

СЗ45а Безногих Ю.Д. и др.
Б-399 БЗ-9-10583.

+

2520/77



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БЗ-9-10583

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19

77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

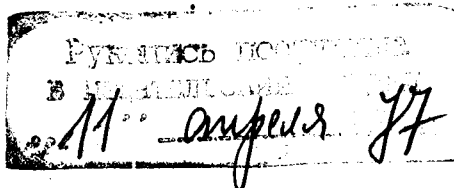
Ю.Д. Безногих, Г.А. Боков, М.А. Воеводин, В.П. Заболотин,
Л.П. Зиновьев, А.С. Исаев, Г.С. Казанский, И.И. Карпов, Ю.К. Карягин,
Н.А. Коруков, Л.Г. Макаров, А.И. Михайлов, В.А. Мончинский,
С.С. Нагдасев, В.Н. Перфеев, В.А. Попов, Г.П. Пучков, И.Н. Семенюшкин,
Ю.В. Смирнов, С.В. Федуков, А.П. Царенков, В.И. Черников, К.В. Чехлов,
Д.И. Шерстянов, В.А. Щурковецкий, И.Н. Яловой.

БЗ-9-10583

СИНХРОФАЗОТРОН ОИЯИ.

РАБОТА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ.

(IY квартал 1976 г.)



БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1977 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение.....	2
2. Геодезия.....	3
3. Интенсивность ускорителя.....	4
4. Управляющая электроника.....	9
5. Вакуум.....	14

I. Введение.

В четвёртом квартале 1976 г. синхрофазотрон ОИЯИ проработал на эксперимент 1349 ч. (86.1%) из запланированных расписанием 1567 ч. Из них на физиков отработано 1205 ч. (76.9%), на дальнейшее изучение и совершенствование ускорителя - 144 ч. (9.2%). На технологическую подготовку синхрофазотрона затрачено 62 ч. (4.0%), простой составил 156 ч. (10.0%).

Средняя интенсивность и длительность работы:

протоны - 2.8×10^{11} частиц в цикле - 144 часа,
дейтроны - 2.3×10^{10} - " - - 180 часов,
ядра гелия - 4.0×10^8 - " - - 790 " .

Соответственно, в течение 1976 г. синхрофазотрон проработал на эксперимент 3988 ч. (90.0%) из запланированных расписанием 4429 ч. На физиков отработано 3033 ч. (68.5%), а на совершенствование систем ускорителя - 955 ч. (21.6%). Технологическая подготовка заняла 105 ч. (2.4%), время простоя - 328 ч. (7.4%).

Средняя интенсивность и длительность работы на протяжении

года: протоны - 1.4×10^{11} частиц в цикле - 2165 часов,
дейтроны - 2.1×10^{10} - " - - 516 " ,
ядра гелия - 2.0×10^8 - " - - 1200 " .

Коэффициент использования ускорителя в четвёртом квартале (K) был равен 1.6, а в 1976 г. - 1.4. Рост K в последнем квартале был обусловлен осуществлением совместного режима работы медленного и быстрого вывода пучка в одном цикле.

Продолжающиеся геодезические наблюдения за положением электромагнита (ЭМ) ускорителя подтверждают факт влияния на его осадку строительной площадки корп. 205.

Получено увеличение уровня интенсивности ускоряемых протонов и ядер и улучшение стабильности за счёт лучшего согласования -

ния инжекционной оптики с кольцом ускорителя и сложения высоко - частотной мощности питания резонатора линейного ускорителя (ЛУ). Это позволило увеличить интенсивность ускоряемых ядер гелия в ~5 раз, так в декабре с.г. средняя интенсивность на протяжении 80 часов имела уровень 3.0×10^9 ядер в цикле, а в максимуме достигала 4.5×10^9 . Включение в параллельную работу двух в.ч. каналов "Родонита" позволило получить с 21 дек. рост интенсивности ускоренных протонов с $(1+2) \times 10^{11}$ до $(3+6) \times 10^{11}$ в цикле.

С июля с.г. введена в опытную эксплуатацию новая система связи f и H с высокими качественными характеристиками, в частности, система обеспечивает на больших полях поддержание радиального положения пучка на уровне 1 мм.

Средний вакуум в камере кольца ускорителя - 2.8×10^{-6} Торр.

2. Геодезия.

В течение квартала было проведено 2 цикла наблюдений за кустом реперов, один цикл - за рабочей сетью первого корпуса и один цикл - за стабильностью положения ЭМ синхрофазотрона./1/.

Абсолютная осадка реперов:

I репер	- 0.06 мм,
II -"-	- 0.06 "
III -"-	+ 0.07 "
IV -"-	+ 0.06 "

Средняя квадратическая погрешность измерений ≤ 20 мкм.

Абсолютные осадки шкалок рабочей сети на внутреннем кольце ЭМ имели величины:

минимальная в области I квадранта + 0.17 мм,
максимальная в области III квадранта - 0.98 мм.

То же - на внешнем кольце ЭМ:

минимальная - в области II квадранта + 0.50 мм,
максимальная - в области IV квадранта - 1.20 мм.

Таким образом максимальная величина осадок наблюдается в районе III и IV квадрантов, в непосредственной близости к строительной площадке корп. 205.

Вычислены абсолютные осадки ЭМ синхрофазотрона на основании декабрьского цикла наблюдений:

Квадрант №	Диапазон абсолютных осадок (шкалки ЭМ) мм		Средняя абс. осадка S мм		Доверит. интервал мм
	R _{вн}	R _{нар}	R _{вн}	R _{нар}	
I	-0.30+I.50	+0.36+0.85	I.20	I.2I	
II	+0.74+0.82	+0.65+0.53	I.56	I.I8	
III	-0.09+0.8I	-0.98+0.94	0.72	0.04	0.4 ≤ ΔS ≤ 0.5
IV	-0.4I+I.20	+0.32+0.90	0.79	I.22	

Средняя квадратическая погрешность измерений $\delta_h \approx 0.06$

3. Интенсивность ускорителя

А. Динамика пучка.

При запуске ускорителя после длительной летней остановки некоторое время не удавалось получить рабочий уровень интенсивности. Пришлось существенно изменить токи коррекции Z-плоскости. Лучший результат при ускорении дейтронов был получен 12 ноября с.г.

Панорама потерь выглядела следующим образом:

$$N_{\text{пп}} = (1.4 + 1.7) \times 10^{13} \text{ д.} \quad N_p = 4.0 \times 10^{12} \text{ д.}$$

$$J_{3.0\text{мс}} = (7.0 + 8.0) \times 10^{11} \text{ дейтр./цикл,}$$

$$J_{20.0\text{мс}} = (2.0 + 2.5) \times 10^{11} \text{ " - " ,}$$

$$J_{100.0\text{мс}} = (1.2 + 1.4) \times 10^{11} \text{ " - " ,}$$

$$J_{600.0\text{мс}} = (0.8 + 0.9) \times 10^{11} \text{ " - " .}$$

Причину этого нужно было искать в результатах работы по установке

нового прямолинейного промежутка, в котором форсистема (ФС) имела форлинзу иной конструкции с прямым водяным охлаждением и новое транспортное устройство. В результате оказалось:

1) Изменена длина и конфигурация корректирующих обмоток Z -плоскости на этом промежутке.

2) Изменился характер влияния на медианную плоскость ускорителя магнитов 6 и 7СП94 магнитного канала.

Была предпринята попытка ввести дополнительную регулировку Z -плоскости в квадрантах ускорителя. Для этого были частично разобраны обмотки корректирования показателя поля, чтобы освободившиеся источники питания можно было использовать для корректирования Z -плоскости. Эффективность регулировки медианной плоскости в квадрантах оказалась достаточно хорошей, особенно это проявлялось при работающих магнитах 6 и 7СП94. Однако, увеличения интенсивности получено не было по причине отсутствия части обмоток коррекции показателя поля. В дальнейшем, очевидно, необходимо увеличить количество источников питания, чтобы удовлетворить требованию одновременного корректирования показателя поля и Z -плоскости.

В одном из экспериментов было проверено влияние токов коррекции системы корректирования показателя поля (РЗМИ-2) на изменение радиальной и вертикальной орбит. Это вызвано тем, что изменение токов в системе РЗМИ-2 вносит различные добавки ΔH_z в квадранты. В общем случае это приводит к появлению азимутальной асимметрии магнитного поля.

С другой стороны, существует особенность воздействия на показатель поля верхних и нижних обмоток корректирования. И связано это с использованием обратных проводников, расположенных только на верхних полюсах ЭМ. В результате, витки рабочих обмоток, образованные проводниками нижних полюсов, представляют собою рамки, плоскости которых располагаются под некоторым углом к плоскости полюсов ЭМ. Такая система приводит к появлению радиальной соста -

вляющей ΔH_z магнитного поля в рабочей области камеры ускорителя.

Как показал опыт, изменение токов в обмотках корректирования показателя поля в широких пределах (0 + 5А) не оказывает влияния на z-орбиты в пределах точности измерений. Влияние на z-орбиты оказывается сильнее. Так, при выключении из системы корректирования одного из квадрантов z-орбита изменяет своё положение на 4 - 5 см. При настройке коррекций показателя поля на оптимум практического влияния на изменение z-орбиты не наблюдалось.

После оптимизации ионной оптики на инжекционном участке для ядер с соотношением $\frac{z}{A} = \frac{1}{2}$ удалось увеличить их количество, вводимое в камеру ускорителя, и в сеансе ускорения ядер гелия 3 дек. с.г. после настройки начальных условий, закона связи f и H , характеристик магнитного поля ускорителя получено существенное (в 5 раз) увеличение интенсивности:

$$N_{\text{II}} = 2.6 \times 10^{11} \text{ ядер гелия, } N_{\beta} = 1.2 \times 10^{11} \text{ ядер гелия,}$$

$$J_{3.0\text{мс}} = 2.2 \times 10^{10} \text{ ядер/цикл,}$$

$$J_{20.0\text{мс}} = 0.8 \times 10^{10} \text{ - " - ,}$$

$$J_{100.0\text{мс}} = 0.6 \times 10^{10} \text{ - " - ,}$$

$$J_{600.0\text{мс}} = 0.4 \times 10^{10} \text{ - " - .}$$

При ускорении протонов лучший результат был получен 29 дек.:

$$N_{\beta} = 1.0 \times 10^{13} \text{ прот/цикл,}$$

$$J_{3.0\text{мс}} = 3.0 \times 10^{12} \text{ - " - ,}$$

$$J_{20.0\text{мс}} = 1.5 \times 10^{12} \text{ - " - ,}$$

$$J_{100.0\text{мс}} = 1.2 \times 10^{12} \text{ - " - ,}$$

$$J_{300.0\text{мс}} = 0.9 \times 10^{12} \text{ - " - .}$$

Б. Линейный ускоритель,

В IУ квартале была успешно завершена работа по сложению высокочастотной (ВЧ) мощности двух генераторов "Родонита" в резонаторе ЛУ-20.

Установка "Родонит" имеет два ВЧ - генератора с импульсной мощностью 3МВт каждый. ВЧ-генераторы могут быть подключены через шаровый переключатель либо на резонатор, либо на эквивалент. Для получения ускоренного пучка протонов с током в импульсе $I_5 - I_8 \text{ мА}$, при работе одного генератора на резонатор ЛУ-20, необходимо, чтобы он отдавал ВЧ мощность $\sim 3.2 \text{ МВт}$, т.к. резонатор ЛУ-20 имеет добротность около 40000. Это достигается только при максимальных анодных напряжениях на генераторных лампах установки. Известно, что мощные радиолампы при предельных анодных напряжениях могут возбуждаться на частотах $1600 - 2500 \text{ МГц}$, что в нашем случае нередко выводило из строя ВЧ тракт генератора. Согласно критерию долговечности лампа оконечного 3-го каскада ГИ-42Б через 1000 ч работы уменьшает отдаваемую мощность с 3.5 до 2.7 МВт. Кроме того, из-за паспортного разброса параметров только отдельные приборы позволяли получить ВЧ мощность выше 3.0 МВт. Перечисленные факторы делали режим работы генератора при ускорении протонов весьма напряжённым, и, как правило, на анодах генераторных ламп устанавливалось такое напряжение, чтобы на выходе линейного ускорителя мог быть получен пучок протонов порядка $10 - 12 \text{ мА}$, что соответствует значению синхронной фазы при ускорении протонов $15 - 20^\circ$.

Расчёты показали, что параллельное включение двух ВЧ генераторов на один резонатор позволит получить мощность $4 - 5 \text{ МВт}$ и облегчит работу каждого генератора. Этот уровень мощности при ускорении протонов даст возможность получить расчётное значение синхронной фазы ($\varphi_s = 31.5^\circ$) и при токе протонов $\sim 28 \text{ мА}$ - стабильный режим.

Для реализации этой идеи был изготовлен отдельный ВЧ ввод в резонатор, петля связи, вакуумный стакан с диафрагмой и фидерный тройник, позволяющий переключаться с резонатора на эквивалент. Эти элементы фидерной системы 2-го генератора были смонтированы в периоды профилактических остановок ускорителя.

На рис. I приводится блок-схема установки.

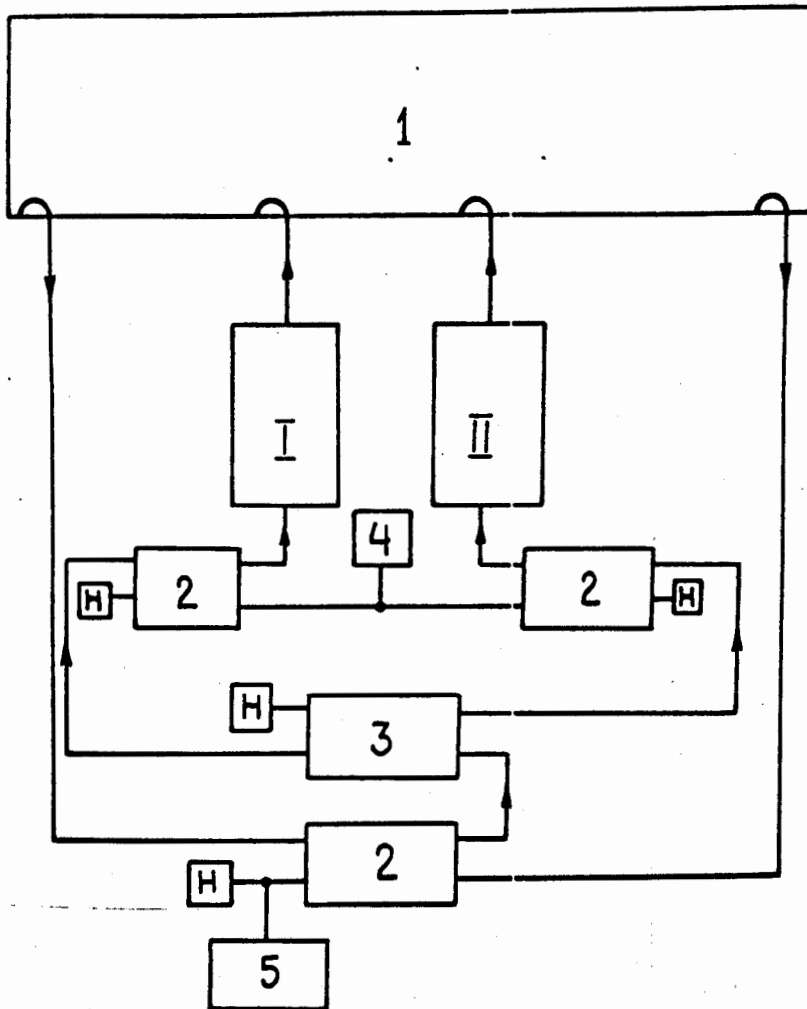


Рис. I.

I, II - ВЧ усилители мощности, 2 - мосты сложения, 3 - мост деления, 4 - задающий генератор, 5 - блок защиты. Две петли в цепи положительной обратной связи обеспечивают защиту генераторов от пробоев в резонаторе. При пробое в зазоре между трубками дрейфа в любой части резонатора ВЧ поле искажается, изменяясь от нуле -

вого значения в месте пробоя до величины большей $U_{\text{ном}}$ на противоположном конце резонатора. В этом случае наступает разбаланс сигналов с петель обратной связи, и на вход усилителя поступает ВЧ мощность в 4 раза большая, чем в рабочем режиме. Кроме того, с моста сложения подаётся сигнал на систему защиты по анодному напряжению, который приводит к запираанию анодного модулятора.

Включение двух генераторов позволило поднять уровень мощности в резонаторе ЛУ-20 до 5 МВт и ток протонного пучка до 28 мА.

В декабрьском сеансе работы в камеру ускорителя инжесктировался ток 20 - 25 мА, Это обеспечивало возможность устойчивого получения средней интенсивности на уровне $(5-7) \times 10^{11}$ прот/цикл. При соответствующей подстройке всех систем ускорителя сравнительно легко достигалась интенсивность $(1.0-1.2) \times 10^{12}$ прот/цикл.

4. Управляющая электроника.

Для обеспечения синхротронного режима ускорения в синхрофазотроне частота ускоряющего напряжения должна "следить" за магнитным полем и изменяться по определённом "закону связи" в функции магнитного поля. Жёсткость и стабильность связи частоты с полем определяется допустимыми отклонениями пучка по радиусу как в процессе ускорения в одном цикле, так и в течение длительных интервалов времени. Отклонение в частоте на 0.1% от требуемого значения для синхрофазотрона ОИЯИ приводит к отклонению пучка по радиусу на 6 см в начале ускорения и на 3 см в конце. Хотя такая стабильность закона связи и приемлема для обеспечения нормального режима ускорения, она оказывается явно недостаточной при осуществлении управления пучком в со смещённых режимах физических экспериментов, в особенности в режимах медленного и быстрого выводов пучка из ускорителя.

Помимо весьма жёстких требований к стабильности закона связи требуется его перестройка в довольно широких пределах при переходе от **ускорения протонов** к ускорению ядер.

Аппаратура связи частоты с полем, установленная на ускорительном комплексе с начала запуска синхрофазотрона, не в должной мере удовлетворяла этим требованиям. Имела она и другие недостатки. Так, формирование нелинейной зависимости диодным функциональным преобразователем лишь с уменьшающимся коэффициентом передачи накладывает жёсткие требования на крутизну модуляционной характеристики задающего генератора, которая не должна иметь отклонений в обе стороны от некоторой средней величины. Задающий генератор не удовлетворял данному условию; тем самым исключалась возможность настройки закона связи с заданными допусками отклонения пучка по радиусу в процессе синхротронного ускорения. Кроме того, так как каждый открывающийся диод в функциональном преобразователе влиял на весь последующий характер нелинейной зависимости, настройка программы управления частотой ускоряющего напряжения с помощью первых цепочек с диодами приводила, практически, к полной перестройке функционального преобразователя.

Обычно для стабилизации радиального положения пучка в процессе ускорения используют коррекцию частоты ускоряющего напряжения посредством введения в обратную связь сигнала, пропорционального радиальному отклонению пучка от средней орбиты. Сигнал получают с помощью системы сигнальных радиальных электродов. Использование обратной связи по пучку в значительной степени снижает требования к точности и стабильности программного управления частотой ускоряющего напряжения. Однако при ускорении ядер коррекция частоты по пучку может оказаться невозможной. Это связано с перезарядкой на остаточном газе в процессе ускорения ядер, что определяет их большие потери, и исчезающе малой интенсивностью, которая окажется за пределами чувствительности электродов. Далее, аппаратура связи была полностью выполнена на радиолампах и имела сравнительно большое количество стабилизированных источников питания для накальных и анодных цепей. Часть

выпрямителей требовала постоянного контроля и измерения напряжений в процессе эксплуатации. Нестабильность аппаратуры не более $\pm 0.1\%$ на протяжении 8 ч. непрерывной работы могла поддерживаться лишь при стабильности напряжений основных выпрямителей ± 300 В на уровне $\pm 10^{-4}$ и при колебании температуры окружающей среды не более, чем на $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, эксплуатируемая до середины 1976 г. аппаратура связи частоты с полем, ввиду указанных недостатков, не могла более удовлетворять всё возрастающим требованиям проводимых на синхрофазотроне экспериментов и стала одним из "узких" мест в ускорительном комплексе.

В июле 1976 г. была введена в опытную эксплуатацию новая система связи f и В, разработанная в секторе электроники радиотехнического отдела.

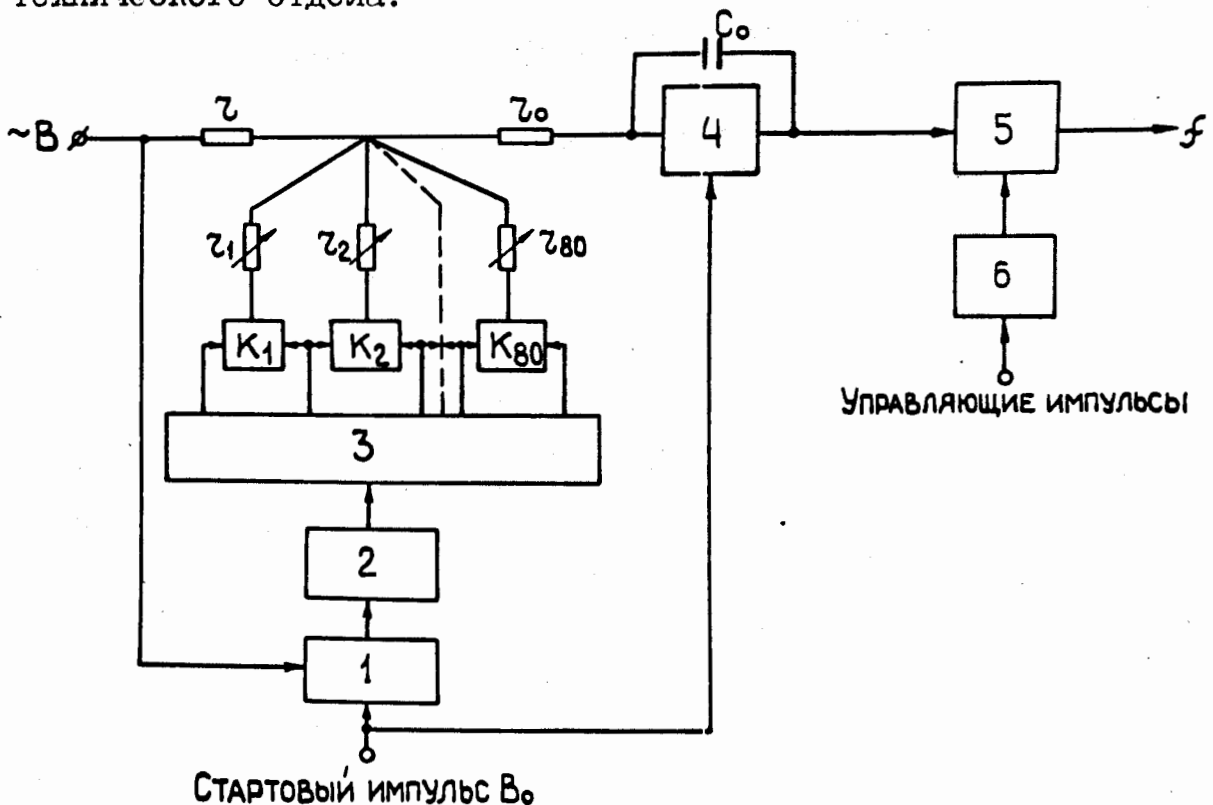


Рис. 2. Блок-схема новой системы связи f и В.

В состав аппаратуры этой системы входит функциональный преобразователь, задающий генератор (5) и блок управления режимами физических экспериментов (6). В свою очередь основными

элементами функционального преобразователя являются: дискретный датчик магнитного поля (1), реверсивное пересчётное устройство (2), блок формирования импульсов, управляющих работой ключей, (3), электронные ключи в цепях прецизионных делителей (K_1, K_2, \dots, K_{80}) и бездрейфовый электронный интегратор (4).

При ускорении заряженных частиц в синхрофазотроне частота ускоряющего напряжения f_0 связана с магнитным полем в нелинейной зависимости, которая для нашего случая выражается формулой:

$$f_0 = \frac{1.44 q \cdot B}{\sqrt{1.25\left(\frac{A}{Z}\right)^2 + B^2}}, \quad (I)$$

где q - кратность ускорения,

A - массовое число, равное количеству нуклонов в ядре,

Z - заряд ядра в единицах элементарного заряда.

К точности и стабильности закона связи частоты с полем предъявляются довольно жёсткие требования, так как отклонение частоты от требуемого закона в процессе синхротронного ускорения приводит к отклонению пучка по радиусу в соответствии с выражением:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = - \frac{1}{(1-n)\beta^2 KF} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \quad (II)$$

где ΔR - отклонение пучка по радиусу, вызываемое отклонением частоты Δf относительно f_0 ,

R_0 - радиус центральной орбиты ускорителя,

n - показатель спада магнитного поля по радиусу,

$$K = 1 + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}, \quad F = 1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L)[n - \beta^2(1-n)]},$$

β - относительная скорость частицы,

L - суммарная длина прямолинейных промежутков.

Из формулы (I) и (II) следует, что при переходе от ускорения

протонов ($\frac{\Lambda}{Z} = 1$) к ускорению ядер ($\frac{\Lambda}{Z} = 2$) частота ускоряющего напряжения изменяется \sim в 2 раза на низких полях (в начале ускорения) и на $\sim 1\%$ при $B = 13$ кГс (в конце цикла ускорения), а отклонение частоты на 0.01% приводит к изменению радиального положения пучка \sim на 6 мм в начале ускорения и \sim на 3 мм в конце.

При разработке аппаратуры новой системы были учтены все недостатки, присущие старой. В частности, устранено влияние каждого элемента аппроксимации на весь последующий характер нелинейной зависимости. В результате этого достигнута простота и оперативность в настройке любого закона как при ускорении протонов, так и при ускорении ядер. Аппаратура оказалась способной формировать нелинейную зависимость на отдельных участках как с возрастающей, так и с уменьшающейся крутизной. Этим самым были сняты какие-либо ограничения на форму модуляционной характеристики задающего генератора, и при настройке синхротронного режима получена возможность ускорения по орбите любого радиуса в пределах рабочей области ускорителя в любой части ускорительного цикла.

Получена высокая стабильность аппаратуры ($10^{-4} + 10^{-5}$), которая практически не зависит от стабильности источников питания и температуры окружающей среды. В сочетании с исполнением аппаратуры на полупроводниковых приборах (1500 транзисторов, 150 интегральных схем, 1000 диодов и 9 радиоламп) это обеспечило высокие эксплуатационные качества системы в целом. Новая аппаратура обеспечивает поддержание радиального положения пучка при магнитных полях выше 5 кГс в пределах ~ 1 мм, что дало возможность отказаться от использования эстафетного перехода частоты с задающего генератора на синтезатор для режимов медленного и быстрого выводов пучка из ускорителя.

5. Вакуум.

На протяжении квартала вакуумная система ускорителя работала безаварийно. Средний вакуум в камере электромагнита

$$\bar{P} = 2.8 \times 10^{-6} \text{ Торр,}$$

что несколько хуже, чем в предыдущие кварталы. Причина - отсутствие нужных уплотняющих манжет штока привода форсистемы.

Вакуум в кожухе резонатора ЛУ-20 поддерживался при постоянной течи в трубке охлаждения резонатора

$$\bar{P} = 6,0 \times 10^{-7} \text{ Торр.}$$

Произведено испытание на газоотделение в вакууме смазочных масел марок: "Литол - 24" и "ЦИАТИМ - 22Г". Оказалось, что каждый грамм смазки "ЦИАТИМ - 22Г", нанесённый тонким слоем на плоскую поверхность, даёт поток газоотделения

$$4.0 \times 10^{-8} \frac{\text{л} \cdot \text{Торр}}{\text{с} \cdot \text{г}}.$$

Смазка "ЦИАТИМ - 22Г" в количествах до 100 г рекомендована для смазывания подшипников качения и скольжения, работающих в вакуумной камере синхрофазотрона.

Измерен спектр остаточных газов в вакуумном объёме агрегата ВА-5, работающего с рассольной ловушкой ($T = -30^{\circ}\text{C}$).

При вакууме 1.8×10^{-6} Торр намерено углеводородов 24%, т.е. 4.35×10^{-7} Торр; при давлении 5.4×10^{-7} Торр получено углеводородов 70%, т.е. $- 3.8 \times 10^{-7}$ Торр.

Л И Т Е Р А Т У Р А

Г. Ю.Д. Безногих и др. ОИЯИ, Б2-9-8775, Дубна, 1975 г.