

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

9-87-364

**СИНХРОФАЗОТРОН ОИЯИ**  
**Работа и совершенствование**  
**(IV квартал 1986 г.)**

**1987**

А.Н.Баландиков, В.Н.Булдаковский, М.А.Воеводин, В.И.Волков,  
 В.Г.Глущенко, А.И.Голохвастов, В.М.Горченко, А.Э.Дорошенко,  
 В.П.Заболотин, Л.П.Зиновьев, А.С.Исаев, И.Б.Исисинский, И.В.Калагин,  
 А.Д.Кириллов, И.А.Курсков, Л.Г.Макаров, В.А.Мончинский,  
 С.А.Новиков, Б.Д.Омельченко, В.Н.Перфеев, С.В.Романов,  
 И.Н.Семенюшкин, В.Ф.Сиколенко, А.А.Смирнов, В.Л.Тищенко,  
 С.В.Федуков, С.А.Хорозов, А.П.Царенков, О.Н.Цисляк, В.И.Черников,  
 Д.И.Шерстянов

## 1. РАБОТА И НАУЧНАЯ ПРОГРАММА

В IV квартале 1986 г. синхрофазотрон отработал 1762 ч. Из них на физический эксперимент использовано 1557 ч (88,4%), на совершенствование ускорителя — 114 ч (6,5%), сюда включены и работы, связанные с настройкой и юстировкой элементов магнитной оптики в каналах транспортировки выведенных пучков. Потери времени из-за простоя оборудования составили 65 ч (3,7%), технологическая подготовка заняла 26 ч (1,4%).

В табл. 1 приведена информация о виде ускоряемых ядер, величине максимальной и рабочей интенсивности в цикле ускорения и длительности работы в данном режиме в часах.

Таблица 1

Вид ядер	$N_{\max}$	$N_p$	$T_{\text{ч}}$
$p$		$N_p$	751
${}^7\text{Li}^{3+}$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^9$	113
${}^{12}\text{C}^{6+}$	$2,0 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^9$	634
${}^{16}\text{O}^{8+}$	$2,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	96
${}^{19}\text{F}^{9+}$	$2,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	168

$N_p$  — стабилизируемый уровень интенсивности определяется санитарным паспортом или требованиями эксперимента. Коэффициент использования ускорителя в протонном сеансе составил  $K = 3,55$ , при ускорении ядер  $K = 1,84$ .

В IV квартале 1986 г. выполнены исследования упругого протон-протонного рассеяния, получены данные по массовой зависимости рождения  $K^+$ - и  $K^-$ -мезонов на ядрах на пучке углерода, установлены корреляции  $(pp)$ ,  $(\pi\pi)$  и  $(p\pi)$  для разных углов вылета с измерением спектров протонов при излучении взаимодействия углерода с мишенью, получен экспериментальный материал при изучении фрагментации фтора и кислорода и др. Выполнены предусмотренные методологические и медико-биологические исследования.

В табл.2 приводятся основные характеристики работы синхрофазотрона на протяжении последних 10 лет, с 1976 г. по 1986 г.

Таблица 2

Годы	Отработано		Отказы (%)	Л	Т	Интенсивность (частиц/цикл)		К	А
	$\tau_1$	$\tau_2$				$N_{max}$	$N_p$		
1976-1980	21160	60	6,0	p-8600		$3,0 \cdot 10^{12}$	$N_p$	1,65	970
				d-4400		$1,0 \cdot 10^{12}$	$N_p$		
				$^4\text{He}$ -4810		$4,7 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^9$		
				C-2935		$4,0 \cdot 10^6$			
				O-148		$2,0 \cdot 10^5$			
			Ne-12		m				
1981-1985	19809	55	5,0	p-6416		$4,0 \cdot 10^{12}$	$N_p$	2,3	1233
				d-4484		$1,0 \cdot 10^{12}$	$N_p$		
				d <sup>+</sup> -1156		$6,0 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$		
				$^3\text{He}$ -615		$4,0 \cdot 10^9$	$0,8 \cdot 10^9$		
				$^4\text{He}$ -2403		$6,0 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$		
				Li-60		$2,0 \cdot 10^9$	$0,3 \cdot 10^9$		
				C-2575		$4,0 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^8$		
				O-843		$2,5 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^7$		
				F-522		$6,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$		
				Ne-386		$6,0 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$		
				Mg-282		$1,0 \cdot 10^5$	$0,3 \cdot 10^5$		
Si-63		$3,0 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$						
		51		p-1715			$N_p$	4,3	269
				d-372			$N_p$		
				d <sup>+</sup> -813	$2,0 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$			
				Li-113	$4,0 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^9$			
1986	4089		3,7	C-634	$2,0 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^9$			
				O-96	$2,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$			
				F-168	$2,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$			
				Mg-178	$8,0 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^4$			

$\tau_1$  — время, использованное для ускорения частиц.

$\tau_2$  — время, использованное для ускорения протонов и дейтронов (в процентах).

Л — род ускоренных частиц.

Т — длительность работы (в часах).

$N_p$  — рабочая интенсивность, определяемая требованиями санитарного паспорта, условиями эксперимента или возможностью ускорителя.

К — коэффициент использования ускорителя в протонном и дейтронном сеансах работы.

А — работа на сэкономленной энергии (в часах).

m — индикаторное количество ядер.

## 2. ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

Для обеспечения запланированных физических экспериментов пучками ядер лития, углерода, кислорода и фтора был использован лазерный источник многозарядных ионов.

В зависимости от выбранного элемента в линейном ускорителе (ЛУ-20) ускоряются ионы с различным отношением Z/A.

Таблица 3

Элемент	литий	углерод	кислород	фтор
Ускоряемый ион	ядро $^7\text{Li}^{3+}$	$^{12}\text{C}^{4+}$	$^{16}\text{O}^{6+}$	$^{19}\text{F}^{7+}$
Z/A	0,4285	0,3333	0,3750	0,3684
Потенциал ионизации (эВ)	122,45	64,49	138,12	185,18

Из табл. 3 видно, что максимальный потенциал ионизации, который надо получить в лазерной плазме, оказывается < 200 эВ. Это позволяет существенно снизить требование к плотности потока излучения на мишени.

Для оптимальной настройки тока на выходе ЛУ-20 подбирается соответствующая плотность потока на мишени посредством расфокусировки падающего излучения.

Все ускоренные ионы, за исключением ядер лития, подвергаются обдирке на углеродном стриппере, расположенном в ~ 2 м после резонатора ЛУ-20.

Из-за низкого отношения Z/A, особенно для углерода, в резонатор ЛУ-20 требуется ввести большую высокочастотную мощность. При ускорении углерода ВЧ-генераторы системы "Родонит" <sup>1/</sup> работают уже в режиме максимальной нагрузки, что, естественно, снижает их надежность. Поскольку расчетная напряженность ускоряющего электрического поля в резонаторе не достигается, синхронная фаза оказывается малой. При использовании группирователя это приводит к острой зависимости режима ускорения от уровня напряжения форинжектора (ФИ). Так, изменение напряжения ФИ  $U = U_{ном.} \pm 1$  кВ ( $\Delta U = \pm 0,2\%$ ) приводит к уменьшению тока на выходе ЛУ-20 в 2-3 раза. В то же время напряжение на ускоряющей трубке зависит и от токовой нагрузки ионов, поступающих из источника. Нагрузка эта растет со временем, поэтому длительность тока на выходе ЛУ-20 определяется не только самой длительностью ионного пучка, но и временем, в течение которого напряжение ФИ соответствует необходимой величине.

В прошедшем сеансе удалось простым способом увеличить это время практически до длительности ионного пучка, что было достигнуто путем запуска источника не на плоской вершине импульса напряжения ФИ, а на его нарастающем фронте с таким расчетом, чтобы изменение уровня напряжения за время прохождения пучка ионов было минимальным. В результате длительность ускоренного тока углерода увеличилась с 5 мкс до  $20 \pm 25$  мкс, а для лития достигла  $\sim 15$  мкс. Это позволило получить в кольце синхрофазотрона ускоренные пучки ядер углерода  $\sim 2 \cdot 10^9$  ядер/цикл, лития —  $4 \cdot 10^9$  ядер/цикл.

В табл. 4 приведены характеристики пучков ионов на выходе ЛУ-20.

Таблица 4

Элемент	литий	углерод	кислород	фтор
Материал мишени	фтористый литий	графит	кварц	фторопласт
Ток ядер, мА	2,0	2,5	0,8	1,2
Длительность на полувысоте, мкс	15	25	10	6
Число ядер	$6,25 \cdot 10^{10}$	$6,5 \cdot 10^{10}$	$6,25 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$

### 3. БЕССТРУКТУРНЫЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД

Экспериментальные физические установки успешно работали в режиме бесструктурного медленного вывода, который обеспечивался совместной работой системы синхронного управления вентильным преобразователем питания главного магнита, активного фильтра (АФ) и обратной связи по току пучка с блоком демпфирования автоколебаний и стабилизации скорости развития резонанса  $^{2/2}$ . Вывод пучка производился на плато индукции магнитного поля  $B = 1,07$  Тл, интенсивность выводимого пучка составляла  $1 \cdot 10^{10}$  частиц в цикле ускорения. Измерения показали, что низкочастотная модуляция тока выведенного пучка — не более  $(30 \pm 40)\%$  (рис. 1).

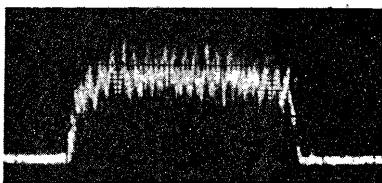


Рис. 1. Макроструктура тока выведенного пучка частиц.

При организации совместной работы систем, обеспечивающих получение режима бесструктурного медленного вывода, большие усилия пришлось затратить для увеличения работоспособности активного фильтра (АФ)  $^{3/3}$ . В частности, это выразилось в усовершенствовании защитных устройств АФ.

В схеме АФ работают параллельно четыре одинаковых усилителя, каждый из которых питает током пульсаций компенсационную обмотку соответствующего квадранта главного электромагнита. В связи с большой нагрузкой в каждом плече работают параллельно 40 транзисторов типа КТ 809 А.

При аварийных режимах в системе питания главного магнита ускорителя бросок напряжения в компенсационной обмотке, достигающий 90 В, складывается с напряжением источника питания усилителя, что и определяет при полном открытии усилительных каскадов ток в плече до 80 А или величину выделяемой мощности  $\sim 12000$  Вт. Способность выдерживать такие перегрузки не одинакова для различных транзисторов, в результате выходят из строя отдельные параллельные ветви, происходит еще большая перегрузка остающихся в работе — развивается авария, и АФ выходит из строя. Использование максимальной импульсной защиты для закрытия ключей оказалось неэффективным — выход из строя транзисторов продолжался: за короткое время из строя выходило до 100 транзисторов.

Был предпринят ряд усовершенствований, который позволил значительно увеличить надежность работы АФ:

1. Проведены мероприятия для улучшения деления тока между транзисторами.
2. В схему АФ введен компаратор, выдающий сигнал для закрывания тиристорных ключей уже при величине амплитуды пульсаций в компенсационной обмотке квадранта, превышающей  $\Delta U = \pm 1$  В. Таким образом коллекторное питание транзисторов отключается, как только амплитуда пульсаций в обмотке достигнет трехкратного значения.
3. Введена пороговая обратная связь коллектор-база для открывания транзистора при  $U_k \geq 100$  В.
4. Вместо разрядников типа Т-100, шунтирующих силовые транзисторы, установлены высокочастотные разрядники ТЧИ-100.
5. Введено токовое реле РТ-40  $^{4/4}$  для отключения АФ при срабатывании разрядника или коротком замыкании в силовых цепях. При повреждении транзистора он отключается вследствие сгорания предохранителя в базовой или эмиттерной цепях. При этом АФ остается в работе, так как время срабатывания реле РТ-40  $^{4/4}$  больше, чем время разрушения предохранителей.

### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА В КАНАЛЕ МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА

С целью расширения диагностических возможностей автоматизированной системы контроля и управления параметрами медленного

вывода пучка из синхрофазотрона созданы, испытаны на ускорителе и введены в действие два комплекта аппаратуры для абсолютных измерений интенсивности пучка.

В качестве детекторов используются плоскопараллельные восьмиазорные ионизационные камеры, наполненные аргоном. Сигнальные и высоковольтные электроды камер изготовлены из медной фольги толщиной 10 мкм. Диаметр электродов 180 мм, расстояние между ними 10 мм. Рабочее напряжение на высоковольтных электродах — 700 В. Сопротивление изоляции между высоковольтными и сигнальными электродами  $10^{14}$  Ом.

Основным узлом аппаратуры регистрации сигнала с камеры является интегратор тока ионизации, который обеспечивает измерения в трех диапазонах со следующими коэффициентами преобразования заряда в напряжение: в первом диапазоне —  $2 \cdot 10^9$  В/Кл, во втором —  $2 \times 10^7$  В/Кл и в третьем —  $2 \cdot 10^5$  В/Кл. Переключение чувствительности производится дистанционно с пульта управления ускорителем. Интегратор снабжен эффективной схемой компенсации токов утечки от высоковольтных электродов и возможных фоновых токов, вызванных наведенной радиоактивностью элементов камеры и конструкций канала транспортировки пучка. Скорость дрейфа выходного сигнала интегратора, подключенного к камере, не превышает 0,3 мВ/с.

Передача информации от интегратора к ЭВМ, расположенной в зале управления ускорителем, производится с помощью преобразователя напряжения — частота (ПНЧ) для исключения влияния помех, возникающих в протяженной линии связи (~ 500 м). Крутизна характеристики преобразования ПНЧ составляет 10 кГц/В. Интегральная нелинейность — не более  $3 \cdot 10^{-4}$  в диапазоне входных сигналов 0:10 В.

Регистрация данных в месте размещения ЭВМ осуществляется счетчиком импульсов. После обработки информация отображается на телевизионных мониторах.

Достигнутая высокая чувствительность аппаратуры позволила провести ее калибровку с использованием методики сцинтилляционных счетчиков на выведенном пучке ядер углерода при интенсивности  $\sim 10^4$  част./цикл в условиях, когда вероятность просчетов крайне незначительна. Калибровка проведена при четырех энергиях выведенного пучка.

Проведенные исследования показали, что введенная в действие аппаратура позволяет производить, как и предполагалось при ее разработке, абсолютные измерения интенсивности в диапазоне  $10^5 \div 10^{12}$  однозарядных част./цикл с погрешностью не более  $\pm 3\%$ . Тем самым обеспечивается контроль одного из основных параметров выводимого пучка в широком диапазоне интенсивностей и реализуются дополнительные возможности в проведении работ по оптимизации режимов вывода пучка и его транспортировки к физическим установкам.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНЖЕКТИРУЕМОГО ПУЧКА

Внутри камеры синхрофазотрона находятся два коллекторных датчика для измерения тока и заряда пучка частиц, инжектируемых в камеру ускорителя. Один из них — цилиндр Фарадея — измеряет число частиц, прошедшее инфлекторные пластины; второй — бетатронная мишень — измеряет число частиц, циркулирующих в камере ускорителя в квазибетатронном режиме. Обычно сигналы с коллекторных датчиков поступают на вход усилительного устройства, находящегося в непосредственной близости от датчика. При этом усилитель работает либо в режиме сбора заряда, либо в токовом режиме. Такое построение измерительной аппаратуры имеет следующие недостатки. Во-первых, для достижения большого динамического диапазона по входным сигналам, например  $10^5$ , усилитель должен иметь переключатель диапазонов, управляемый, как правило, с операторских пультов. Во-вторых, усилитель, расположенный вблизи датчика, находится в "зоне запрета" по радиационной обстановке, что усложняет его эксплуатацию. Для устранения этих недостатков на синхрофазотроне реализована следующая схема измерительного устройства. Сигнал с коллекторного датчика поступает на вход зарядового усилителя (1) с интегрирующей емкостью  $C_{\text{и}}$  в цепи обратной связи (см. рис. 2). Усилитель находится на пульте управления ускорителем и обеспечивает динамический диапазон измерения входных сигналов от  $1 \cdot 10^9$  до  $1 \cdot 10^{14}$  р/цикл благодаря переключению величины интегрирующей емкости. Зарядовый усилитель собран на базе маломощного быстродействующего операционного усилителя с большим входным сопротивлением (КР544 УД2А).

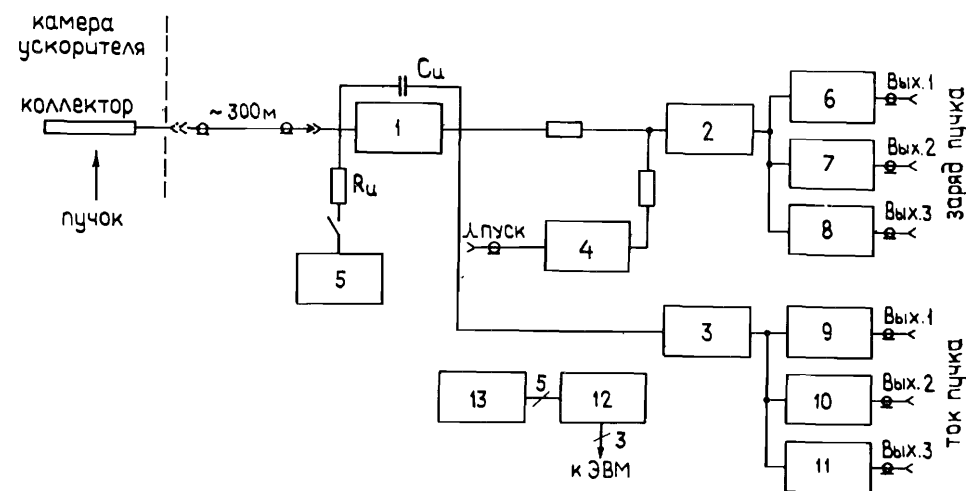


Рис. 2. Структурная схема системы измерения тока и заряда инжектируемого пучка.

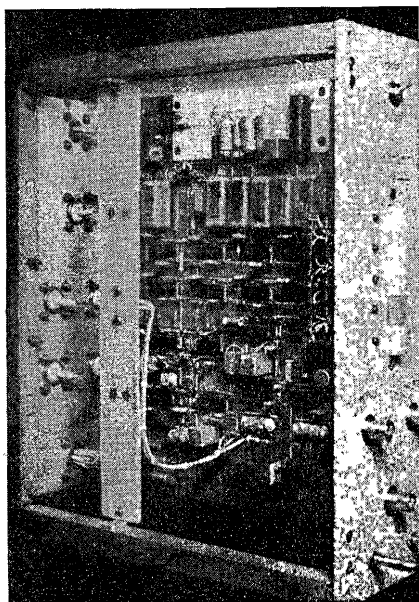


Рис. 3. Общий вид электронного блока.

Емкость кабеля между датчиком и усилителем при этом практически не оказывает шунтирующего действия и не уменьшает чувствительности зарядового усилителя, так как его входная емкость определяется выражением  $C_{вх} = C_{и} (K + 1) \gg C_{каб}$ , где  $K = 2 \cdot 10^4$  — коэффициент усиления операционного усилителя. Следовательно, в режиме сбора заряда предусилитель допускает удаление его на значительное расстояние (в нашем случае — на 300 м). Измерение тока в цепи коллекторной мишени осуществляется введением в схему дифференциатора (3). При этом измерение тока и заряда происходит одновременно в одном цикле ускорения. Для увеличения точности абсолютных измерений заряда в схему

введена цепь калибровки зарядового усилителя. Для калибровки используется метод формирования высокоточного импульсного сигнала (5). Длительность импульса и его амплитуда известны с точностью не хуже  $1 \cdot 10^{-3}$ . Определение же с такой точностью величины  $C$  не представляется возможным. В измерительную аппаратуру введена схема формирования маркерных меток (4). Метки суммируются с полезным сигналом в усилителе (2) и поступают на пульт управления ЛУ-20, что позволяет оператору определить положение позиционного переключателя (13), то есть чувствительность аппаратуры. Для ЭВМ положение переключателя кодируется схемой шифратора (12). Для усиления мощности используются выходные усилители (6 ÷ 11). Общий вид электронного блока, реализующего структурную схему, представлен на рис. 3.

Технические характеристики измерительной системы:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Динамический диапазон входных сигналов        | $1 \cdot 10^9 \div 1 \cdot 10^{14}$ р/имп. |
| 2. Порог чувствительности                        | $3 \cdot 10^8$ р/имп.                      |
| 3. Точность абсолютных измерений заряда, не хуже | 0,5%                                       |
| 4. Диапазон рабочих частот                       | $0 \div 0,1$ МГц                           |
| 5. Количество измерительных каналов              | 2  |

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В.А. Сообщение ОИЯИ 9-11835, Дубна, 1978.
2. Волков В.И. и др. Сообщение ОИЯИ 9-8910, Дубна, 1975.
3. Глуценко В.Г. и др. Сообщение ОИЯИ 9-86-473, Дубна, 1986.
4. Алексеев В.С. и др. Реле защиты. М.: Энергия, 1976, с.97.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 мая 1987 года.