичев А. С., Агапов Н. Н., Алфеев А. В., Андреев В. А., Базанов А. М., Батин В. И., Блинов Н. А., Бровко О. И., Бутенко А. В., Василишин Б. В., Волков В. И., Говоров А. И., Горбачев Е. В., Гудков С. В., Джакупов И. К., Донец Е. Д., Донец Е. Е., Донец Д. Е., Елисеев А. В., Иванов Е. В., Карпинский В. Н., Кекелидзе В. Д., Кириченко А. Е., Кобец А. Г., Коваленко А. Д., Козлов О. С., Лебедев Н. И., Мешков И. Н., Михайлов В. А., Мончинский В. А., Нестеров А. В., Никитаев П. И., Осипенков А. Л., Попов В. А., Романов С. В., Рукояткин П. А., Сальников В. В., Семин Н. В., Сидорин А. О., Сисакян А. Н., Слепнев В. М., Слепнев И. В., Смирнов А. В., Сорин А. С., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г., Швидкий Д. С., Шутов В. Б.

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Ангелов А., Ангелов В., Гешков И., Динев Д., Цаков И., Стаменов Й.

*Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София, Болгария*

Савастру Д., Сорин М.

*INOE 2000, Бухарест, Румыния*

Ондреш Л.

*Институт проблем измерений САН, Братислава, Словакия*

Хедбавны П., Башта Р., Моравец Я.

*«Вакуум-Прага», «Фотон», Прага, Чехия*

## ВВЕДЕНИЕ

В 2010 г. завершается проект «Нуклотрон-М», рассматриваемый как первый этап реализации проекта NICA. Большинство работ по модернизации основных систем ускорительного комплекса ЛФВЭ находится в завершающей стадии. 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 2010 г., являлось ускорение в нуклотроне ионов с атомным номером  $\geq 100$ . Не менее важной задачей, решаемой в ходе сеансов, была подготовка всех систем ускорителя к надежной работе при проектной величине магнитного поля.

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 отладке новой циклозадающей аппаратуры;
- ввод в опытную эксплуатацию первой стадии системы автоматического управления вакуумным оборудованием кольца нуклотрона;
- ввод в опытную эксплуатацию цифровой системы управления частотой ускоряющего поля;
- испытание опытного образца источника питания корректирующих магнитов;
- опробование методики измерений потерь при транспортировке выведенного пучка из нуклотрона;
- ввод в опытную эксплуатацию АСУ системы инжекции.

В ходе 41-го сеанса получены следующие основные результаты:

- осуществлено ускорение пучка ионов ксенона до энергии 1,5 ГэВ/нукл., при энергии 1 ГэВ/нукл. осуществлен медленный вывод;
- успешно испытана работа магнитной системы кольца нуклотрона при уровне поля структурных магнитов около 1,8 Тл;
- завершена модернизация вакуумной системы, проведен цикл исследований вакуумных условий в кольце нуклотрона;
- продолжена работа по модернизации системы криогенного обеспечения, опробован режим работы кольца с управляемым частичным отеплением магнитно-криогенной системы до азотной температуры, разработанный для проведения профилактических работ без остановки сеанса;
- опробован режим работы ускорителя с питанием структурных магнитов и линз от источников постоянного тока;
- испытан на кольце новый источник питания электростатического септума, предназначенный для медленного вывода пучка при ускорении до величины поля дипольных магнитов 2 Тл;
- испытаны первые серийные источники питания корректирующих магнитов;
- испытан новый датчик перехода структурных магнитов и линз в нормальнопроводящее состояние.

В ходе 40-го сеанса на выведенном пучке дейтронов были проведены эксперименты по программам «Беккерель» и «Энергия + трансмутация». В 41-м сеансе проведен ряд методических исследований и эксперимент по программе «Энергия + трансмутация» на пучке ионов Хе; на пучке ионов дейтерия проведены эксперименты на внутренней мишени по программам «Дельта-2» и «Эта-ядра».

В данной статье основное внимание уделено результатам ускорительных смен сеансов, которые сгруппированы в соответствии с задачами проекта «Нуклотрон-М».

## 1. УСКОРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

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  $q/A \geq 1/3$ , 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 направления:

- 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 со взаимодействием с атомами остаточного газа, приводящим к изменению зарядового состояния ионов. Для тяжелых ионов на начальном участке ускорения преобладает процесс захвата электрона, а при высокой энергии — процесс обдирки. Так, полное сечение потерь ионов  $^{124}\text{Xe}^{42+}$  на азоте составляет примерно  $10^{-16} \text{ см}^2$  при энергии инжекции и снижается до нескольких единиц  $10^{-19} \text{ см}^2$  при увеличении энергии до 1 ГэВ/нукл. 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 наноТорр. Соответствующие вакуумные условия в пучковой камере нуклотрона были достигнуты по завершении второго этапа модернизации вакуумной системы [1, 2], 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.

**1.1. Оптимизация режима работы источника «Крион-2».** В качестве кандидатов на ускорение в нуклотроне рассматривалось несколько сортов ионов, в том числе 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  $^{124}\text{Xe}$ , у которого в зарядовом состоянии  $42+$  отношение заряда к

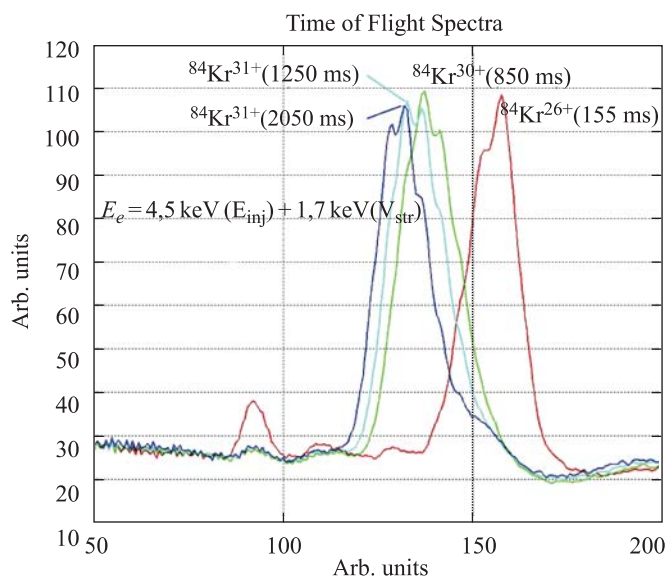


Рис. 1.1. Спектр ионов криптона, полученный времяпролетным методом. В скобках указано оптимальное время ионизации

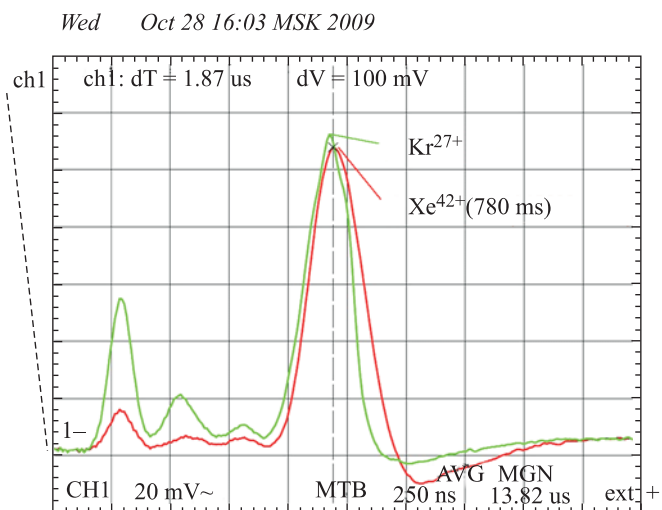


Рис. 1.2. Использование положения линии криптона для идентификации зарядового состояния ионов ксенона

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 4 сеанса (по 5 недель каждый) с целью отработки оптимальных режимов получения высокозарядных ионов Хе. Сначала для отработки режимов инжекции и ионизации использовался разделенный изотоп криптона —  $^{84}\text{Kr}$ . 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 (рис. 1.1) наблюдается хорошее разделение по зарядовым состояниям. В дальнейшем положение линий Kr использовалось для определения зарядностей ионов Хе (рис. 1.2), в спектре которого линии не разделяются.

**1.2. Модернизация канала транспортировки из ЛУ-20 в нуклотрон.** Для транспортировки ускоренных в ЛУ-20 ионов с  $q/A = 1/3$  необходимо было увеличить токи питания структурных элементов канала инжекции пучка в нуклотрон в полтора раза по сравнению с режимом транспортировки дейтронов

и протонов. Наиболее серьезная модернизация потребовалась для цепи питания поворотного магнита ПМ2, работающей от источника 2ТВ. При существовавшей схеме питания ток в цепи этого магнита был ограничен потерями в силовой трассе.

В ходе подготовки к ускорению тяжелых ионов были выполнены следующие мероприятия (рис. 1.3):

- переключены фильтровые дроссели с последовательной схемы на параллельную;
- умощнена силовая кабельная трасса питания ПМ2 в корпусе 1А;
- смонтированы шинные трассы в переключающем пункте корпуса 1Б;
- умощнены кабельные трассы в корпусе 1 (по 4 кабеля КРПТ  $3 \times 70$  на полюс по бифилярной схеме);
- реконструирована силовая часть тиристорного выпрямителя;
- разработан и введен в работу в макетном варианте двухконтурный регулятор по току и напряжению;
- разработан и введен в работу в макетном варианте активный фильтр.

В результате проведенных работ потери в силовой трассе были снижены в 3 раза, что позволило

Схема силовых цепей трассы 2ТВ–ПМ2

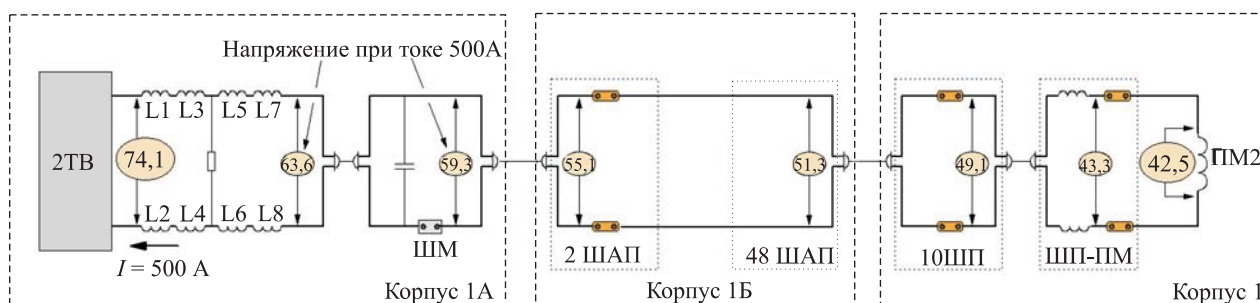
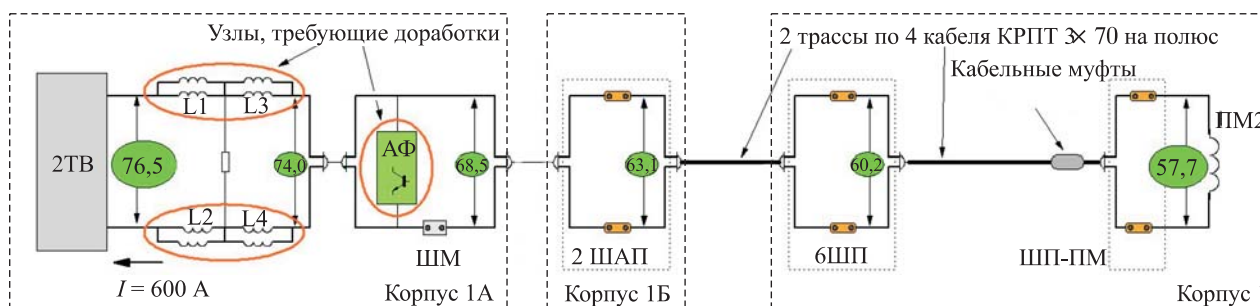


Схема модернизации 2ТВ и реконструкции силовых цепей трассы 2ТВ–ПМ2



2ТВ — источник питания, тиристорный выпрямитель; ШП — шкаф переключения; ШП-ПМ — шкаф переключения поворотных магнитов ПМ1, ПМ2; L1–8 — фильтровые дроссели; АФ — активный фильтр; ШМ — шунт масляный; ПМ2 — поворотный магнит; ШАП — шкаф агрегата питания; 2 трассы по 4 кабеля КРПТ  $3 \times 70$  на полюс; Кабельные муфты

Рис. 1.3. Схема питания магнита ПМ2 и основные элементы, прошедшие модернизацию и реконструкцию

обеспечить требуемую величину тока. Получена относительная стабильность тока на уровне  $3 \cdot 10^{-5}$ , что удовлетворяет требованиям эффективной проводки пучка по каналу.

**1.3. Подготовка ЛУ-20 к ускорению ионов с  $q/A = 1/3$ .** 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 инжекции в кольцо нуклотрона, улучшения средств диагностики пучка, создание АСУ элементов канала транспортировки. Кроме того, в промежутках между сеансами нуклотрона на ЛУ-20 было проведено три специальных сеанса работы.

В период с июля по сентябрь 2009 г. был осуществлен важный этап модернизации ЛУ-20: юстировка трубок дрейфа ускоряюще-фокусирующей структуры линака с целью повышения эффективности процесса ускорения, по завершению которого 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  $C^{4+}$ .

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 источник «Крион-2» был перевезен в здание инжектора и после проведения необходимых подготовительных работ был установлен на

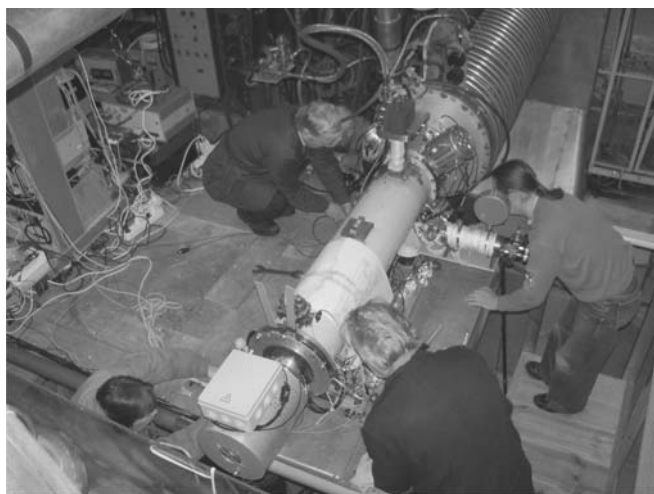


Рис. 1.4. Установка источника «Крион-2» на высоковольтном терминале ЛУ-20

высоковольтном терминале инжекционного комплекса ЛУ-20 (рис. 1.4). В ходе сеанса ЛУ-20 источник обеспечил следующие пучки 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/нукл. и проведены до точки инжекции в нуклотрон с эффективностью 30 %.

Для контроля тока пучка при инжекции в нуклотрон была проведена модификация профилометра, расположенного на выходе канала инжекции. 60 позолоченных вольфрамовых нитей профилометра, диаметром 50 мкм каждая, были объединены друг с другом, что позволило устойчиво измерять интенсивность пучков тяжелых ионов.

#### 1.4. Отработка режимов работы нуклотрона.

**Ускорение ионов ксенона.** До 41-го сеанса ускорение ионов с  $q/A = 1/3$  на нуклотроне никогда не проводилось, а достигнутая интенсивность пучка тяжелых ионов не позволяла провести настройку циркуляции и коррекцию орбиты с использованием существующих средств диагностики. Поэтому, для отработки методики, 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.

На рис. 1.5 и 1.6 приведены временные зависимости сигналов с пикап-электродов при циркуляции в нуклотроне пучка ионов углерода с отношением заряда к массе  $q/A = 1/3$  ( $^{12}\text{C}^{4+}$ ). На рис. 1.5 виден процесс «сворачивания» пучка на апертуру (длительностью примерно 700 мкс), происходящий при росте магнитного поля без включения ускоряющего ВЧ-напряжения. Процесс первоначальной группировки и захвата в режим ускорения при инжекции с включенным ВЧ-напряжением показан на рис. 1.6 в том же масштабе времени.

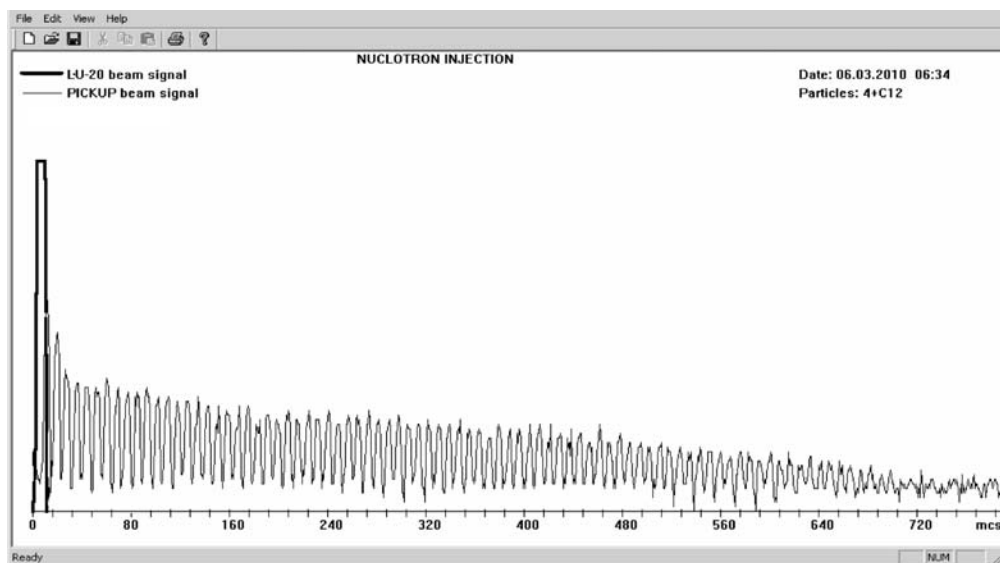


Рис. 1.5. Циркуляция пучка ионов углерода  $q/A = 1/3$

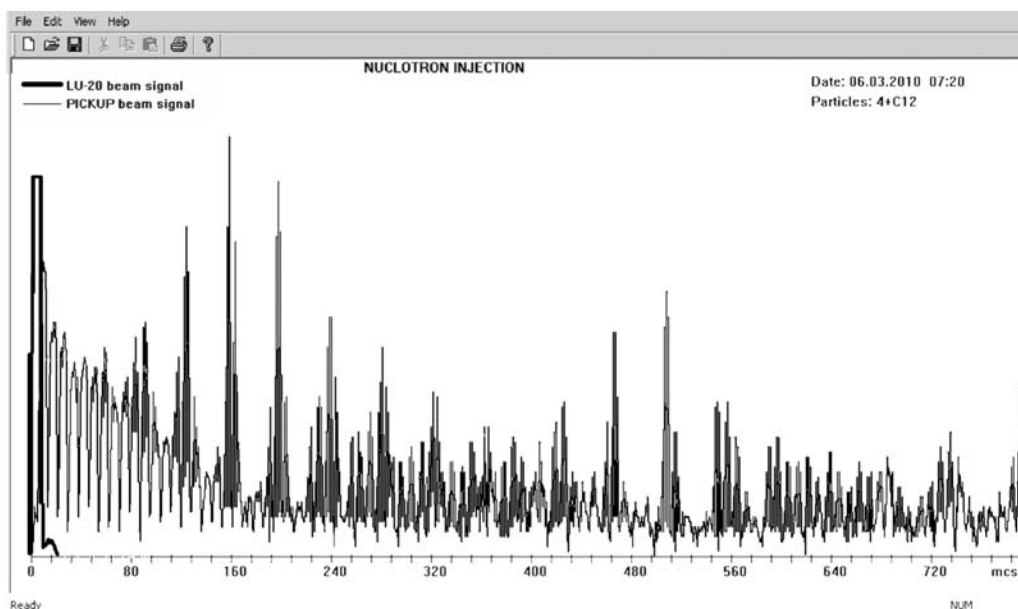


Рис. 1.6. Начальный участок ускорения пучка ионов углерода  $q/A = 1/3$

Приведенный на рисунках сигнал циркуляции пучка снимался с пикап-электрода, в качестве которого используется резервная ускоряющая станция, и оцифровывался 8-битным АЦП с периодом 50 нс. Сигнал прямого пучка от ЛУ-20 был получен от профилометра с объединенными нитями в конце канала инжекции.

К сожалению, при работе с четырехзарядными ионами углерода невозможно осуществить настройку режима медленного вывода пучка, так как процесс потери электронов при взаимодействии с остаточным газом приводит к слишком высокому темпу потерь ионов в процессе ускорения, и интенсив-

ность ускоренного пучка на «столе» поля оказывается исчезающе-малой.

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  $B$  составляла 5250 Гс) (рис. 1.7). Измерение интенсивности пучка в процессе ускорения производилось ионизационным датчиком. В силу зависимости сечения ионизации от энергии ионов восстановить изменение

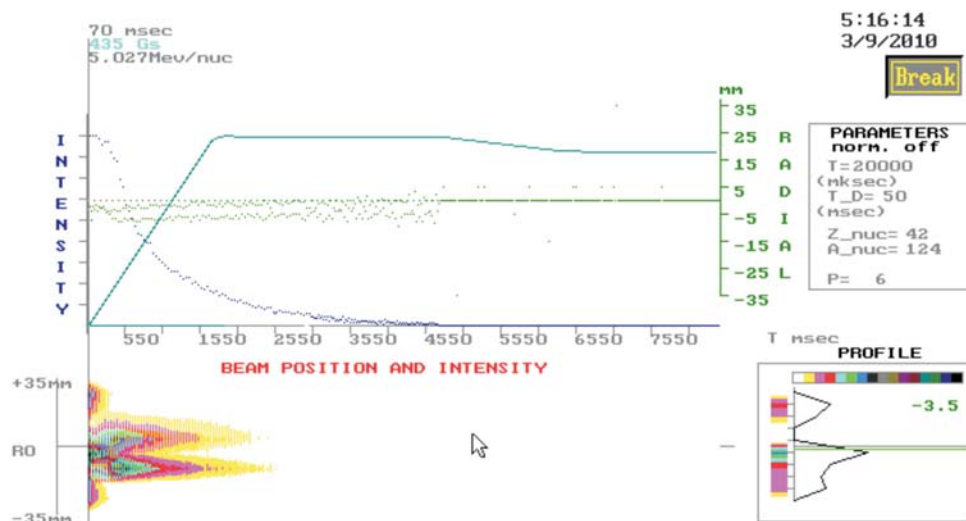


Рис. 1.7. Ускорение  $^{124}\text{Xe}^{42+}$ ,  $B = 5250$  Гс

интенсивности пучка во время ускорения, даже в относительных единицах, достаточно сложная задача. Вместе с тем по косвенным данным можно предполагать, что потери ионов в основном были обусловлены изменением зарядового состояния при взаимодействии с остаточным газом. Для управления частотой ВЧ использовалась цифровая система, а положение рабочей точки соответствовало минимуму потерь. При ускорении дейтронов в таком режиме «ускорительные» потери не превышают  $15 \div 20\%$ . По 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  $5 \div 8$  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 при-

остановлена на время проведения профилактических работ в системе криогенного обеспечения.

Следует отметить, что в результате процесса захвата электрона при взаимодействии с атомами остаточного газа небольшая доля пучка попадала в канал медленного вывода в течение всего процесса ускорения. Этот «самопроизвольный» вывод пучка использовался при проведении методических исследований по идентификации сорта ионов.

15 марта были восстановлены основные режимы работы ускорителя, а 16 марта был реализован медленный вывод ионов ксенона на поле  $7,9$  кГс, что примерно соответствует энергии ионов  $1$  ГэВ/нукл. Интенсивность выведенного пучка на выходном фланце ускорителя составляла несколько тысяч ионов за цикл. При энергии  $1$  ГэВ/нукл. были выполнены методические исследования по регистрации ионов и проведено облучение мишени по программе «Энергия + трансмутация». В завершение сеанса с

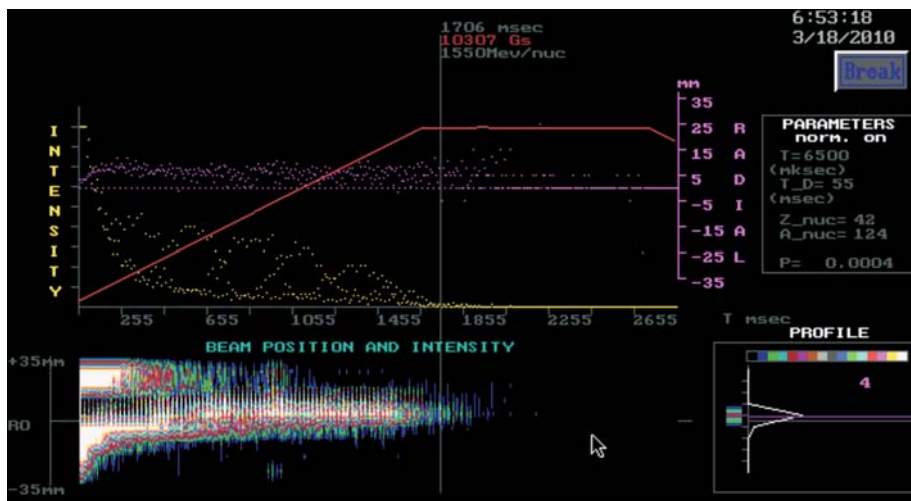


Рис. 1.8. Сигнал ионизационного датчика низкой интенсивности при ускорении пучка ксенона до энергии  $1,5$  ГэВ/нукл.



источником «Крион-2» было осуществлено ускорение ионов ксенона до поля 10 кГс, что соответствует энергии 1,5 ГэВ/нукл. (рис. 1.8). Ни одной остановки или технологического сбоя по причине проблем с источником «Крион-2» в течение сеанса 41 зарегистрировано не было.

## 2. РАБОТЫ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА

В ходе 40-го сеанса нуклотрона продолжалось исследование эксплуатационных режимов модернизированного оборудования системы криогенного обеспечения. На третьей неделе проведения сеанса начал наблюдаться рост гидравлического сопротивления в «холодных» коммуникациях криогенной системы. При приближении сопротивления к максимально допустимому значению было принято решение о завершении сеанса в штатном режиме. Непосредственно после отепления была проведена ревизия фильтров водородно-неоновых адсорберов, в результате которой было установлено, что причиной нештатной работы оборудования явилось засорение фильтров угольной пылью, оставшейся в системе после полной замены адсорбентов, проведенной в рамках модернизации [2].

При подготовке к 41-му сеансу была произведена замена всех фильтрующих элементов. С целью обеспечения возможности проведения профилактических работ в ходе сеансов были установлены байпасы адсорберов.

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 из «НПО Гелиймаш» в ОИЯИ винтового компрессора «Каскад-80/25», в дополнение к аналогичному, уже работающему в системе. В период подготовки к 41-му сеансу был проведен монтаж линии нагнетания этого компрессора в коллектор высокого давления для возможности 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 41-м сеансе были продолжены работы по отработке сателлитных режимов. При этих режимах на одной из установок КГУ-1600/4,5 отключаются все

С 18 марта был осуществлен переход на источник «Дуоплазматрон» и до конца сеанса ускоритель работал с ионами дейтерия по программе ускорительных исследований и по программе экспериментов на внутренней мишени.

газовые турбодетандеры. Такая работа может обеспечить до 80 % режимов ускорителя. При этом в работе находятся один винтовой компрессор «Каскад-80/25» и один поршневой компрессор 305НП-20/30, а это приводит к значительной экономии потребления электроэнергии. Также реализация сателлитных режимов позволяет производить некоторые виды ремонтов на установках КГУ-1600/4,5, не прекращая криостатирования кольца.

В начальной стадии проведения сеанса также наблюдалось отклонение сопротивления в коммуникациях криогенной системы от штатного значения. Мероприятия, реализованные в ходе подготовки к сеансу, позволили решить эту проблему без прекращения сеанса. С этой целью был реализован режим с частичным управляемым отеплением кольца до азотных температур. Отработка такого режима входила в задачи модернизации системы, так как его использование планируется в дальнейшем при проведении длительных сеансов работы ускорителя. Причиной увеличения сопротивления оказалась микротечь, приводившая к поступлению в систему воздуха на уровне ниже порога чувствительности газоанализатора. Неисправность была устранена, после чего выход на рабочую температуру занял менее суток.



Рис. 2.1. Фильтрующие элементы водородно-неоновых адсорберов, разобранных по завершении 40-го сеанса

### 3. ЗАВЕРШЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЬЦА НУКЛОТРОНА

К началу 41-го сеанса была полностью завершена модернизация высоковакуумной системы откачки пучковой камеры нуклотрона.

В ходе второго этапа модернизации с целью получения «безмасляного» рабочего вакуума в камере на уровне  $10^{-9}$  –  $10^{-10}$  Торр было приобретено вакуумное оборудование фирмы «Pfeiffer Vacuum». Оборудование включает в себя (см. табл.): магниторазрядные и турбомолекулярные насосы с блоками питания и форвакуумными насосами, компактные вакуумметры с холодным катодом, запорную арматуру с дистанционным управлением, соединительные кабели с разъемами. Оборудование эксплуатируется в условиях радиационного облучения (около 80 Зв в год) при равномерном распределении по периметру укорителя 252 м. Расстояние от тоннеля ускорителя до пульта управления (находящегося вне зоны радиационного облучения) составляет около 50 м.

Для управления вакуумным оборудованием нашими чешскими коллаборантами из фирм «Vacuum Praha» и «Foton» была создана система автоматического управления (АСУ), монтаж и ввод в эксплуатацию которой осуществлялся на втором этапе модернизации. АСУ позволяет управлять и контролировать работу вакуумных насосов, высоковакуумных шиберов, датчиков измерения вакуума и др. Цен-

тральный блок управления представляет собой микроконтроллер (VIPA стандарта Siemens 300), сенсорную панель для отображения текущего состояния АСУ и управления вакуумным оборудованием (рис. 3.1).

Совместно с АСУ используется компьютер, на котором в реальном времени отображаются и записываются на диск параметры вакуумной системы: показания датчиков давления, параметры блоков питания магниторазрядных и турбомолекулярных насосов. В центре зала на уровне кольца нуклотрона расположены четыре шкафа с блоками питания магниторазрядных и турбомолекулярных насосов. Связь между центральным блоком АСУ и шкафами осуществляется по протоколу RS485.

Опытная эксплуатация АСУ была начата в ходе 40-го сеанса. К началу 41-го сеанса монтаж и тестирование оборудования были полностью завершены. Использование новой системы автоматического управления дало возможность провести цикл измерений давления и состава остаточного газа в кольце нуклотрона в течение 40-го и 41-го сеансов (рис. 3.2, 3.3)

В ходе 41-го сеанса был проведен ряд экспериментальных исследований поведения динамического вакуума при различных параметрах цикла магнитного поля и режимах работы ускорителя. Наиболее интересными из них являются изучение

#### Основное оборудование, приобретенное для модернизации вакуумной системы

Оборудование	Кол-во
Турбомолекулярный насос Pfeiffer TPD 011, DN 40 ISO-KF, водоохлаждаемый, с блоком управления TCP 350	2
Турбомолекулярный насос Pfeiffer TMU 071YP, DN 63 CF-F, водоохлаждаемый, с блоком управления TCP 350	10
Турбомолекулярный насос Pfeiffer TMU 261 YP, DN 100 CF-F, водоохлаждаемый, с блоком управления TCP 350	5
Турбомолекулярный насос Pfeiffer TMU 521 YP, DN 160 CF-F с блоком управления TCP 350	1
Источники питания для магниторазрядных насосов IPT200 («Foton») с высоковольтным кабелем	10
Форвакуумные насосы TriScroll 300	10
Многоканальный вакуумметр TPG 300	8
Форвакуумный датчик Pirani TPR018m DN16ISO-KF с кабелем	12
Вакуумметр с холодным катодом IKR 060 DN 40 CF-F с кабелем	26
Масс-спектрометр «Prisma Plus»	1

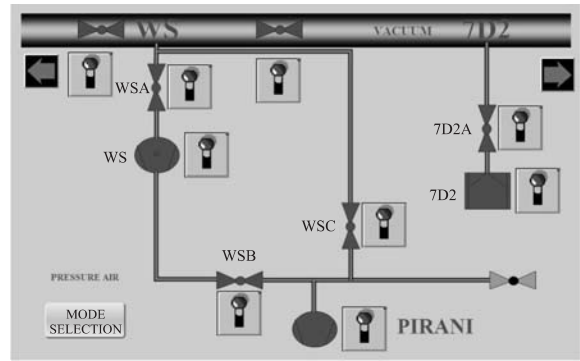
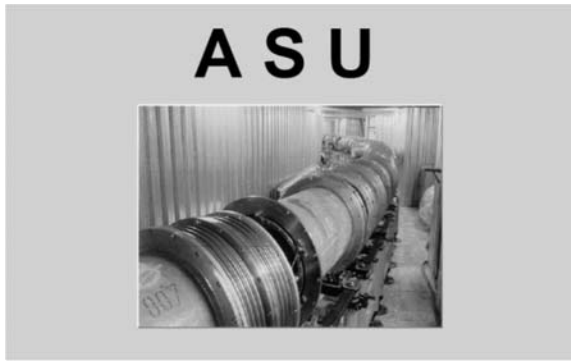


Рис. 3.1. Монитор АСУ для управления вакуумным оборудованием

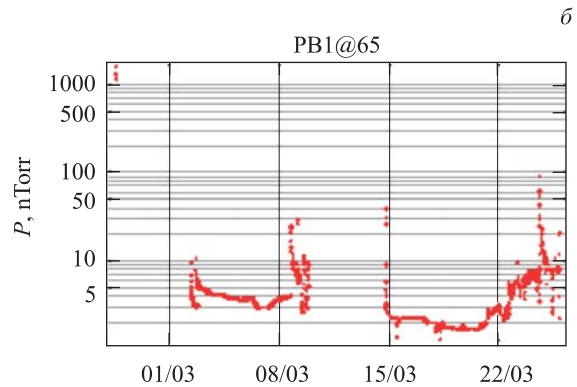
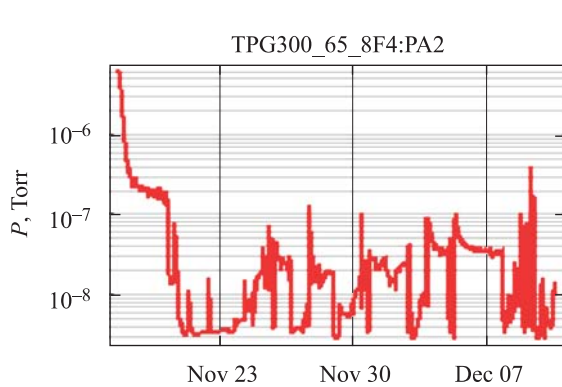


Рис. 3.2. Изменение давления остаточного газа в районе точки инъекции в кольцо нуклотрона в течение 40-го (а) и 41-го (б) сеансов

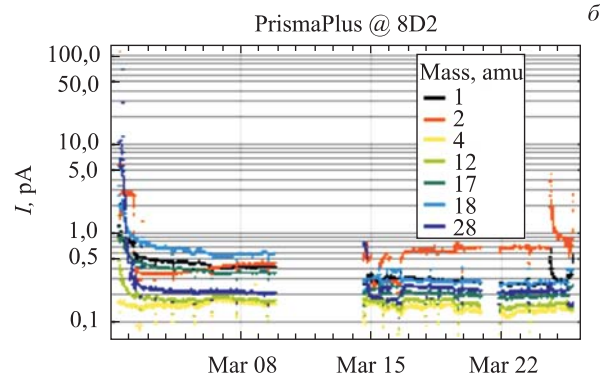
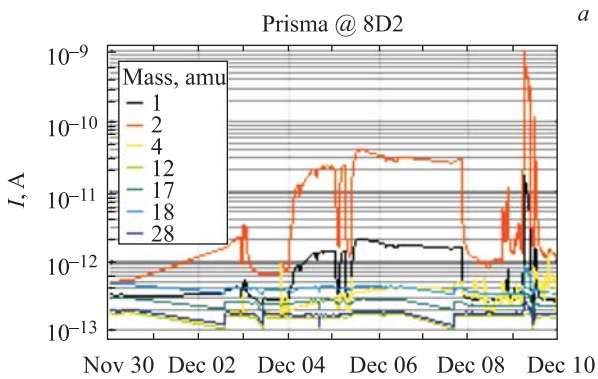


Рис. 3.3. Изменение массового состава, измеренного с помощью масс-анализатора «Prisma Plus», в течение 40-го (а) и 41-го (б) сеансов

поведения состава остаточного газа при охлаждении кольца. 3 марта 2010 г. во время проверки защит и начала работы с циклом магнитного поля был проведен эксперимент по измерению уровня динамического вакуума в кольце при перекрытом шибером канале инъекции. При работе ускорителя с ионами ксенона было проведено кратковременное отклю-

чение средств откачки пучковой камеры нуклотрона, установленных в ходе модернизации вакуумной системы. Это привело к увеличению давления остаточного газа примерно на порядок в течение 5 мин. В результате резко возросли потери ионов, что привело практически к полной гибели пучка на начальном этапе процесса ускорения.



магнитной системы: магнита Ламбертсона до 25 К, ЭСС до 15 К и линзы 5D1 до 40 К. Через 40 мин температура всех элементов вернулась к норме.

Подготовка к дальнейшему повышению поля продолжается, и в настоящее время идет полное выяснение причин происходящих срывов цикла.

**4.2. Испытание датчика перехода.** Для обеспечения надежной работы магнитной системы нуклотрона при проектной величине поля создается новая система датчиков перехода в нормальнопроводящее состояние. Прототип нового датчика перехода был испытан в реальных условиях в ходе 39-го сеанса [2], после чего в его конструкцию были внесены необходимые изменения. В частности, был усовершенствован входной усилитель с целью расширить динамический диапазон измеряемого сигнала. Поэтому одной из целей испытаний, проведенных в 41-м сеансе, была проверка параметров этого усилителя в реальной работе.

Главная же цель работы — это зафиксировать реальный переход в активную фазу и показать этот процесс визуально. Никогда ранее подобные измерения — фиксация перехода и запись визуального отображения процесса в реальном времени — на ускорителе нуклотрон не проводились.

Испытания проводились на датчике СДП2-1-6 на магните 3М2А. Для перевода магнита в активную фазу использовался нагреватель обмотки. Для наблюдения сигнала мост датчика был разбалансирован, чтобы был виден цикл поля. На рис. 4.2 показано главное «окно» программы для наблюдения выходного сигнала датчика. Можно наблюдать фазы выпрямительного режима, «стола» и инверторного режима.

Нагревание магнита было произведено при трех напряжениях на нагревателе: 12, 10 и 5 В, при этом



Рис. 4.2. Выходной сигнал датчика перехода при цикле поля

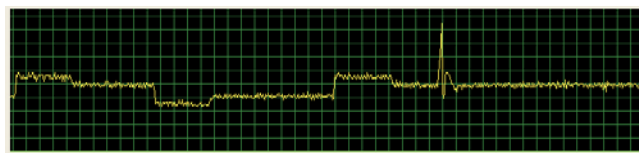


Рис. 4.3. Сигнал датчика перехода при мощности нагрева магнита 17 Вт

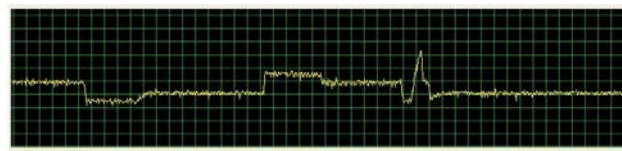


Рис. 4.4. Сигнал датчика перехода при мощности нагрева магнита 3 Вт

выделяемая мощность составляла 17, 12 и 3 Вт соответственно. При первом и втором нагревании активная фаза появлялась и развивалась достаточно быстро (рис. 4.3). На представленной осциллограмме видно, что начало и развитие активной фазы происходит быстро — около 0,25 с, после чего датчик включает системы эвакуации энергии.

При более медленном нагревании достижение порога срабатывания происходит медленнее. Этот процесс показан на рис. 4.4.

Таким образом, в результате проделанной работы были получены визуальные отображения процесса перехода при разных энергиях тепловыделения в обмотке-магните в реальном времени. Была продемонстрирована устойчивая и надежная работа нового датчика перехода. Сейчас идет активная работа по созданию полного комплекта датчиков перехода для кольца (около 200 штук) и системы автоматического управления и диагностики датчиков перехода.

**4.3. Модернизация источника питания электростатического септума (ЭСС).** Для обеспечения вывода пучка с максимальной проектной энергией (6 ГэВ/нукл. для дейтронов) необходимо увеличение напряжения на электростатическом септуме (ЭСС) примерно до 200 кВ. Напряжение существующего источника питания ограничено величиной 110–120 кВ. Для решения этой проблемы была разработана и изготовлена умножающая колонна, предназначенная для замены существующего высоковольтного генератора источника питания ЭСС. В процессе подготовки к 40-му сеансу колонна прошла стендовые испытания, при которых была устойчиво получена проектная величина напряжения. В ходе 41-го сеанса умножающая колонна была

установлена непосредственно на ввод ЭСС на криостате нуклотрона (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Установка умножающей колонны на ввод ЭСС на криостате нуклотрона

Во время сеанса проводилась оптимизация режимов работы нового источника питания ЭСС, в результате которой была обеспечена требуемая скорость спада напряжения. Напряжение на ЭСС пока не удалось поднять выше 140 кВ из-за существенного возрастания тока утечки высоковольтного источника. В настоящее время анализируются причины этого и разрабатываются меры для получения проектного напряжения.

**4.4. Подготовка к увеличению темпа роста поля.** В настоящее время ускорение в нуклотроне производится с максимальным темпом роста поля до 0,6 Тл/с. Для оптимальной работы элементов магнитной системы при больших уровнях поля желательно повышение темпа роста поля как минимум до 1 Тл/с. Основным ограничением к увеличению темпа роста поля при ускорении является макси-

мально достижимая амплитуда ускоряющего напряжения. Для ускорения с синхронной фазой  $\sim 30^\circ$  при темпе роста поля 1 Тл/с необходима амплитуда около 9 кВ, тогда как до последнего времени ускоряющая ВЧ-система обеспечивала надежную работу при амплитуде до уровня 6 кВ.

С целью повышения эффективного значения ускоряющего напряжения в процессе подготовки к 41-му сеансу была проведена частичная модернизация ускоряющей ВЧ-системы нуклотрона, и в ходе сеанса введен в опытную эксплуатацию прототип аппаратуры программной перестройки ускоряющих резонаторов. Это позволило увеличить точность настройки на начальном этапе ускорения и, как следствие, облегчило получение максимальной амплитуды выходных генераторов ускоряющих станций на наиболее нагруженном участке ускорения. С той же целью проведена частичная модернизация промежуточных усилителей, что позволило повысить мощность сигнала раскачки выходных генераторов.

Также введены в опытную эксплуатацию аппаратура удаленной диагностики амплитуды ускоряющего напряжения на центральном пульте управления нуклотрона и аппаратура дистанционного программного управления амплитудой на начальном этапе ускорения для экспериментов по оптимизации захвата частиц.

В результате в ходе сеанса была обеспечена надежная работа ускоряющих станций при амплитуде напряжения 7,5 кВ; максимально достигнутая амплитуда составила 8 кВ. Отработан также режим работы циклозадающей аппаратуры и источников электропитания магнитов и линз при темпе роста поля 1 Тл/с.

## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ

Одной из основных задач проекта «Нуклотрон-М» является минимизация потерь ионов на всех стадиях процесса ускорения. Это подразумевает оптимизацию положения рабочей точки ускорителя, согласование параметров пучка при инжекции, коррекцию равновесной орбиты и обеспечение ее стабильного положения в процессе ускорения, реализацию адиабатического захвата в режим ускорения и оптимизацию динамики продольного движения частиц в процессе ускорения. В рамках поэтапного решения этих задач в ходе 40-го и 41-го сеансов были выполнены следующие основные работы:

— введена в эксплуатацию цифровая система управления частотой ускоряющего поля;

- испытаны новые источники питания корректирующих магнитов;
- отработан режим работы магнитной системы при питании источниками постоянного тока;
- осуществлена попытка измерения разброса частиц по импульсу методом «шоттки-шума». Выявлены необходимые параметры системы диагностики, позволяющей производить подобные измерения.

Продолжались работы по созданию цифровой системы измерения положения замкнутой орбиты ускорителя; в ходе 40-го сеанса проводились тестовые измерения в рамках программы по реализации адиабатического захвата.

**5.1. Цифровая система управления частотой ускоряющего поля.** Существенное уменьшение потерь частиц в процессе ускорения было достигнуто за счет использования цифровой системы управления частотой ускоряющего поля, которая была введена в опытную эксплуатацию и отработала 10 смен в ходе 40-го сеанса. В ходе 41-го сеанса 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

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

где  $h$  — номер гармоники частоты обращения;  $2\pi R$  — периметр орбиты в нуклотроне;  $\rho$  — 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  $\Delta B_0$  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-й, 6-й 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.

**5.2. Отработка режимов работы циклозадающей аппаратуры.** По итогам работы новой циклозадающей аппаратуры, введенной в опытную эксплуатацию в ходе 39-го сеанса [2], был намечен комплекс мероприятий по доработке системы и вводу ее в эксплуатационный режим. В результате в ходе 40-го сеанса была существенно (примерно на порядок) улучшена воспроизводимость значений поля магнитов и линз от цикла к циклу. Это позволило обеспечить стабильность положения рабочей точки уско-

рителя в процессе ускорения на уровне не хуже чем  $\Delta Q < 0,01$ .

В ходе 41-го сеанса в период с 00:00:03 по 12:07:59 23 марта была проведена запись измерений параметров магнитного поля нуклотрона с последующей их статистической обработкой. Отдельно обрабатывался интервал с 00:00:03 по 05:21:27, соответствующий ночной смене, и интервал с 05:48:22 по 12:07:59, соответствующий дневной смене. Определялось среднее поле магнитов и линз в момент инъекции и на «столе» поля, а также среднеквадратичный разброс этих параметров от цикла к циклу. Заданное значение поля на «столе» было 2379,4 Гс.

В ночную смену среднеквадратичный разброс поля линз составил примерно 0,2 Гс, в дневную смену этот параметр ухудшается примерно в три раза. Воспроизводимость поля магнитов примерно в два раза лучше, что соответствует проектным параметрам. Таким образом, получена долговременная стабильная работа циклозадающей аппаратуры и источников питания, формирующих сигнал рассогласования между магнитным полем дипольных магнитов и градиентом поля квадрупольных линз нуклотрона.

**5.3. АСУ системы инъекции.** Стабильность параметров ускоренного пучка во многом определяется стабильностью работы ускорителя ЛУ-20 и воспроизводимостью параметров канала транспортировки. Система управления устройствами канала инъекции создавалась в начале 1990-х гг., многие ее компоненты физически и морально устарели. Программное обеспечение не полностью совместимо с

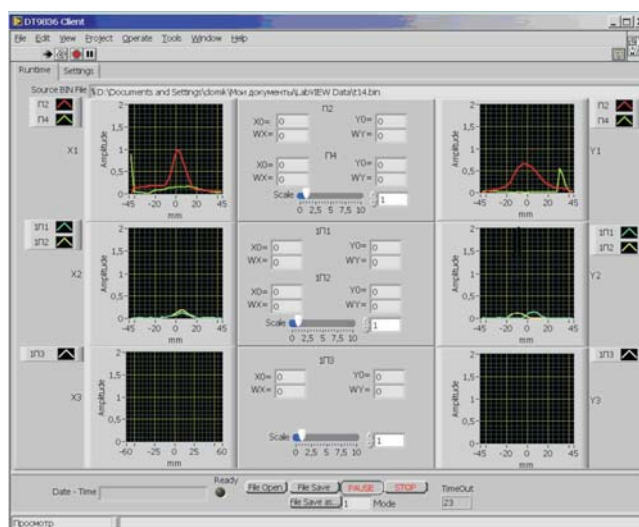


Рис. 5.1. Основное «окно» для вывода показаний профилометров в канале инъекции нуклотрона

современными операционными системами; кроме того, его интеграция в общую систему управления ускорительного комплекса практически невозможна.

Для решения этой проблемы ведутся работы по созданию новой АСУ системы инжекции, и в ходе 40-го сеанса она была введена в опытную эксплуатацию. Программное обеспечение создается на основе пакета LabView (рис. 5.1). Поэтапный ввод в эксплуатацию вновь создаваемых элементов АСУ продолжался в ходе 41-го сеанса.

**5.4. Испытание источников питания корректирующих магнитов.** Для коррекции равновесной орбиты и обеспечения ее стабильного положения в процессе ускорения создаются новые источники питания корректирующих магнитов, разработанные в Электротехническом исследовательском и проектном институте (г. Дубница, Словакия).

Опытный образец источника (рис. 5.2) был изготовлен и поставлен в ОИЯИ к началу 40-го сеанса. До начала сеанса были проведены его испытания на криогенном стенде, а в ходе сеанса он был испытан на кольце нуклотрона при различных параметрах цикла поля (рис. 5.3).

На основании результатов испытаний выработаны требования по доработке конструкции, и начато изготовление серийных источников. Первые образцы серийных источников поступили в ОИЯИ уже в ходе проведения 41-го сеанса. Источники были установлены на ускорителе и протестированы в режиме ручного управления. К осеннему сеансу планируется монтаж и ввод в эксплуатацию первой партии из 24 серийных источников. Ведутся работы по созданию системы их автоматического управления.

**5.5. Режим работы ускорителя при питании магнитной системы источниками постоянного тока.** В ходе 41-го сеанса был отработан режим ра-

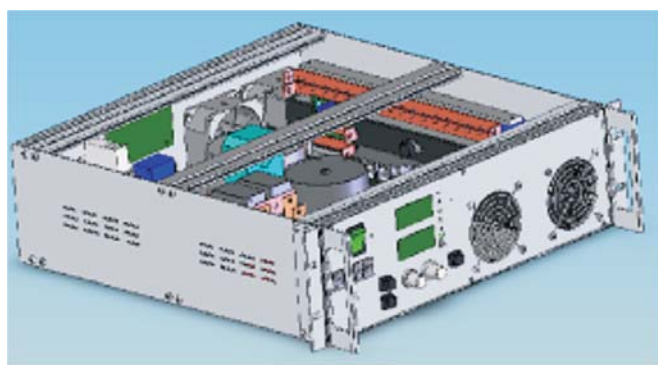


Рис. 5.2. Общий вид источника питания корректирующих магнитов

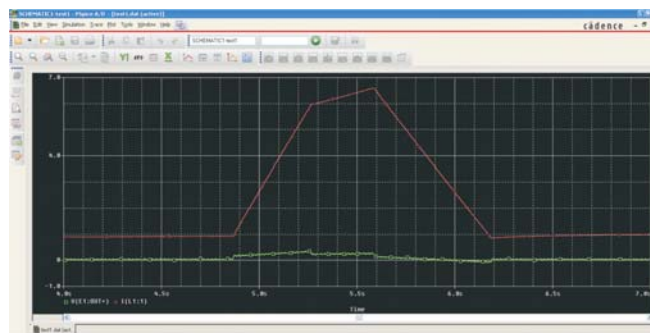


Рис. 5.3. Запись отработки цикла опытным образцом источника питания в 40-м сеансе

боты ускорителя при питании магнитной системы от источников стабилизированного тока небольшой мощности. При этом дипольные магниты и линзы питались от двух независимых источников постоянного тока «Glassman» током до 100 А, что позволяет осуществлять циркуляцию пучка дейтронов на энергии инжекции.

Необходимость такого режима вызвана тем, что основные источники питания магнитной системы из-за большого динамического диапазона перестройки тока не позволяют достичь высокого уровня стабильности поля при работе на «столе», соответствующем энергии инжекции. В режиме питания от стабилизированных источников тока возможно проводить точное измерение положения равновесной орбиты и ее коррекцию, измерение времени жизни циркулирующего пучка для определения среднего давления остаточного газа в камере, оптимизацию положения рабочей точки ускорителя, согласования параметров пучка при инжекции. В этом режиме также возможна отработка захвата пучка в сепаратрису при адиабатическом увеличении амплитуды ускоряющего напряжения.

Реализация такого режима кроме подготовки и проведения необходимых коммутаций в схеме питания магнитной системы требует также обеспечения работы системы синхронизации в отсутствие цикла поля. В ходе экспериментов в 41-м сеансе такой режим работы был реализован и отлажен. Были проведены измерения времени жизни циркулирующего пучка дейтронов в зависимости от положения рабочей точки ускорителя. Положение рабочей точки задавалось изменением тока питания линз. На рис. 5.4 приведены показания датчика тока циркулирующего пучка при различных значениях тока питания линз.

При оптимальном положении рабочей точки интенсивность пучка первые 1,5 с циркуляции спадала с характерным временем  $\approx 5,8$  с, после 1,7 с цирку-



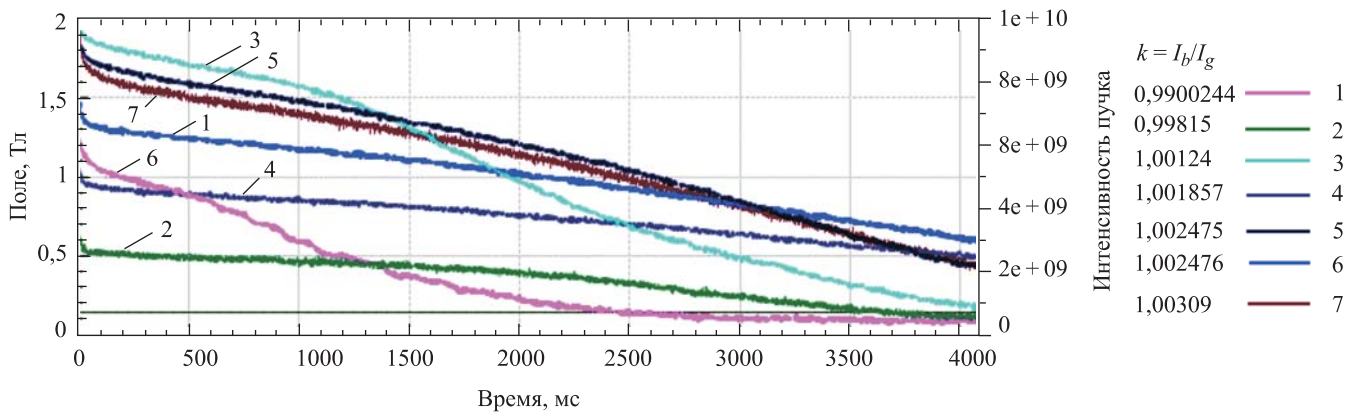


Рис. 5.4. Зависимость интенсивности пучка дейтронов от времени при различных положениях рабочей точки ускорителя. Параметром кривых является отношение тока дипольных магнитов к току линз

лянии время жизни уменьшалось примерно до 3 с. Принимая последнее значение в качестве характерного времени жизни пучка по многократному рассеянию на остаточном газе и считая аксептанс нукло-трона равным  $30 \text{ л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  в обеих главных плоскостях, можно оценить среднее давление остаточного газа на орбите пучка. Такая оценка дает значение примерно 5 нТорр, что находится в хорошем соответствии с измерениями датчиками давления и оценкой через время жизни ускоренного пучка ксенона.

**5.6. Измерение потерь при транспортировке выведенного пучка.** В ходе 40-го сеанса продолжались работы по развитию диагностики выведенного пучка. В рамках мероприятий проекта «Нуклотрон-М» были изготовлены два детектора, одинаковых по геометрии и содержащих уменьшенное количество вещества в области прохождения пучка, с помощью которых были проведены измерения потерь ионов по каналу транспортировки.

Расчетные параметры выведенного из нуклотрона пучка и построенные на их основе различные варианты оптических схем его транспортировки в экспериментальные зоны измерительного павильона и корпуса 205 не обуславливают каких-либо потерь во всем рабочем диапазоне энергий. Однако в реальных практических ситуациях на настоящее время сохраняются факторы, которые могут приводить к заметным потерям. Основным из таких факторов, по-видимому, является наличие вещества в трассе транспортировки пучка (воздушные промежутки для проведения экспериментов, вакуумные мембраны, диагностическая аппаратура), приводящее как к непосредственному выбыванию частиц за счет неупругого взаимодействия с ядрами вещества, так и к росту эмиттанса пучка из-за многократного рассея-

ния и возможным последующим потерям уже по этой причине. Последнее обстоятельство становится все более существенным с уменьшением энергии выведенного пучка.

В ходе сеанса № 40 была опробована методика измерения потерь пучка при помощи ионизационных камер на участке трассы от выходного фланца ускорителя до фокуса Ф4 канала ВП-1 общей протяженностью около 70 м. На данном участке во время измерений присутствовало  $\approx 3 \text{ г/см}^2$  распределенного вещества (воздух, фольги).

Измерения проводились на пучке дейтронов с энергией  $\approx 1 \text{ ГэВ/нукл}$ . Интенсивность выведенного пучка по данным аппаратуры контроля медленного вывода колебалась во время измерений в пределах  $1-3 \cdot 10^9$  частиц в цикле, ее растяжка была  $\approx 0,7 \text{ с}$ . В элементах магнитной оптики каналов медленного вывода и ВП-1 были установлены токи, соответствующие оптимальному режиму, сложившемуся в реальной практике сеансов.

В ходе измерений фиксировались серии последовательных показаний задействованных детекторов от цикла к циклу ускорителя. В соответствующих сериях камера № 1 устанавливалась в районах Ф4 (привязка), в измерительном павильоне в фокусе Ф3 и в тоннеле кольца нуклотрона на начальном участке трассы выведенного пучка в полутора метрах от выходного фланца ускорителя. Камера № 2 во всех сериях находилась в конечной точке тестируемого сегмента трассы транспортировки пучка (Ф4). Одновременно с показаниями ионизационных камер также фиксировались данные пучковых профилометров в районе фокусов Ф3 и Ф4. На рис. 5.5 приведены нормализованные отношения показаний ионизационных камер (№1 / №2) для трех соответствующих серий измерений.

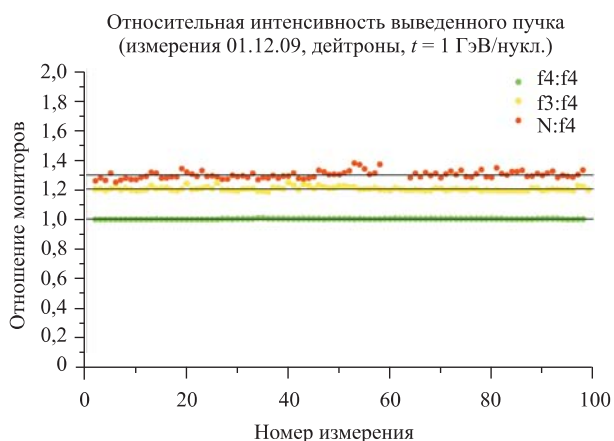


Рис. 5.5. Отношение показаний ионизационных камер (№ 1 / №2) при различных взаимных положениях: «• f4:f4» — оба детектора находятся в Ф4, их среднее отношение показаний принято за единицу; «• f3:f4» — детектор № 1 размещен в фокусе Ф3; «• N:f4» — детектор № 1 размещен на начальном участке трассы выведенного пучка в кольце нуклотрона

С учетом отбраковки точек по критериям положения центра тяжести и размеров пучка (не более 5 % от общего количества точек в каждой серии) численно значение величины потерь на всей длине тестируемого сегмента транспортировки выведенного пучка (от выхода из ускорителя до фокуса Ф4) в данном эксперименте равно  $27 \pm 2$  %, а для участка Ф3 и Ф4 —  $19 \pm 2$  %. Очевидно, что для эффективного использования выведенного пучка необходима модернизация канала транспортировки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье подробно описаны только некоторые основные результаты проведенных сеансов. Практически по всем основным системам нуклотрона проводятся работы по их модернизации с максимально напряженным графиком, ориентированным на завершение в 2010 г. Наиболее трудоемкая работа, которую планируется завершить к осеннему сеансу 2010 г., связана с переходом на новую схему питания магнитной системы. Основной задачей осеннего сеанса является обеспечение длительной и надежной работы ускорителя при проектной величине поля, ускорение и вывод ионов при максимальной энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов Н. Н., Алфеев А. В., Андреев В. А. и др. *Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38). Сообщение ОИЯИ Р9-2009-38.* Дубна, 2009.
2. Аверичев А. С., Агапов Н. Н., Алфеев А. В. и др. *Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2009-131.* Дубна, 2009.

Получено 1 июня 2010 г.

Аверичев А. С. и др.  
Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона

P9-2010-68

Приведены основные результаты работ по проекту «Нуклотрон-М», выполненных в период с июля 2009 г. по апрель 2010 г. Основное внимание уделяется итогам 40-го и 41-го сеансов работы нуклотрона, состоявшихся с 18 ноября по 11 декабря 2009 г. и с 25 февраля по 25 марта 2010 г. соответственно. Наиболее существенным достижением 41-го сеанса явилось успешное ускорение и вывод ионов  $^{124}\text{Xe}^{42+}$ .

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Averichev A. S. et al.  
Results of the 40th and 41st Nuclotron Runs

P9-2010-68

Main results of the works in the framework of the Nuclotron-M project fulfilled in the period from July 2009 till April 2010 are presented. General attention is devoted to the results of the 40th and 41st Nuclotron runs performed from 18 November to 11 December 2009 and from 25 February to 25 March 2010 correspondingly. The most sufficient achievement of the 41st run was successive acceleration and extraction of  $^{124}\text{Xe}^{42+}$  ions.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 15.06.2010.

Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,94. Тираж 350. Заказ № 57019.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)