

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ УСКОРЕНИЯ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ТРУДЫ  
ЧЕТВЕРТОГО ВСЕСОЮЗНОГО  
СОВЕЩАНИЯ  
ПО УСКОРИТЕЛЯМ  
ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ

*(Москва, 18—20 ноября 1974 г.)*

Том II



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1975

## II9. УПРАВЛЕНИЕ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В ИЯФ СО АН СССР ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ

М.Н.Захваткин, М.М.Карлинер, Э.А.Купер, Э.Л.Неханевич, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Ю.И.Ощепков, Г.С.Пискунов, А.В.Проскурин, В.С.Шабанов, Ю.А.Болванов, В.А.Гусев, В.В.Каргальцев, А.В.Леденев  
Институт ядерной физики СО АН СССР

Работы по использованию ЭВМ для систем регистрации результатов физического эксперимента ведутся в ИЯФ СО АН СССР с 1968 года [1]. Однако, применение ЭВМ в целях управления ускорительно-накопительными комплексами началось позже.

В 1971 году было осуществлено управление системой питания электромагнита и линз установки ВЭШ-3 при помощи ЭВМ "Минск-22" [2]. В дальнейшем управление переведено на ЭВМ ODR A-1304 и расширено структурно (управление установками НАП и ГИРОКОН) и функционально (организация системы ввода информации и управление различными системами и режимами работы накопителей) [3].

В 1973 году организовано управление накопителем ВЭШ-2М при помощи УБК М-6000. С 1974 года управление установками ВЭШ-3, НАП и ГИРОКОН производится от индивидуальных ЭВМ ODR A-1325, связанных между собой и с центральным процессором ODR A-1305.

При проектировании системы управления авторы исходили из следующих основных принципов: [4]

1. Многофункциональность системы.
2. Нарастиваемость по функциям, числу датчиков и устройств управления.
3. Возможность работы с большим количеством территориально разнесенных объектов.
4. Высокая надежность и помехозащищенность.
5. Возможность работы с разнотипными датчиками и устройствами.
6. Удобство взаимодействия с оператором.

На рис. I приведена структурная схема системы управления физическими комплексами на основе ЭВМ серии ODR A-1325.

ЭВМ ODR A-1325 выбрана как универсальная, дешевая и надежная ЭВМ третьего поколения. Объем оперативной памяти - 16 к. Среднее быстродействие  $10^4$  арифметических операций в секунду. Стандартный набор периферийных устройств включает: АЦПУ, магнитофоны, барабаны, фотоввод, перфоратор. Матобеспечение с использованием языков PLAN, FORTRAN, ALGOL, COBOL и т.д. Быстродействие знаковых каналов -  $2 \cdot 10^5$  знаков в секунду. К трем знаковым каналам через блоки связи (I) подключены: дисплей типа "Видеотон-340" (VD) или телетайп и коммуникации системы управления.

Блок связи (I) определяет порядок работы всей системы управления. Программа для него задается управляющим словом, которое высылается перед каждым массивом в виде 4-х специально помеченных знаков. Управляющее слово запоминается в регистре блока связи и определяет последовательность операций при передаче или приеме очередного массива информации. Вся передача информации от ЭВМ к объектам и от объектов к ЭВМ осуществляется в последовательном виде, по знакам, в темпе работы стандартного знакового канала ЭВМ. Код самосинхронизирующийся, двухполярный, амплитуда сигнала в линии 12 В. Скорость передачи до 100 килобайт в секунду при тактовой частоте 1 мегабит в секунду.

Линия связи. Принцип передачи кода в последовательном виде по одному кабелю позволяет осуществить надежную экранировку и потенциальную развязку (через трансформаторы) в коммуникациях. При этом резко уменьшается число разъемных соединений, объем и стоимость монтажных работ по сравнению с аналогичными многопроводными системами [5]. Следует отметить, что системы с параллельной передачей кодов в принципе обладают более высоким быстродействием. Однако, при сравнительной оценке нужно учитывать время распространения сигнала по линиям связи в режиме "запрос-ответ" и реальное быстродействие знаковых каналов управляющей ЭВМ. Опыт показывает, что быстродействие систем с последовательной передачей вполне удовлетворяет реальным требованиям по скорости управления и сбору данных для большинства физических установок.

Магистральные станции МС (2) предназначены для подключения периферийных устройств к блоку связи. Очередной знак, сопровождаемый признаком адреса, записывается в адресный регистр станции и подключает выбранный канал коммутатора последовательных кодов КПК (3). Количество каналов определяется разрядностью адреса и в описываемой системе составляет 64. Три модификации признака адреса позволяют подключать МС каскадно для увеличения числа объектов управления. Для выбора адреса в конкретном устройстве (например, канала в АЦП) используется МС без КПК (2\*). Каждый объект управления связан с системой при помощи регистра сдвига для преобразования последовательного кода в параллельный при выводе, либо для передачи параллельного кода от измерителя в ЭВМ в последовательном виде. Во всех объектах управления и магистральных станциях предусмотрен схемный контроль кодов по признаку четности. К любому из каналов системы связи может быть подключено устройство для ввода или вывода информации. Функции канала в системе задаются программой.

Блок прерываний БП (4) предназначен для вызова ЭВМ любым из периферийных объектов. БП состоит из регистра маски и информационного регистра. Каждая конкретная программа задает через систему связи набор каналов (маску), имеющих право привлечь внимание ЭВМ. Определение конкретного устройства, пославшего вызов, происходит после программного анализа состояния информационного регистра

#### Периферийные устройства

Вывод информации из ЭВМ осуществляется на следующие устройства:

1. Цифро-аналоговый преобразователь ЦАП статического типа (5) с разрядной сеткой  $R-2R$ . Погрешность коэффициента деления  $5 \cdot 10^{-5}$ . Число двоичных разрядов 16 [6].

2. Многоканальный ЦАП, состоящий из статического ЦАПа, циркулирующего запоминающего устройства ЗУ и синхронных аналоговых запоминающих устройств в каждом канале. Погрешность  $2 \cdot 10^{-4}$ . Число каналов до 256.

3. ЦАП с широтно-импульсной модуляцией. Погрешность до  $10^{-5}$ . Дискретность  $10^{-5}$ . Число каналов, управляемых от одного блока - 16.

4. Преобразователи типа код - временной интервал. Диапазон задержки от 0,1 до  $10^4$  мксек.

5. Командные коммутирующие регистры (6). Число коммутируемых объектов - 12. Выход потенциально развязан при помощи реле или оптоэлектронных приборов.

6. Буферные запоминающие устройства ЗУ (7). Объем ЗУ - 64 слова по 24 разряда. Время записи (считывания) -  $0,5 \cdot 10^{-6}$  сек.

Ввод информации в ЭВМ осуществляется от следующих устройств:

7. Аналого-цифровой преобразователь интегрирующего типа (8). Погрешность  $10^{-4}$ . Шкала -  $4 \cdot 10^4$ . Автоматическое переключение диапазонов. Разрешающая способность 1 мкВ, время измерения  $40 \cdot 10^{-3}$  сек. С аналоговым коммутатором (9) на 64 точки.

8. Широкодиапазонный аналого-цифровой преобразователь поразрядного взвешивания

вания (I0). Погрешность  $2 \cdot 10^{-4}$ . Диапазон измеряемых напряжений ( $200 \cdot 10^{-6} + 5$ )В. Время измерения  $200 \cdot 10^{-6}$ сек. С аналоговым коммутатором на 64 точки [7].

9. Измеритель мгновенного значения импульсных сигналов (II). Погрешность  $10^{-4}$ . Апертурное время  $10 \cdot 10^{-9}$ сек. Число каналов - 16.

10. Измеритель амплитуды одиночного импульса наносекундного диапазона (I2). Погрешность  $10^{-2}$ . Число каналов в приборе - 4.

II. Многопозиционные датчики состояния объектов (I3). Число контролируемых позиций типа "включено-выключено" - I2.

I2. Стандартные цифровые измерительные приборы различных типов с индивидуальными и групповыми (I4) передатчиками для включения в систему связи.

Разработаны и подготавливаются для включения на накопительные комплексы ВЭПП-2, ВЭПП-3, ВЭПП-4, НАП и плазменные установки следующие устройства ввода данных:

1. Измеритель положения и заряда пучка в канале с проволочными датчиками - 32 точки по двум координатам. Погрешность преобразования - не хуже  $5 \cdot 10^{-3}$ .

2. Измеритель временных интервалов наносекундного диапазона. Разрешение  $0,5 \cdot 10^{-9}$ сек. Полная шкала  $5 \cdot 10^{-6}$ сек. Число каналов в приборе - 8.

3. Компактный АЦП на БИС. Погрешность -  $10^{-3}$ . Число разрядов I0. Время измерения  $10 \cdot 10^{-6}$ сек.

4. Быстродействующий АЦП. Время одного измерения -  $50 \cdot 10^{-9}$ сек. Погрешность  $5 \cdot 10^{-3}$ . Число разрядов 8. Разрешение -  $10^{-3}$ В.

На рис.2 приведена структурная схема системы управления комплексом ВЭПП-2М на базе УВК М-6000. Используется минимальная конфигурация, состоящая из ОЗУ на 8К, телетайпа (т/т), фотоввода (ФС-1500), дополненная дисплеем "Видеотон - 340" (VD).

Управление системой осуществляется автоматически и по директивам оператора.

Особенностью системы является использование специально разработанного канала чтения из памяти (КЧП). КЧП подключается к одному из канальных разъемов и позволяет использовать некоторую область ОЗУ в качестве циркулирующей памяти для ЦАПов (см.п.2. Периферийные устройства). Максимальное время цикла чтения слова по каналу КЧП составляет около 7,5 мксек. Применение КЧП позволило осуществить принцип непрерывной циркуляции также и при остановке ЭВМ, что невозможно осуществить с помощью программного канала и канала прямого доступа в память (КЦДП).

К трем программным каналам, через дуплекс-регистры (ДР) подключены следующие устройства ввода:

1. Интегрирующий цифровой вольтметр (инт ЦВ) с коммутатором (К) на 16 каналов (см.п.8. Периферийные устройства). Информация этого канала используется для управления объектом через КЧП.

2. Измеритель наносекундных временных интервалов (ИВН) (I0 каналов). Информация в ЭВМ вводится по запросу измерительной аппаратуры. Этот канал используется также для таймирования управляющей программы.

3. Через специальный коммутатор:

цифровой вольтметр (ЦВ) Ц-1412 (96 каналов);

измеритель параметров пучка (ИПП) (24 канала);

измеритель мгновенного значения поля в импульсных магнитных элементах (ИИВ) (4 канала).

Информация по этому каналу вводится в ЭВМ только по директиве оператора.

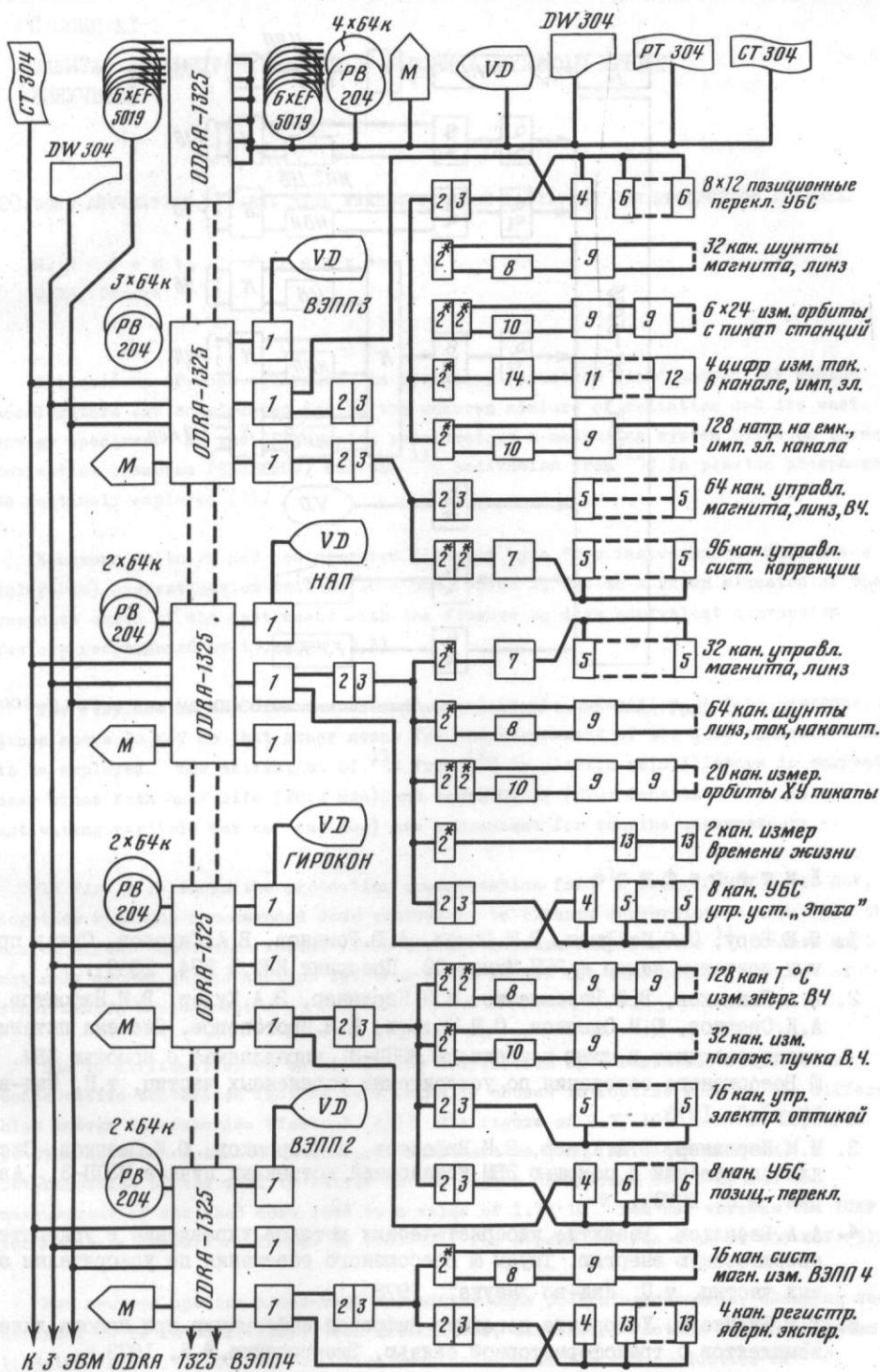


Рис. 1. Структурная схема системы управления физическими комплексами на основе ЭВМ серии ODRR-1325

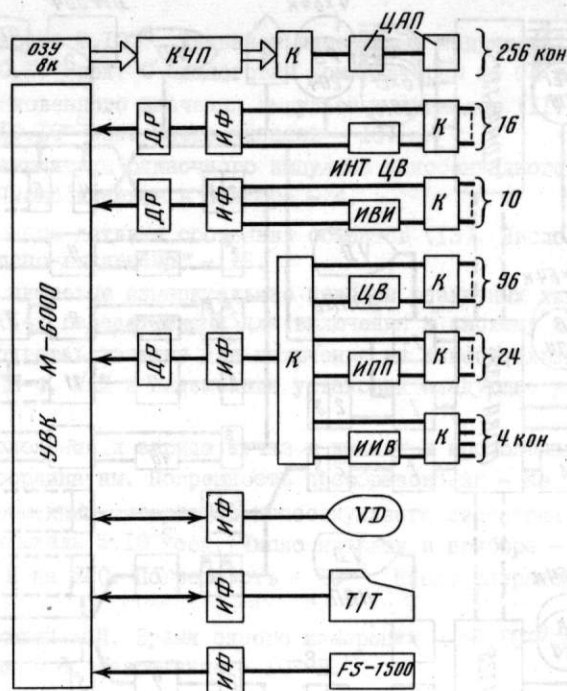


Рис. 2. Структурная схема системы управления комплексом ВЭПП-2М на базе УВК М-6000

### Л и т е р а т у р а

1. С.Е.Бару, О.С.Койфман, В.М.Попов, А.В.Романов, В.А.Сидоров. Связь проволочных искровых камер с ЭВМ Минск-22. Препринт ИЯФ, № 294, 1969.
2. Б.А.Баклаков, В.Ф.Веремеенко, М.М.Карлинер, Э.А.Купер, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Ю.И.Ощепков, С.П.Петров, И.Я.Протопопов. Система питания электромагнита и линз накопителя ВЭПП-3, управляемая с помощью ЭВМ. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, Изд-во "Наука", 1973.
3. М.М.Карлинер, Э.А.Купер, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Ю.И.Ощепков. Система для управления с помощью ЭВМ установкой встречных пучков ВЭПП-3. Автометрия, № 2, 1972.
4. А.А.Васильев. Развитие кибернетических методов управления в ускорителях на сверхвысокую энергию. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, Изд-во "Наука", 1973.
5. Т.Р.Блейкли. Ускорение передачи цифровой информации при помощи линейных комплектов с трансформаторной связью. Электроника, № 5, 1973.
6. М.М.Карлинер, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков. Прецизионный цифроаналоговый преобразователь. Автометрия, № 2, 1972.
7. Ю.А.Болванов, Э.А.Купер, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков. Многоканальная широкодиапазонная измерительная система для ввода данных в ЭВМ. Автометрия, № 3, 1974.

#### 144. КИНЕТИКА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Г.И. Будкер, Я.С. Дербенев, Н.С. Диканский,  
В.В. Пархомчук, Л.В. Пестриков, А.Н. Скринский  
Институт ядерной физики СО АН СССР

Для получения больших светимостей в накопителях тяжелых частиц необходимы высокие плотности сталкивающихся пучков. Практическое отсутствие синхротронного излучения у тяжелых частиц требует разработки других способов демпфирования колебаний частиц в накопителях.

В 1966 году Г.И.Будкером [1] был предложен метод электронного охлаждения, основанный на передаче тепловой энергии пучка тяжелых частиц сопутствующему электронному потоку с более низкой температурой. Для этого на отрезке орбиты накопителя создается электронный пучок со средней скоростью, совпадающей с продольной скоростью накапливаемых частиц (протонов; антипротонов). За счет столкновений частиц с электронами тепловая энергия протонов передается электронному пучку, что приводит к уменьшению размеров пучка накапливаемых частиц. При высоких энергиях протонов (несколько ГэВ и выше) в качестве электронного потока может быть использован пучок, циркулирующий в электронном накопителе. При низких энергиях разумно использовать электронный поток с рекуперацией энергии; затрачиваемой на ускорение электронов. Последняя система создана в институте для проверки принципов электронного охлаждения.

Кинетику процесса можно исследовать на основе интеграла столкновений Ландау, принимая во внимание специфику движения частиц в накопителях и возможные отклонения состояния электронного потока от термодинамически равновесного [2]. В результате столкновений на протон действует сила трения (в сопровождающей системе пучка протонов):

$$\vec{F}(\vec{r}, \vec{v}) = -\frac{4\pi e^4 L}{m} \int d\vec{v}' \frac{(\vec{v} - \vec{v}') f_e(\vec{r}, \vec{v}')}{|\vec{v} - \vec{v}'|^3}, \quad (1)$$

где  $f_e(\vec{r}, \vec{v})$  - плотность электронов в фазовом пространстве скорость-координата в сопровождающей системе;  $e$  и  $m$  - заряд и масса электрона;  $L$  - кулоновский логарифм ( $L \approx 20$ ). Диффузия на электронах существенна лишь вблизи теплового равновесия пучков.

При скоростях протонов, существенно меньших тепловых скоростей электронов  $|\vec{v}| \ll v_T^e$ ; сила трения линейно зависит от  $\vec{v}$ . При больших скоростях протонов сила трения падает как  $1/v^2$ . В линейном приближении  $|\vec{v}| \ll v_T^e$  декременты колебаний частиц (отнесенные к лабораторной системе); могут быть записаны в виде [2]:

$$\begin{aligned} \lambda_r &= -\frac{1}{2\gamma M} \left\langle \frac{\partial F_r}{\partial v_r} - \gamma \frac{d\Psi}{d\theta} \frac{\partial F_\theta}{\partial v_r} - \frac{R_0 \Psi}{v_s} \frac{\partial F_\theta}{\partial r} \right\rangle, \\ \lambda_\theta &= -\frac{1}{2\gamma M} \left\langle \frac{\partial F_\theta}{\partial v_\theta} + \gamma \frac{d\Psi}{d\theta} \frac{\partial F_r}{\partial v_\theta} + \frac{R_0 \Psi}{v_s} \frac{\partial F_r}{\partial r} \right\rangle, \\ \lambda_z &= -\frac{1}{2\gamma M} \left\langle \frac{\partial F_z}{\partial v_z} \right\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $2\pi R_0$  - периметр орбиты накопителя;  $v_s$  - скорость протонов в лабораторной системе;  $\gamma = 1/\sqrt{1-v_s^2/c^2}$ ,  $c$  - скорость света;  $\Psi = \Psi(\theta)$  вынужденное решение уравнения:

$$\frac{d^2 \Psi}{d\theta^2} + \frac{R_0}{R^2(\theta)} (1 - n(\theta)) \Psi = \frac{R_0}{R(\theta)},$$

$\theta$  - азимут;  $n$  - показатель спада ведущего поля; скобки  $\langle \rangle$  - означают усреднение вдоль орбиты.

Для термодинамически равновесного распределения электронов из (1), (2):

$$\lambda_r = \lambda_\theta = \lambda_z = \lambda = \frac{8\pi^2 e^4 L}{3\gamma m M} \overline{f_e(0)} \approx \frac{8\pi^2 e^4 L}{3\gamma m M} n_0 \left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{3/2}, \quad (3)$$

где  $n_0$  - плотность пучка в лабораторной системе.

Сумма декрементов из (2), равная дивергенции силы трения по скоростям

$$\lambda_r + \lambda_\theta + \lambda_z = -\frac{1}{2\gamma M} \operatorname{div}_V \vec{F}(\vec{r}, \vec{V}) = \frac{8\pi^2 e^4 L}{\gamma m M} \overline{f_e(0)} \quad (4)$$

не зависит от связи колебаний по парциальным степеням свободы. Из инвариантности суммы декрементов по отношению к введению связей следует, что наличие радиальной неоднородности в распределении электронов в пространстве, либо распределении электронов по скоростям приводит лишь к перераспределению декрементов радиальных и продольных колебаний. Поэтому увеличение за счет связи декремента затухания по одной из степеней свободы ограничивается возможностью появления антитухания по другой степени свободы.

Значения декрементов и в целом процесс затухания чувствительны и к виду распределения электронов по скоростям.

Рассмотрим, например, ситуацию, когда распределение электронов в пучке пространственно однородно, но сдвинуто по скорости в направлении одного из нормальных колебаний на величину  $\Delta$ . При  $\Delta \ll V_T^e$  процесс релаксации остается близким к оптимальному. Если же  $\Delta > V_T^e$ , то характеристика трения для малых колебаний становится отрицательной. Качественное исследование с выходом за линейную область показывает, что при этом происходит раскачка до амплитуды  $V \sim \Delta$ , т.е. выравниваются не температуры, а квадраты скоростей. Для остальных степеней свободы смещение средней скорости эквивалентно увеличению теплового разброса электронов до величины  $\Delta$ .

На рис.1 и 2 приведены результаты численного расчета декрементов для максвелловского распределения электронов по скоростям, отвечающего угловому разбросу  $\theta_e = 3 \cdot 10^{-3}$ . Пространственное распределение электронов было выбрано гауссовым с шириной  $r_r^e = r_z^e = 0.5$  см, плотность тока электронов  $I$  А/см<sup>2</sup>, энергия протонов 150 МэВ; длина участка охлаждения 1 м. Данные относятся к экспериментальной установке НАП-М (см. [4]). На рис.1 - кривая 1 изображает декремент аксиальных колебаний, как функцию амплитуды при совпадении средних скоростей электронного и протонного пучков. При угле пересечения пучков  $\theta_z \approx 3.75 \cdot 10^{-3}$  в области малых амплитуд декремент становится отрицательным. Раскачка колебаний происходит до амплитуд, соответствующих пересечению кривых  $\lambda_z(a)$  с осью абсцисс и зависит от угла ошибки  $\theta_z$ . Максимальный инкремент неустойчивости достигается при  $\theta_z = 6 \cdot 10^{-3}$  при дальнейшем увеличении угла ошибки инкремент неустойчивости уменьшается (кривая 6).

На рис.2 изображена зависимость декремента аксиальных колебаний от амплитуды при различных углах ошибки в радиальном направлении ( $\theta_r$ ). Видно монотонное убывание максимального декремента без изменения знака.

Наличие различных диффузионных процессов, таких как рассеяние на электронном пучке, рассеяние на остаточном газе и на когерентных флуктуациях приводит к установлению размера пучка, равного

$$a_i^2 = \frac{D_i}{2\lambda_i}, \quad (5)$$

где  $D_i$  - коэффициент диффузии, а  $\lambda_i$  - декремент затухания по данной степени свободы. При наличии только первого из перечисленных механизмов затухание идет до полного выравнивания температуры электронов и протонов, при этом угловой и



относительный энергетический разброс протонов есть

$$\theta_p^2 = \frac{m}{M} \theta_e^2. \quad (6)$$

Для получения максимальной плотности протонов необходимо, чтобы диффузия на остаточном газе была слабее диффузии на электронном пучке.

Если установившийся размер протонного пучка  $\alpha_c^2$  мал по сравнению с апертурой, то время жизни пучка, в основном, определяется однократными процессами. Зависимость времени жизни от величины декремента затухания, полученная численным моделированием, приведена на рис.3. Видно, что при времени затухания, меньшем времени жизни, определяемом многократным рассеянием, время жизни частиц увеличивается в пять раз.

Декременты затухания линейно растут с увеличением плотности электронного пучка. Наиболее очевидное ограничение на плотность электронного тока связано с искажением фокусирующих свойств накопителя полем электронного пучка:

$$j_{кр} < 2\nu(\Delta\nu)_{зон} e c \frac{\beta^3 r^3}{\ell R_0 \Gamma_p}, \quad (7)$$

где  $\beta = v/c$ ,  $\ell$  - длина области взаимодействия,  $r_p = e^2/Mc^2$  - классический радиус частицы,  $(\Delta\nu)_{зон}$  - расстояние до опасного резонанса.

Для установки НАП-М, описанной в 4, формула (7) дает (при  $\Delta\nu = 0.01$  и  $\beta = 0.35$ )

$$j_{кр} < 0,5 \text{ А/см}^2.$$

Этот эффект существенен для амплитуд протонов, больших или порядка размера электронного пучка, когда он приводит к образованию паразитных орбит. Увеличение размера электронного пучка уменьшает роль нелинейных резонансов.

Дополнительные ограничения могут быть связаны с когерентным взаимодействием пучков, а также с другими побочными явлениями.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, АЭ, 22, 346 (1967).
2. Я.С.Дербенев, А.Н.Скринский. Кинетика электронного охлаждения пучков в накопителях тяжелых частиц, Институт ядерной физики, Новосибирск, препринт 255 (1968).
3. Б.А.Трубников. В сб. "Вопросы теории плазмы", вып. I. Атомиздат, стр.98 (1963).
4. В.В.Анашин, Г.И.Будкер и др. Наст. сб., доклад I45.

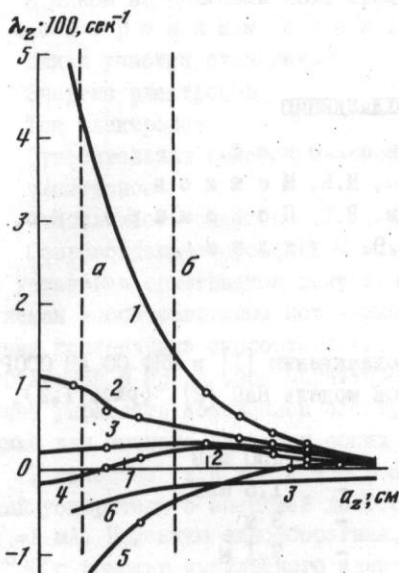


Рис. 1. Декремент аксиальных колебаний, в зависимости от амплитуды аксиальных колебаний и угла ошибки по вертикали  $\theta_z$   
 1 -  $\theta_z = 0,0$ ; 2 -  $\theta_z = 0,003$ ; 3 -  $\theta_z = 0,0035$ ; 4 -  $\theta_z = 0,00375$ ; 5 -  $\theta_z = 0,006$ ; 6 -  $\theta_z = 0,011$ . Кинетическая энергия протонов 150 МэВ, угловой разброс электронов  $\theta_e = 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $r_r^e = 0,5$  см,  $r_z^e = 0,5$  см, радиальный угол ошибки  $\theta_r = 0$

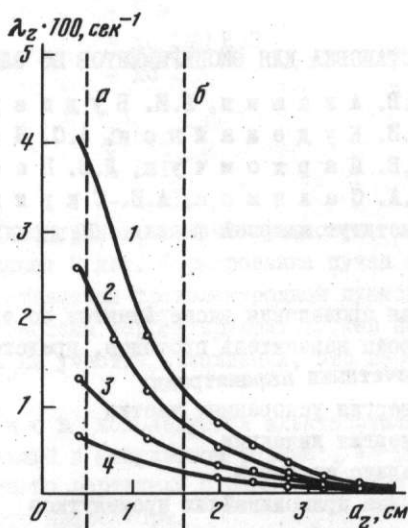


Рис. 2. Декремент аксиальных колебаний в зависимости от амплитуды аксиальных колебаний и радиального угла ошибки  $\theta_r$   
 1 -  $\theta_r = 0,002$ ; 2 -  $\theta_r = 0,0004$ ; 3 -  $\theta_r = 0,006$ ; 4 -  $\theta_r = 0,008$ . Вертикальный угол ошибки  $\theta_z = 0$ . Остальные значения те же, что и на рис. 1

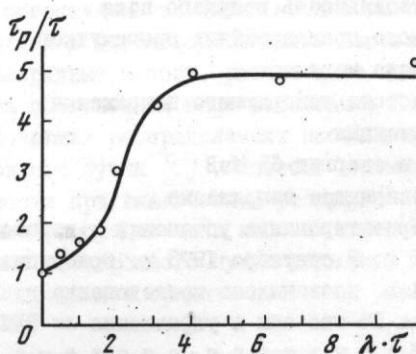


Рис. 3. Время жизни протонного пучка  $\tau_p$  в единицах времени жизни без затухания  $\tau_{MM}$  от декремента затухания  $\lambda$

#### 145. УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

В.В. Анашин, Г.И. Будкер, Н.С. Диканский,  
 В.И. Куделайнен, А.С. Медведко, И.Н. Мешков,  
 В.В. Пархомчук, Д.В. Пестриков, В.Г. Пономаренко,  
 Р.А. Салимов, А.Н. Скринский, Б.Н. Сухина  
 Институт ядерной физики СО АН СССР

Для проведения экспериментов по электронному охлаждению [1] в ИЯФ СО АН СССР построен накопитель протонов, представляющий собой модель НАП [2] (рис. 1,2), с расчетными параметрами:

Энергия ускоренных частиц	- до 150 МэВ
Энергия инжекции	- 1,5 МэВ
Радиус кривизны	- 3 м
Длина прямолинейных промежутков	- 7.1 м
Частота бетатронных колебаний	$Q_z$ - 1.4
	$Q_r$ - 1.2
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	$\alpha$ - 0.8
Критическая энергия	- 110 МэВ
Апертура в поворотных магнитах	$\Delta Z$ - 7 см
	$\Delta \Gamma$ - 10 см
Стабильность ведущего поля	$\Delta B/B$ - $1 \cdot 10^{-4}$
Число прямолинейных промежутков	- 4
Число магнитов	- 4
Частота ускоряющего напряжения:	
Инжекция	- 0.36 МГц
При энергии 65 МэВ	- 2.23 МГц
Ускоряющее напряжение	- 10 В

Проектирование установки и изготовление отдельных узлов было начато в ноябре 1971 г. В сентябре 1973 г. приступили к работе с циркулирующим пучком. До апреля 1974 г. проводилось исследование пучка протонов, характеристик накопителя, отработка ВЧ-системы и управления от ЭВМ. В мае 1974 г. начаты работы с двумя пучками.

Магнитная система накопителя содержит 4 поворотных магнита с нулевым градиентом и краевой фокусировкой (с геометрическим углом среза  $tg \theta = 0.579$ ) и восемь корректирующих элементов, расположенных на концах прямолинейных промежутков. Магниты нешихтованные выполнены из железа АРМКО и имеют 0-образный профиль. Питание магнитов осуществляется генератором постоянного тока с системой стабилизации, обеспечивающей стабильность поля не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$  в рабочем диапазоне 0.5 - 6 кА. Одновременно система стабилизации служит для управления магнитным полем (по опорному напряжению).

Корректирующие элементы содержат дипольные, квадрупольные и секступольные обмотки. Квадрупольные обмотки позволяют перестраивать частоты бетатронных колебаний в пределах  $\pm 0.05$  во всем диапазоне изменения ведущего поля. Дипольные обмотки создают корректирующие поля до 100 Гс, что позволяет производить  $\Gamma$ -Z коррекции орбиты. Кроме корректирующих элементов на энергии инжекции для коррекции орбиты служат витки, позволяющие изменять ведущее поле независимо в квадрантах в пределах  $\pm 10^{-3}$ .

В одном из прямолинейных промежутков расположена установка с электронным пучком, описанная в [3] /:

Длина участка охлаждения	- 1 м
Энергия электронов	- до 100 КэВ
Ток электронов	- до 1 А
Относительная поперечная скорость электронов	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
Стабильность энергии	- $1 \cdot 10^{-4}$
Сопровождающее продольное магнитное поле	- 1 кГс

В установке применяется рекуперация энергии электронов, так что мощность, потребляемая высоковольтными источниками, не превышает 2 квт. Формирование пучка с малыми поперечными скоростями электронов осуществляется трехэлектродной пушкой, погруженной в продольное магнитное поле [4]. Система корректирующих витков позволяет управлять положением электронного пучка на участке охлаждения, что необходимо для точного сведения обоих пучков.

В качестве инжектора протонов используется электростатический ускоритель с энергией до 1.5 МэВ, работающий в импульсном режиме:  $\tau = 4$  мксек,  $I = 1$  мА. Инжекция однооборотная, выпуск частиц по вертикали с отклонением на угол  $3^{\circ}30'$  с помощью импульсного электростатического инфлектора.

Прогревная вакуумная камера выполнена из нержавеющей стали. Конструкция позволяет производить прогрев камеры без разборки магнитов. Температура прогрева до  $300^{\circ}\text{C}$ . Откачка производится десятью магниторазрядными насосами с производительностью 300 л/сек и сорбционными насосами с титановыми испарителями, обеспечивающими вакуум в основной части накопителя  $5 \cdot 10^{-11}$  торр. Инжектор, в ускорительной трубке которого давление порядка  $10^{-6}$  торр, соединяется с накопителем каналом, в котором осуществлена дифференциальная откачка, обеспечивающая перепад давления на четыре порядка.

Вакуум в установке с электронным пучком обеспечивается двумя магниторазрядными насосами производительностью 150 и 300 л/сек и двумя сорбционными насосами. Кроме того, имеются распределенные магниторазрядные насосы, размещенные вдоль электроннооптического тракта и работающие на собственном поле установки. К сожалению, включение электронного пучка при работающих распределенных насосах приводит, как выяснилось, к быстрой гибели протонного пучка [5]. Поэтому эксперименты по электронному охлаждению приходилось вести при выключенных распределенных насосах. Без электронного пучка и выключенных распределенных насосов давление в месте встречи порядка  $1 + 2 \cdot 10^{-8}$  торр. Введение электронного пучка ухудшает вакуум в месте встречи, примерно, на порядок, что определяет среднее по кольцу значение вакуума около  $2 \cdot 10^{-9}$  торр.

Ускоряющая система накопителя включает задающий генератор, усилитель мощности и резонатор. Блок-схема В.Ч. системы приведена на рис. 3. Задающим элементом для линейной перестройки генератора служит датчик Холла ( $B(t)$ ). Для компенсации запаздывания его сигнала в цепях управления используется напряжение с витка ( $B(t)$ ). Точная подстройка частоты осуществляется по координате пучка. Цепь обратной связи через дифференциальный пикап-электрод содержит интегрирующий усилитель и обеспечивает подавление "ошибки" в координате  $k \approx 16000$  раз на нулевой частоте и в  $k \approx 40$  раз на частотах  $1 + 50$  Гц. Быстрая фазовая подстройка частоты производится по второй цепи обратной связи через интегральный пикап-электрод. Использование обратной связи снижает требования на уровень шумов и пульсаций магнитного поля и В.Ч. системы в  $k$  раз. Система обратной связи удовлетворительно работает при токах больше 30 мкА на энергии инжекции.

Управление рабочим циклом производится от ЭВМ "Одра-1304". Рабочий цикл выглядит следующим образом. В нарастающее магнитное поле инжектируются протоны. Момент инжекции синхронизируется по уровню поля от датчика

ЯМР с точностью  $\Delta B/B \approx 10^{-4}$ . Закон нарастания токов в магнитах и корректирующих элементах определяется командами от ЭВМ и задается таблицей, заранее введенной в оперативную память машины. При выходе поля на плато выключается ВЧ, включается продольное магнитное поле и быстрый (электронный) подогрев катода пучки в установке с электронным пучком; начинается процесс охлаждения. В это время ЭВМ используется для обработки результатов эксперимента.

Обычно время ускорения до энергии порядка 100 Мэв составляет около 30 сек, причём скорость нарастания поля увеличивается вдвое по мере набора энергии протонами. Начальная скорость нарастания — 150 Гс/сек ограничена, по-видимому, запаздыванием поля от тока из-за индукционных процессов в железе. Измерения показали, что запаздывание меняется с производной поля как  $\Delta B(\text{Гс}) \approx 4 \cdot 10^{-2} \dot{B} (\text{Гс/сек})$ .

Контроль положения пучка производится десятками апертурными пробниками и восемью пикап-станциями. Апертурные пробники используются одновременно для наблюдения за размерами и положением пучка на первом обороте — для этого они снабжены пластинами с люминесцентным покрытием. Наблюдение осуществляется дистанционно с помощью телевизионных камер. Пикап-станции объединены общей электронной системой обработки информации с выводом профиля орбиты на экран осциллографа.

Для измерения поперечных размеров ускоренного (охлажденного) пучка применяется метод, связанный с гибелью частиц. Радиальный размер измеряется апертурным пробником, пересекающим протонный пучок, при этом рассеянные на его краю протоны регистрируются сцинтилляционным счетчиком, расположенном на другом конце промежутка ([5], рис.4). Вертикальный размер измеряется апертурным пробником с помещенным на конце сцинтилляционным счетчиком, пересекающим протонный пучок по вертикали. Сигнал со счетчика позволяет оценить размеры и положение центра тяжести пучка. В настоящее время метод улучшен: подготавливается устройство, производящее пересечение пучка кварцевой нитью диаметром 1 мкм со скоростью около 7 м/сек.

Процесс охлаждения сопровождается образованием нейтральных атомов водорода вследствие рекомбинации протонов и электронов во взаимодействующих пучках. Эти атомы ("нейтралы"), имеющие энергию протонов, выводятся через специальное окно в вакуумной камере (толщина стенки 0.2 мм) и регистрируются телескопом из сцинтилляционных и гейгеровских счетчиков. Этот метод используется для настройки режима охлаждения [5]. Для измерения пространственного распределения нейтралов гейгеровские счетчики заменяются пропорциональной камерой.

Измерение тока протонов осуществляется несколькими способами: поясом Роговского, интегральным пикап-электродом, магнетометром, а также по сбросу пучка на пластину-пробник.

Параметры магнитной системы исследовались по поведению пучка в накопителе. Измерения бетатронных частот известным методом резонансной раскачки дали в оптимуме по времени жизни значения  $Q_r = 1.3$ ,  $Q_z = 1.23$ ; измерения  $(\partial r / \partial \omega_z)_B$  и  $(\partial \omega_z / \partial B)_E$  позволили определить значение  $\alpha = 0.8$ , что соответствует критической энергии 110 Мэв. Неожиданно большой оказалась связь радиальных и вертикальных бетатронных колебаний.

Были получены время жизни пучка протонов (при выключенной ВЧ-системе) до 7 сек на энергии инжекции и до 600 сек на энергии 65 Мэв, ток протонов — до 120 мкА ( $3 \cdot 10^8$  частиц), что позволило приступить к экспериментам по электронному охлаждению.

## Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, Я.С.Дербенёв, М.С.Диканский, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский. *Наст. сб., доклад I44.*
2. VAPP-NAP Group, Proc. of the VIII Intern. Conference on High Energy Accel., CERN, Geneva, 1971, p. 72.
3. Г.И.Будкер, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.Г.Пономаренко, С.Г.Попов, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, Б.М.Смирнов. *Труды второго всесоюзного сов.по уск.заряж. частиц*, т.1. "Наука", 1972, стр.31.
4. В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, Р.А.Салимов. *ЖТФ*, 1971, 41, 2294.
5. Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен и др. *Наст. сб., доклад I46.*

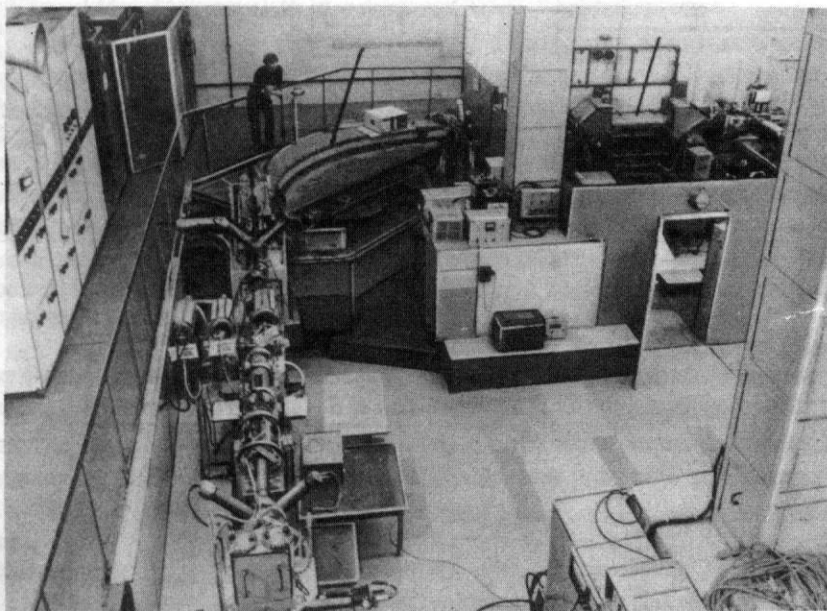


Рис. 1. Общий вид накопителя протонов НАП-М

1 - магниты; 2 - установка с электронным пучком; 3 - корректирующий магнит; 4 - пробник со сцинтилляционным счетчиком; 5 - магниевая струя; 6 - вакуумные клапаны; 7 - магнитометр; 8 - резонатор; 9 - дефлектор; 10 - инфлектор; 11 - впускной магнит; 12 - пикап-станция; 13 - линза-октуполь; 14 - квадрупольная линза; 15 - телекамера; 16 - апертурный пробник; 17 - канал инъекции; 18 - пояс Роговского; 19 - геодезический знак; 20 - счетчики нейтронов

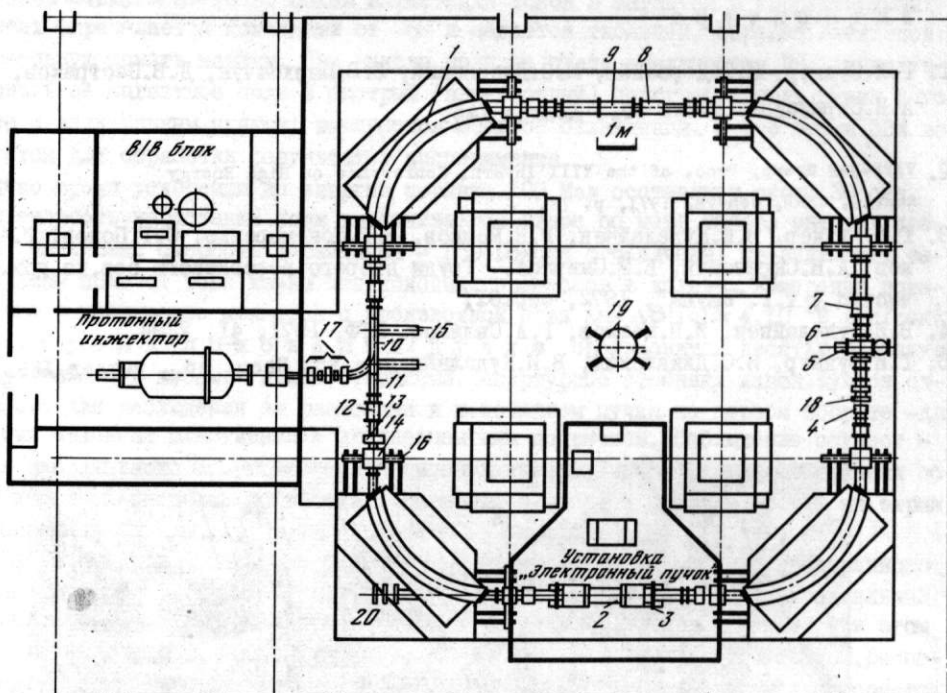


Рис. 2. Схема накопителя протонов НАИР-М  
Обозначения те же, что и на рис. 1

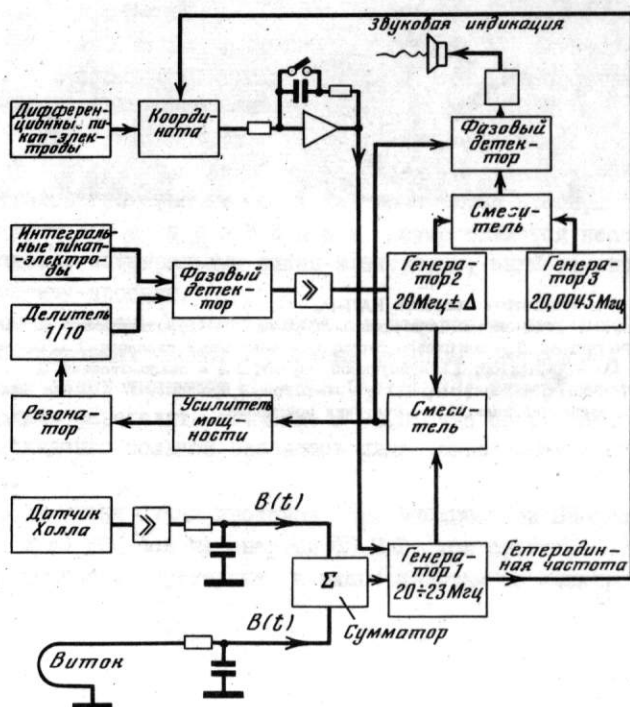


Рис. 3. Блок-схема ВЧ-системы

#### 146. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

Г.И. Будкер, Н.С. Диканский, В.И. Куделайнен,  
И.Н. Мешков, В.В. Пархомчук, Д.В. Пестриков,  
А.Н. Скринский, Б.Н. Сухина  
Институт ядерной физики СО АН СССР

Первая серия экспериментов по электронному охлаждению (май-июнь 1974 г.) проводилась при энергии протонов 65 МэВ, электронов - около 35 КэВ на установке, описанной в работе [1]. Основные результаты состоят в следующем: при сведении скоростей протонов и электронов с точностью  $\lesssim 10^{-3}$  наблюдается увеличение времени жизни протонов  $\tau_p$ , затухание бетатронных колебаний, уменьшение энергетического разброса в протонном пучке и увлечение (ускорение или замедление) протонов электронами. При разведении скоростей до  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$  перечисленные эффекты исчезают.

В этих экспериментах после ускорения до заданной энергии ускоряющее напряжение выключалось, и протоны свободно циркулировали в постоянном магнитном поле. После этого включалась установка с электронным пучком. Сведение пучков в пространстве и по скоростям, необходимое для оптимального демпфирования [2], производилось по настройке на максимум выхода атомов водорода (нейтралов), образующихся при рекомбинации во взаимодействующих пучках (рис. 1, а).

1. Времени жизни протонов измерялось как функция энергии протонов при постоянной энергии электронов (рис. 1, б) и как функция энергии электронов при фиксированной энергии протонов. (В обоих случаях под энергией протонов понимается их энергия в конце цикла ускорения). Обе зависимости имеют резонансный характер с максимумом вблизи равенства средних скоростей частиц и полушириной  $\Delta E/E \approx \pm 8 \cdot 10^{-4}$ . За время жизни принималось время уменьшения тока протонов в  $e$  раз.

Зависимость тока протонов  $\mathcal{J}$  от времени (рис. 2) имеет характерное плато (кривая 1), которое исчезает в режиме охлаждения (кривая 2), так что остается только экспоненциальный спад. При сильном разведении средних скоростей зависимость тока от времени вновь приобретает участок с плато, тогда как  $\tau_p$  уменьшается.

Присутствие острого максимума на кривой  $\tau_p(E)$  и исчезновение плато на кривой  $\mathcal{J}(t)$  можно объяснить подавлением многократного рассеяния протонов на остаточном газе; в результате чего исчезает диффузное расширение пучка. При этом время жизни определяется однократным рассеянием, что дает увеличение  $\tau_p$  примерно в 5 раз [2].

2. Подавление диффузного расширения подтверждается прямыми измерениями вертикального размера (рис. 3). Измерения проводились с помощью сцинтилляционного счетчика, который пересекал протонный пучок со скоростью 0,3 см/сек [1]. Измерения показали, что без электронного пучка квадрат вертикального размера линейно растет со временем (прямая 4), а в присутствии электронного пучка квадрат вертикального размера в пределах разрешения остается постоянным (прямая 1). Пучок, принудительно расширенный с помощью внешней раскочки, уменьшает свои размеры до установившегося значения  $\Delta Z \approx 5$  мм (точки 2, 3). Размеры протонного пучка контролировались сбросом пучка на пробник с лимнофором. Визуальные наблюдения дали качественное согласие с этими измерениями:  $\Delta Z \approx 4$  мм.

3. Измерение радиального положения протонов апертурными пробниками показало, что положение охлажденного протонного пучка (при заданной



энергии протонов в начале охлаждения) зависит от энергии электронов. На осциллограммах (рис.4) показана зависимость интенсивности рассеянных протонов от положения радиального пробника, пересекающего пучок. Наглядно видно радиальное смещение протонного пучка при различных энергиях электронов. Нижняя осциллограмма демонстрирует частичное увлечение протонов при быстром изменении энергии электронов. Полученная зависимость радиального положения протонного пучка от энергии электронов приведена на рис.5. Радиальное смещение при постоянном ведущем поле и выключенном ускоряющем напряжении соответствует изменению энергии протонов. Видно, что внутри электронного пучка радиальное смещение протонов линейно зависит от отстройки энергии электронов и согласуется с известным значением  $\Psi \approx 0.8$  ( $\Psi = d\theta r / d\theta p$ ). Этот результат стимулировал попытку произвести ускорение протонов электронным пучком. Для этого после включения режима охлаждения энергия электронов  $E_e$  и магнитное поле накопителя в медленно увеличивались согласованным образом (управление от ЭВМ), так что орбита протонов не сдвигалась. Как и следовало ожидать, приращение энергии, максимально достижимое в цикле такого ускорения, зависит от отношения  $(\dot{E}_e/E_e)/(\dot{B}/B)$ , причем в оптимальное время ускорения до  $\Delta E_p/E_p = 1,2\%$  составляло 200 сек, что дает  $dE_p/dt \approx 4$  КэВ/сек. Если принять, что при таком ускорении пучки не могут разойтись больше, чем на полуразмер электронного пучка, то можно оценить характерное время уменьшения энергетического разброса протонов  $\tau_E$ :

$$\frac{d\Delta E}{dt} \approx \frac{\Delta E_p}{\tau_E} \approx \frac{2E_p}{\tau_E} \Psi^{-1} \frac{\Delta r}{r},$$

что дает  $\tau_E \approx 20$  сек.

Заметим, что характер кривой выхода нейтралов (рис.1,а) также можно объяснить эффектом увлечения протонов электронным пучком в постоянном магнитном поле накопителя. Два минимума, сопровождающие острый пик, возникает вследствие подстройки средней скорости протонов к средней скорости электронов и выхода протонов из электронного пучка по радиусу. При большой отстройке скоростей эффект увлечения исчезает, и протонный пучок остается внутри электронного. Коэффициент рекомбинации в оптимальном подстройке по скоростям равен  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-13}$  см<sup>3</sup>/сек.

Время затухания бетатронных колебаний можно оценить из сравнения скорости диффузии (рис.3 прямая 4) с установившимся размером (прямая 1)

$$\tau_{\text{бет}} = \frac{2a_0^2}{da^2/dt} \approx 17 \pm 4 \text{ сек.}$$

Из декремента бетатронных колебаний, предполагая максвелловское распределение электронов по скоростям, можно оценить температуру  $T_e$  электронного пучка [2]. Она оказалась равной  $T_e \approx 0.6$  эВ, что соответствует  $\theta_e = (v_e/v_{th}) = 4 \cdot 10^{-3}$ .

Полученные результаты следует рассматривать как качественное доказательство возможности демпфирования колебаний методом электронного охлаждения.

Основной трудностью, встретившейся в этой серии экспериментов, было резкое ухудшение вакуума при включении электронного пучка. Измерения по времени жизни показали, что давление в камере было пропорционально электронному току и при токе  $I_e = 100$  мА составляло  $P = 5 \cdot 10^{-8}$  торр. Одновременное включение электронного пучка и распределенных магниторазрядных насосов, встроенных в промежутке встречи [1], приводило к гибели протонов. Исследования показали, что при токе электронов, большем 10 мА, в промежутке встречи накапливается заряд, создающий электрическое поле с напряженностью  $\mathcal{E} \approx 300$  В/см, так как участок охлаждения представляет собой ловушку с продольным магнитным полем и электростатическими пробками на концах. Накопление заряда связано, по-видимому, с потоком быстрых атомов, возникающих при работе магниторазрядного насоса; при выключении насосов накопления заряда не происходило.

В следующей серии экспериментов предполагается усовершенствовать методики измерения параметров протонного и электронного пучков [1], улучшить вакуум и ввести отсос ионов в месте встречи. В дальнейшем предполагается провести исследование нелинейных режимов затухания (большие амплитуды колебаний, углы и ошибки по скоростям).

### Л и т е р а т у р а

1. В.В.Анашкин, Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, А.С.Медведко, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, В.Г.Пономаренко, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Установка для экспериментов по электронному охлаждению. Наст. сб., доклад 145.
2. Г.И.Будкер, Я.С.Деробнев, Н.С.Диканский, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский. Кинетика электронного охлаждения. Наст. сб., доклад 144.

Рис. 1. Зависимость выхода нейтральных атомов водорода (а) и времени жизни протонного пучка при фиксированной энергии электронов и токе электронов 100 мА (б) от энергии протонов

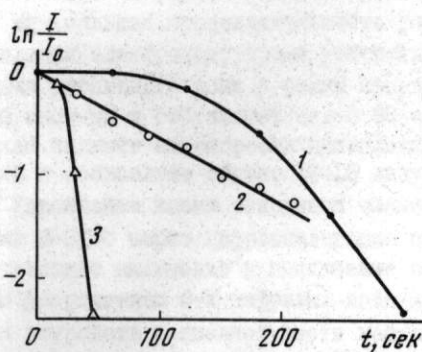
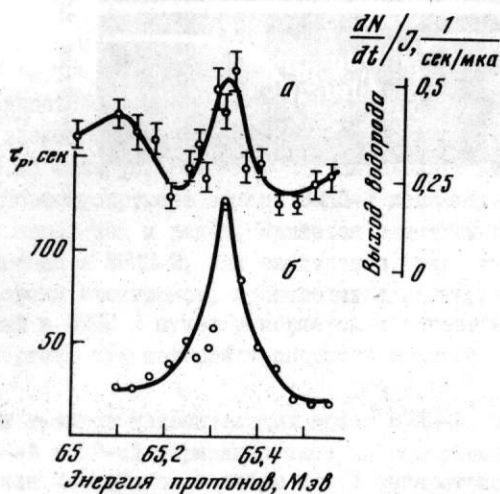


Рис. 2. Зависимость тока протонов от времени  
1 -  $I_e = 0$ ; 2 -  $I_e = 100$  мА; энергия электронов оптимальная; 3 -  $I_e = 100$  мА; энергия электронов отстроена на  $\Delta E/E = 5 \cdot 10^{-3}$

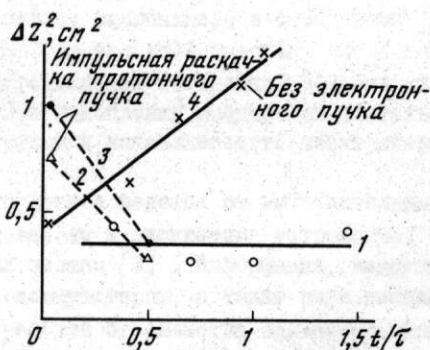
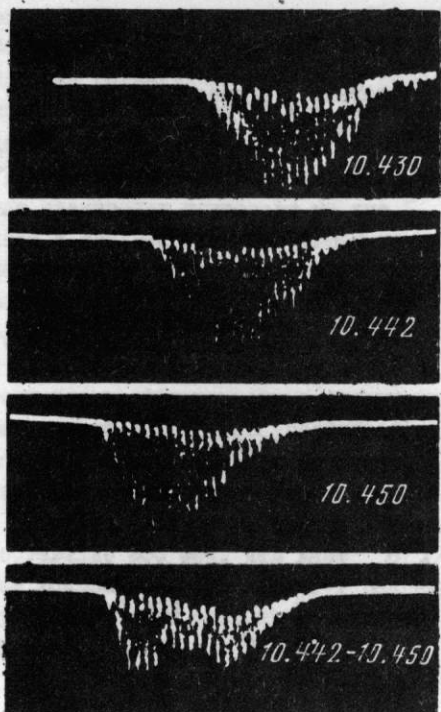


Рис. 3. Зависимость от времени вертикального размера протонного пучка  
1 -  $I_e = 100$  мА; 2, 3 -  $I_e = 100$  мА; предварительно включена внешняя раскачка протонного пучка;  
4 -  $I_e = 0$



Энергия электронов (относительные единицы)

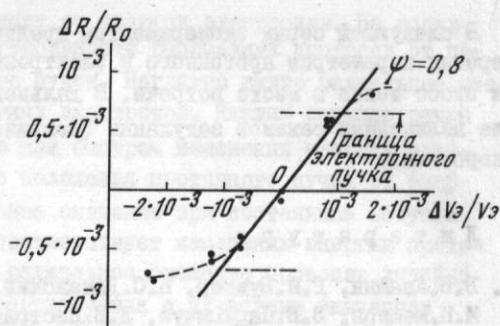


Рис. 5. Зависимость радиального смещения протонного пучка от энергии электронов

Рис. 4. Зависимость смещения протонного пучка от энергии электронов (сигнал сцинтилляционного счетчика)

Цифры указывают энергии электронов в отн. ед.

## 147. СОСТОЯНИЕ РАБОТ НА УСТАНОВКЕ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫМИ ПУЧКАМИ ВЭПП-2М

Г.И. Будкер, И.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич,  
А.Н. Кирпотин, И.А. Кооп, Л.М. Курдадзе, А.П. Лисенко,  
С.И. Мишнев, В.Н. Осипов, В.М. Петров, А.А. Полуни,  
И.К. Седяров, В.А. Сидоров, С.И. Середняков,  
А.Н. Скринский, Э.М. Трахтенберг, Г.М. Тумайкин,  
В.Ф. Туркин, Ю.М. Шатунов, И.А. Шехтман,  
А.Г. Хабахпашев

Институт ядерной физики СО АН СССР

### 1. Описание комплекса ВЭПП-2

Жестко-фокусирующее накопительное кольцо ВЭПП-2М [1], предназначенное для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками с максимальной энергией до  $2 \times 670$  МэВ сооружено на базе ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2 [2]. В принятой схеме слабофокусирующее кольцо ВЭПП-2 используется в качестве бустера, а инжектором в него, как и ранее, является электронный синхротрон Б-3М на энергию 270 МэВ. Инжекция в ВЭПП-2, как электронов, так и позитронов, получаемых посредством конверсии электронов, производится поочередно при энергии 120 МэВ. Затем накопленный в ВЭПП-2 пучок ускоряется и переводится в накопительное кольцо ВЭПП-2М на энергии, при которой проводится эксперимент.

Система синхронизации высокочастотных трактов накопительных колец ВЭПП-2 и ВЭПП-2М; работающих соответственно на 3-ей и 12-ой гармонике частоты обращения позволяет перевести ступок электронов или позитронов в любую из 12 сепаратрис накопителя ВЭПП-2М и таким образом обеспечить места встречи в любой паре противоположных экспериментальных промежутков.

Минимальная продолжительность рабочего цикла, включающего в себя время накопления электронов; время ускорения в ВЭПП-2 до заданной энергии; время возвращения магнитного поля в режим накопления определяется постоянной времени магнитной системы и составляет около 80 секунд. При накоплении позитронов длительность цикла зависит от скорости накопления позитронов и накапливаемого позитронного тока и составляет обычно 10-15 минут.

Управление всеми основными элементами комплекса ведется от вычислительной машины М-6000 через цифроаналоговые преобразователи и дискретные устройства, обеспечивающие включение и выключение различных систем [3]. Информация, вводимая в ЭВМ посредством 2-х цифровых вольтметров и коммутаторов, а также ряда специальных устройств позволяет вести контроль за работой большинства элементов. Общее число каналов, управляемых ЭВМ; около 128. Сюда входят постоянные и импульсные элементы электронно-оптических каналов, магнитные системы обоих накопителей, коррекция равновесной орбиты и градиента квадрупольных линз, управление высокочастотной системой и т.д. Разработана и введена в действие система программ; позволяющая облегчить работу оператора в режиме наладки и полностью автоматизировать все операции в режиме проведения экспериментов с двумя пучками.

Взаимодействие оператора с ЭВМ производится через дисплей. Документированная информация выводится через телетайпы и перфораторы.

## 2. Эксперименты с одним пучком

Первый этап отладки накопителя включает в себя изучение характеристик магнитной системы и динамики пучка. Магнитная структура кольца ВЭШ-2М состоит из 8 поворотных магнитов с однородным полем, 20 квадрупольных и 32 секступольных и сектупольных линз, 4 коротких промежутков, предназначенных для впуска и инфлекторов и 4 длинных промежутков для проведения экспериментов. Исходному режиму соответствует вертикальная  $\beta$ -функция в центре экспериментального промежутка 6,5 см, радиальная  $\beta$ -функция 45 см и бетатронные частоты около 3,1. Для измерения частот используется стандартный метод резонансной раскачки.  $\beta$ -функции в линзах определяются по сдвигу бетатронной частоты при малом изменении градиента поля в линзе. Соответствующим пересчетом вычисляется  $\beta$ -функция в области взаимодействия. Получено хорошее соответствие расчетных и измеренных значений  $\beta$ -функций, регулировкой градиента линз удавалось изменять вертикальную  $\beta$ -функцию в пределах от 3,5 до 20 см.

Положение равновесной орбиты и все параметры циркулирующих пучков определялись по синхротронному излучению [4]. Для наблюдения использовалось 14 окон, 8 по одному и 6 по другому направлению движения частиц. Ввиду близости рабочей точки к целому резонансу  $\nu_z = \nu_z = 3$  основной вклад в искажение орбиты вносила 3-я гармоника азимутальной неоднородности. После введения соответствующих коррекций искажения орбиты составляют менее 1 мм по вертикали и менее 2 мм по радиусу. Информация о положении равновесной орбиты вводится в ЭВМ. В ближайшее время предполагается ввести автоматическую коррекцию равновесной орбиты.

Исследовалась зависимость частоты бетатронных колебаний от частоты обращения. При выключенных секступольных линзах значения дисперсии составили соответственно для вертикального движения  $E \frac{\partial \nu_z}{\partial E} = -4,6$  и для радиального  $E \frac{\partial \nu_x}{\partial E} = -9,6$ , что с точностью 15% согласуется с расчетом. Включением секступольных линз, расположенных соответственно в местах с большой радиальной и большой вертикальной  $\beta$ -функциями удалось эти цифры менять в широких пределах вплоть до изменения знака.

Это оказалось необходимым для подавления вертикальной неустойчивости, по-видимому, типа "голова-хвост", которая ограничивала накопленный ток несколькими миллиамперами. Колебания возбуждались ударом инфлектора и далее самопроизвольно нарастали; пока значительная часть пучка не терялась.

В режиме одного ступка соответствующей перестройкой высших гармоник резонатора специально заложенными для этой цели стержнями удалось найти несколько областей, где отсутствовала продольная неустойчивость при всех накопленных токах. Однако при работе с несколькими ступками таким способом продольную неустойчивость при больших токах подавить не удавалось. Максимальный циркулирующий ток (140 мА при 510 МэВ) был получен в режиме одного ступка.

Дальнейшее увеличение тока привело к разрушению одного из стекол для вывода синхротронного излучения. Изготавливаются специальные заслонки для устранения этой опасности.

После прогрева вакуумной камеры до 120–200<sup>0</sup> был получен средний вакуум в кольце (2–3)·10<sup>-9</sup> мм рт.ст. и время жизни пучка при малом токе составило около 15 часов.

При больших интенсивностях накопленного пучка после соответствующего обезгаживания вакуумной камеры синхротронным излучением время жизни определяется рассеянием внутри ступка (эффект Тушека). Зависимость времени жизни от

тока при разных энергиях представлена на рис.1. Наблюдаемое при низкой энергии увеличение длины ступки и радиального размера также обусловлено эффектом рассеяния внутри ступки.

### 3. Режим двух пучков. Светимость

Эксперименты с двумя пучками проводились при энергиях 2x200, 2x320 и 2x510 МэВ. Работа велась в режиме одного ступка электронов и позитронов. Длина ступков не превышала 5 см и обычно была меньше  $\beta$ -функции в области взаимодействия. Измерение светимости проводилось по двойному и однократному тормозному излучению.

Как известно, светимость<sup>2</sup>, определяемая как  $L = \frac{n}{\sigma}$  (где  $n$  - число событий изучаемого процесса с эффективным сечением  $\sigma$  в единицу времени), характеризуется следующим соотношением:

$$L = \frac{I^+ I^-}{e^2 \cdot 4\pi b_z b_z f}, \quad (I)$$

Здесь  $I^+$ ,  $I^-$  - позитронный и электронный токи;

$4\pi b_z b_z$  - эффективное поперечное сечение области взаимодействия.

Недостаточно точно известной величиной в соотношении (I) является вертикальный размер пучка ( $2b_z$ ), зависящий от связи вертикального движения с радиальными. Именно изменением вертикального размера определяется зависимость величины удельной светимости  $\frac{L}{I^+ I^-}$  от частоты бетатронных колебаний (рис.2).

Предельный ток ( $I_{\text{макс}}$ ), при котором резко падает время жизни менее интенсивного встречного пучка, также зависит от выбора рабочей точки. При токах несколько меньших, чем  $I_{\text{макс}}$  наблюдается диффузное увеличение вертикального размера и соответственно уменьшение удельной светимости (рис.3).

Ниже представлены экспериментальные результаты, в какой-то степени характеризующие возможности установки:

E (МэВ)	200	320	510
$I_{\text{макс}}$ (мА)	1,5 - 2	5 - 6	15 - 20
$\Delta V_{\text{макс}}$	0,03	0,05	0,065
$L_{\text{макс}}$ (см <sup>-2</sup> сек <sup>-1</sup> )	$1,2 \cdot 10^{28}$	$3,5 \cdot 10^{28}$	$3 \cdot 10^{29}$
$I^+ I^-$ (мА) <sup>2</sup>	0,5x2,3	1,6x3	4x7

Нам пока не удалось достичь предельной светимости, которую ограничивает электромагнитное взаимодействие встречных пучков. Это, в первую очередь, связано с малым временем жизни из-за эффекта Тушека и недостаточной скоростью накопления позитронов. Предполагается организовать искусственное увеличение радиального размера, что при одновременном уменьшении связи позволит сохранить то же поперечное сечение пучка в области взаимодействия и линейно с радиальным размером пучка увеличить время жизни. Ведется также работа по увеличению скорости накопления позитронов в ВЭП-2. Имеются основания надеяться в ближайшее время поднять светимость еще в несколько раз.

### 4. Начало экспериментов

Для проведения экспериментов на один из промежутков установлена система регистрации с телесным углом  $0,6x4\sqrt{1}$  стерадиан. Система состоит из проволочных искровых камер для определения положения траекторий заряженных частиц в пространстве и измерения их пробегов, группы сцинтилляционных счетчиков для запуска искровых камер и счетчиков типа сэндвич для разделения мезонов и электронов.

Система регистрации работает в режиме прямой связи с периферийной машиной М-6000, подключенной к базовой, Минск-32<sup>н</sup>.

Проведены пробные измерения с одним пучком для изучения фоновых условий и с двумя пучками при энергии 510 МаВ. Проведено сравнение светимости измеряемой по тормозному излучению и позитрон-электронному рассеянию на большие углы.

Пробные измерения показали, что фоновая нагрузка системы регистрации потерянными частицами весьма значительная и при светимости  $10^{29}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup> составляет около 30 Гц.

Предварительный анализ показывает, что основная часть фона обусловлена частицами, потерянными за счет эффекта Тусека. Ливни, как правило, возникают в материале конструкций экспериментального промежутка. С целью уменьшения фона изготавливается новый экспериментальный промежуток.

### 5. Синхротронное излучение

На накопителе установлены два вакуумных канала для работы с синхротронным излучением. В таблице приведено число фотонов в секунду, выходящих из накопителя в 1 миллирадиан радиального угла на 1 Å при циркулирующем токе 0,1 А ( $\frac{\text{фотонов}}{\text{сек.Å мрад}}$ ),

что на несколько порядков превосходит другие источники в этой области спектра.

$\frac{\lambda(\text{Å})}{E(\text{эВ})}$	2	5	10	20	50	100
0,50	$6,0 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$
0,55	$5,0 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^{11}$	$6,7 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$
0,60	$5,7 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{13}$	$2,3 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{13}$
0,65	$1,5 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{13}$	$4,3 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{13}$

Группой из Института неорганической химии Сибирского отделения АН начато изучение спектров поглощения в области от 15 до 500 Å.

На кольце установлен датчик для измерения циркулирующего тока с точностью лучшей 1%. Это дает возможность использовать синхротронное излучение с целью калибровки различной спектрометрической аппаратуры в широкой области спектра.

### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер и др. III Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т. I. "Наука", 1973, стр. 318.
2. В.Л. Ауслендер и др., Труды УП-межд. конференции по ускорителям заряж. частиц, т. II. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1970, стр. 26.
3. Ю.А.Болванов, М.Н.Захваткин и др. Управление ускорительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР с помощью ЭВМ. Наст. сб., доклад № 119.
4. Э.И.Зинин, В.П.Кутовой. Система измерения и контроля основных параметров пучка в накопителе ВЭШ-2М. Наст. сб., доклад № 148.

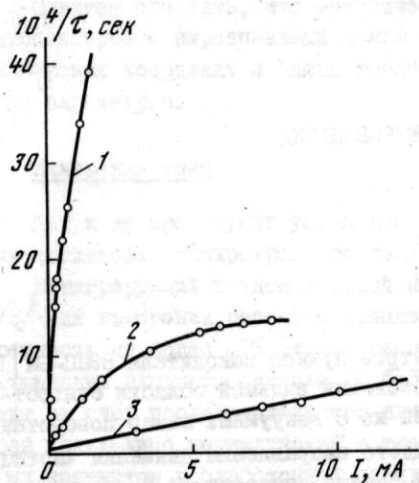


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость обратного времени жизни электронного пучка от величины тока для энергий 200 (1), 320 (2) и 510 МэВ (3)

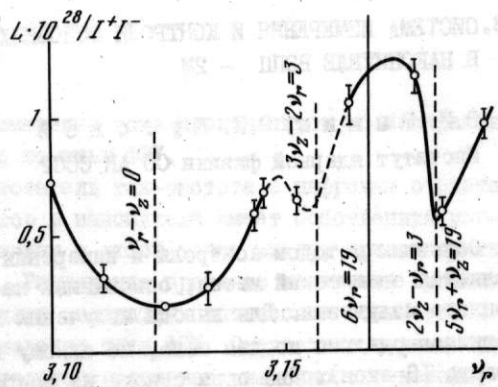


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость удельной светимости от рабочей точки ( $E = 510$  МэВ)

Рис. 3. Зависимость удельной светимости от величины электронного тока  $E = 510$  МэВ

1 -  $\nu_r = 3,177$ ,  $\nu_z = 3,092$ ; 2 -  $\nu_r = 3,160$ ,  $\nu_z = 3,106$

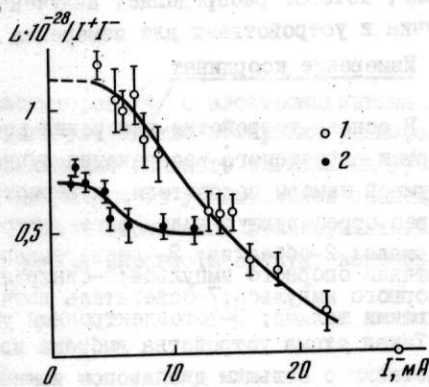


Рис. 3



## 148. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП - 2М

Э.И. З и н и н, В.П. К у т о в о й  
Институт ядерной физики СО АН СССР

Основным методом контроля и измерения параметров пучков накопителя ВЭПП-2М [1] является оптический метод, основанный на использовании видимой области синхротронного излучения. Для вывода излучения в каждой из 8 вакуумных камер поворотных магнитов сделано по два окна, по одному для каждого направления движения частиц (всего 16 окон). Два окна одного из направлений занято аппаратурой для работы в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена и не используется для вывода видимого излучения. Около каждого из 14 окон устанавливается полупрозрачное зеркало, которое распределяет излучение между устройством для измерения координат пучка и устройствами для измерения других его параметров.

### Измерение координат

В основу устройства измерения координат пучка положен принцип механической развертки оптического изображения пучка, соответствующего определенному сечению вакуумной камеры накопителя, и регистрации светового излучения пучка, проходящего через стробирующую щель, фотоэлектронным умножителем (рис.1; 1-полупрозрачное зеркало; 2-объектив; 3-развертывающее зеркало; 4-маховик со щелевой диафрагмой датчика опорного импульса; 5-синхронный электродвигатель; 6-фотодиод датчика опорного импульса; 7-осветитель датчика опорного импульса; 8-пластинка со стробирующими щелями; 9-фотоэлектронный умножитель).

Такая схема устройства выбрана из условия получения высокой чувствительности в сочетании с большим диапазоном изменения входного потока, без применения каких-либо оптических ослабителей. При использовании малогабаритного ФЭУ-60 и распределении светового потока в соответствии с рис.1 устройство стабильно работает при токе в накопителе  $\sim 10$  мкА (соответствует потоку на фотокатоде  $< 10^{-7}$  лм) и диапазоне изменения входного потока  $> 10^4$  (10 мкА - 1А).

В обычном исполнении такая система измерения двух координат требует двух независимых каналов. В нашем случае была предложена схема на основе двух стробирующих щелей, расположенных под углом  $45^\circ$ , которая решает эту задачу с помощью одного развертывающего движения и одного приемника излучения (рис.2). На рисунке показан характер изменения выходного сигнала датчика координат в зависимости от положения пучка в сечении камеры накопителя. На всех трех позициях положение изображения сечения камеры накопителя относительно стробирующей щели А соответствует началу отсчета и совпадает с моментом формирования вершины опорного импульса.

После коммутации и обработки сигналов датчиков временные интервалы, соответствующие координатам X и Y, преобразуются в числа, которые из устройства промежуточной памяти поступают в ЭВМ.

Полное время измерения 14 каналов (28 координат) составляет 1,4 сек. Экспериментальный разброс показаний измерителя координат с неподвижным пучком не превышает величины  $\pm 0,3$  мм. Нелинейность датчика в диапазоне  $\pm 15$  мм по лабораторным измерениям пренебрежимо мала. Соответствие показаний датчика абсолютному положению пучка в камере накопителя определяется, в основном, величиной угловых ошибок установки датчика относительно базовой линии наблюдения. Величина этих ошибок не должна превышать при заданном допуске  $\pm 0,5$  мм одной угловой минуты.

Следует отметить, что механическое развертывающее устройство можно заменить диссектором с вырезающей щелью такого же типа. Это позволит сократить время измерения координат в одной точке до 1 мсек и менее при сохранении всех остальных параметров.

#### Измерение тока

Как и на предыдущих установках [2], измерение тока производится по измерению интенсивности синхротронного излучения с помощью ФЭУ.

Интегрирующий конденсаторный преобразователь ток-частота с цифровым отсчетом [3] для измерения рабочего диапазона токов в накопителе имеет собственную погрешность не более  $\pm 1\%$  от измеряемой величины в любой точке шкалы, при стократном изменении входного сигнала (0,5-50 мкА). Расширение пределов измерения происходит за счёт последовательного введения двух стократных оптических ослабителей без каких-либо переключений в тракте измерения тока ФЭУ. Отсутствие переключаемых контактов в слаботочных цепях значительно увеличивает надежность системы. Предусмотрен ввод показаний измерителя тока в ЭВМ. Для удобства наблюдения за изменением интенсивности пучка установлены логарифмические преобразователи на диапазон  $10^2$  с выходом на стрелочные приборы.

#### Измерение поперечных размеров

Поперечные размеры измеряются с помощью диссекторов [4] с электромагнитным отклонением. Автоматическое, с цифровым отсчетом, устройство измерения размера пучка на полувысоте, построено по принципу ограничения входного сигнала на уровне половины его пикового значения и избавляет оператора от утомительной процедуры измерения размеров на экране осциллографа. Предусмотрен ввод этих показаний в ЭВМ. Для измерения размеров пучков, имеющих наклон к плоскости орбиты, возможен дистанционный поворот диссектора.

#### Азимутальные размеры, заполнение сепаратрис

Для измерения азимутальных размеров и наблюдения за величиной тока в отдельных сепаратрисах используется прибор ЛИ-602 [2] - диссектор с электростатической фокусировкой и отклонением. При частоте высокочастотной развертки 16,77 МГц, равной частоте обращения и при возможности стандартной калибровки по меткам от постоянного источника [4] получено разрешение 10 см. Для измерения предельно малых ступок, амплитуда ВЧ - развертки была увеличена и при калибровке по двум лежащим в соседних сепаратрисах, ступкам легко получено разрешение 3 см.

Визуальная оценка токов в сепаратрисах, при наблюдении сигнала диссектора на экране осциллографа, не вызывает никаких затруднений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер и др. Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М Новосибирского института ядерной физики. - Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. «Наука», 1973.
2. П.Д.Воблий и др. Методы измерения параметров пучков в накопителе ВЭПП-3. - Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. «Наука», 1973.
3. Л.А.Баранов и др. Конденсаторные преобразователи в автоматике и системах управления. «Энергия», 1969.
4. Э.И.Зинин. Оптические методы наблюдения за пучком. - Труды Всесоюзного совещания по ускорителям. М. ВНИИТ, 1970.

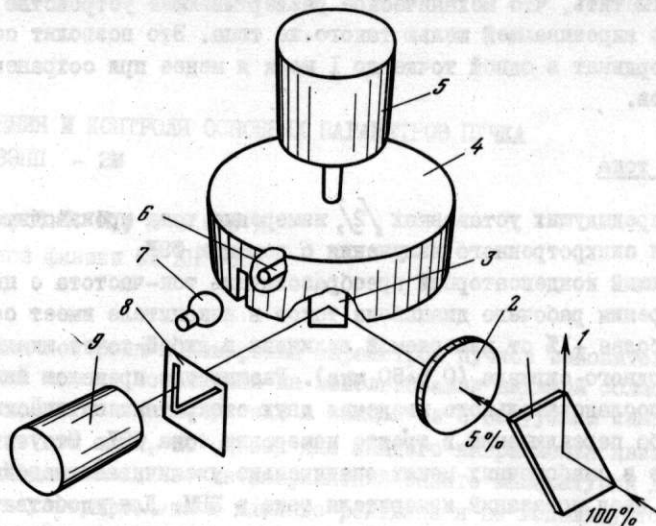


Рис. 1

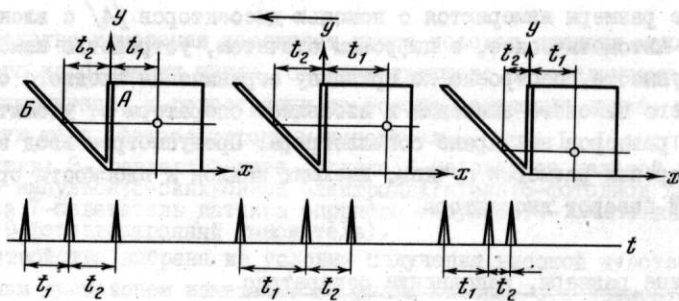


Рис. 2

## 51. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ ВЭШ-3 НА ЭНЕРГИЮ 3 ГэВ

В.Г.Вещеревич, Э.И. Горникер, Н.Н. Иощенко,  
М.М.Карлинер, Г.Я.Куркин, В.М.Петров,  
И.К.Седяров, В.Д.Шемелин, И.А.Шехтман

Институт ядерной физики СО АН СССР

В ускоряющей системе накопителя ВЭШ-3 [1] в дополнение к имеющимся двум в.ч.каналам на частотах 4,03 МГц и 76 МГц ( $q=1$ ; 19) построен новый канал на частоту 181 МГц ( $q=45$ ). Это позволяет поднять максимальную энергию накопителя с 2,2 ГэВ до 3 ГэВ. Радиационные потери частиц в накопителе на 3 ГэВ равны 1 МэВ/об. Управление в.ч.системой модернизировано и обеспечивает совместную работу трех в.ч.каналов.

Ускоряющий резонатор на частоту 181 МГц (рис.1) возбуждается на типе колебаний  $E_{010}$ . Добротность резонатора  $Q=45000$ , шунтовое сопротивление  $R_{ш}=9,5$  Мом, коэффициент пролета по напряжению - 0,82. Размеры резонатора оптимизированы по минимуму в.ч.потерь.

Резонатор изготовлен из меди М1 и МБ, имеет водяную систему охлаждения, систему прогрева до 400°C, откачивается магниторазрядным и сорбционным титановым насосами. Резонатор помещен в кожух из нержавеющей стали, который откачивается магниторазрядным насосом. После прогрева при отсутствии напряжения вакуум в резонаторе  $2 \cdot 10^{-10}$  мм рт.ст.

Для подавления вторичноэлектронного в.ч.разряда (ВЭР) в резонаторе подвешено кольцо I, на которое подается напряжение до -50 кВ. Петля ввода мощности 2 изолирована от земли и на нее через четвертьволновой стакан подается напряжение +3 кВ. Размеры и форма измерительной петли 3 подобраны так, что ВЭР в ней не возникает.

Измерен спектр высших мод резонатора. Частоты наиболее опасных мод  $E_{020}$ ,  $E_{021}$  и  $E_{030}$ , которые могут вызвать раскачку синхротронных колебаний [2], перестраиваются специальными механизмами 5,6. Перестройка основной частоты на 0,5% осуществляется за счет деформации боковых стенок резонатора механизмом 4.

При испытаниях на стенде в непрерывном режиме в настоящее время получено напряжение  $U_{рез}=1600$  кВ. По оценкам погрешность измерения напряжения составляет не более 10%.

Вторичноэлектронный разряд подавлялся во всем диапазоне напряжений только после прогрева резонатора при 350°C и подаче на кольцевой электрод напряжения -(40+45) кВ. При меньшем отрицательном напряжении и положительном смещении до +50 кВ имелись области существования ВЭР.

Через окно 7 наблюдались светящиеся точки на поверхности центральных выступов при 400 кВ. Яркость свечения точек увеличивалась с ростом напряжения. При первых пробоях некоторые яркие точки разрушались и образовывались новые. Максимальная напряженность электрического поля на поверхности выступов равна  $1,5U_{рез}/d$  ( $d$  - величина зазора). Оценочные расчеты показали, что при данной напряженности могут светиться небольшие диэлектрические частицы, разогреваемые в.ч. полем.

Заметное рентгеновское излучение начиналось с 700 кВ. Интенсивность рентгеновского излучения резко растет с увеличением в.ч. напряжения: при

$U_{рез} = 600+1100$  кВ пропорционально  $U_{рез}^{18}$ , при  $U_{рез} = 1200+1500$  кВ

пропорционально  $U_{рез}^{13}$ . После нескольких часов работы интенсивность излучения уменьшается в 2+3 раза и при  $U_{рез} = 1600$  кВ составляет 40 Р/час на расстоянии 1 м от резонатора. При этом напряжении вакуум в резонаторе  $2 \cdot 10^{-9}$  мм рт.ст.

Проектная мощность усилителя на 181 МГц - 160 кВт в непрерывном режиме. В настоящее время получена мощность 130 кВт. Выходные каскады выполнены на триодах 6П50А (рис.2). Мощность, отдаваемая одним каскадом, около 45 кВт. Выходная мощность получается суммированием мощностей четырех каскадов на трех мостах.

Каждый каскад представляет собой резонансный усилитель с общей сеткой. Устойчивость каскада на частотах вне полосы пропускания ускоряющего резонатора обеспечивается подключением к входному контуру балластной нагрузки. Коэффициент усиления по мощности - около 6.

Анодный контур каскада - короткозамкнутый отрезок коаксиальной линии длиной  $3/4 \lambda$ . Начальная частота устанавливается перемещением короткозамыкателя. Плавная подстройка частоты осуществляется триммером. Связь с нагрузкой - емкостная, регулируемая. Входной контур каскада образован коаксиальной линией, нагруженной на конденсатор настройки. Электрическая длина контура около  $1/2 \lambda$ . Связи с входным фидером и с балластной нагрузкой - емкостные, регулируемые. Элементы связи и элемент подстройки частоты анодного контура выполнены без применения скользящих контактов.

В.ч.каналы работают от одного возбуждателя I (рис.3). В каждом канале выполняется автоподстройка частоты резонатора, регулируется в.ч.мощность, осуществляется защита и блокировки. Система фазировки поддерживает необходимые фазовые соотношения ускоряющих напряжений и вырабатывает опорные в.ч. напряжения для синхронизации устройств накопителя.

Автоподстройка частоты осуществляется с помощью фазометра 8 или потенциометрического датчика положения механизма перестройки резонатора. Фазометр используется при расстройках, лежащих в полосе пропускания резонатора. Расстройка определяется по разности фаз тока возбуждения и напряжения резонатора. Потенциометрический датчик применяется при больших расстройках. Сигнал с фазометра или датчика управляет сервоприводом 9.

Мощность, поступающая в резонатор, регулируется модулятором 7. Сигнал модулятора воздействует на усилитель 5. Модулятор работает в режимах АРУ по току возбуждения или по напряжению резонатора.

В систему фазировки входят фазовращатели 4, 10 и 11; генератор импульсов 14; усилители опорных в.ч.напряжений 12 и 13; фазовращатели для начальной установки фазовых соотношений ускоряющих напряжений 15 и 16; и пять измерительных каналов 17, 18, 19, 20 и 21+24.

На вход генератора импульсов 14 от возбуждателя I поступает напряжение с частотой 2,7 МГц. С выхода снимаются импульсы, промодулированные по фазе с частотой 20 кГц. Длительность импульсов - 1,5 нс на полувысоте. Максимальное изменение периода  $\pm 0,5$  нс. Импульсы поступают совместно с в.ч. сигналами на смесители измерительных каналов 21. С выхода смесителя снимаются сигналы несущей частоты  $1,35$  МГц и боковых частот  $(1,35 \pm 0,02)$  МГц. Амплитуда этих сигналов прямо пропорциональна амплитуде в.ч. сигналов на входе смесителя, и кроме того зависит от величины смещения импульсов по фазе  $\Delta \varphi$  относительно нулей в.ч.напряжения. Амплитуда несущей прямо пропорциональна  $\sin \Delta \varphi$ , а боковых -  $\cos \Delta \varphi$ . Несущая вместе с боковыми образует амплитудномодулированный сигнал. Этот сигнал проходит через УПЧ 22 и поступает на фазовый детектор 24. Для того, чтобы исключить зависимость выходного сигнала с измерительного канала от величины входного, УПЧ охвачен цепью АРУ 23. При малых  $\Delta \varphi$  АРУ осуществляется сигналом 20 кГц с выхода фазового детектора. При больших смещениях - сигналом ПЧ с выхода УПЧ. Низкочастотная составляющая сигнала с выхода фазового детектора

(20 кГц) поступает на управляемые фазовращатели I0, II, I2 и на усилители опорных сигналов I4, I5. Точность синхронизации  $\pm 0,3$  нс.

В канале 4,03 МГц введена цепь обратной связи для подавления когерентных синхротронных колебаний. В этой цепи с пикап-электрода 3 снимается сигнал 4,03 МГц, наведенный пучком, и подается на фазометр 2. Сигнал с фазометра воздействует на фазовращатель 4.

Если пренебречь разбросом собственных синхротронных частот частиц, который достаточно мал, то вносимое этой цепью затухание определяется, как

$$\delta_{\text{вн}} \approx -\frac{1}{2} \Omega_0 \operatorname{Im} [\bar{K}(\Omega_0)]$$

при  $|\bar{K}(\Omega_0)| < 1$ , где

$\frac{\Omega_0}{2\pi}$  - частота синхротронных колебаний;

$\bar{K}(\Omega_0)$  - комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи от пикап-электрода до резонатора.

При включенной обратной связи при  $E = 400$  МэВ затухание равно  $3 \cdot 10^2$  сек $^{-1}$ . Затухание из-за радиационного трения 4 сек $^{-1}$ .

Во время работы накопителя в.ч. система может управляться оператором или от ЭВМ.

## Л и т е р а т у р а

1. В.Г.Вещеревич и др. Высоочастотная система электрон-позитронного накопительного кольца ВЭШ-3. - Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П. "Наука", 1972.
2. М.М.Карлинер, А.Н.Скринский, И.А.Шехтман. ЖТФ, т.38, вып. II, 1945 (1968).

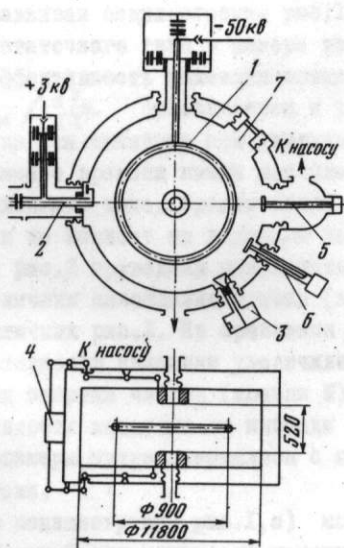


Рис. 1. Ускоряющий резонатор

1 - кольцо; 2 - ввод мощности; 3 - измерительная петля; 4 - перестройка основной частоты; 5, 6 - перестройка высших мод; 7 - окно

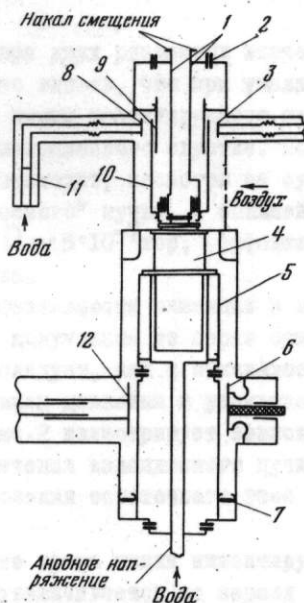


Рис. 2. Выходной каскад усилителя на 181 МГц

1 - дроссель; 2 - конденсаторы; 3 - связь с входным фидером; 4 - триод; 5 - анодный контур; 6 - элемент подстройки; 7 - короткозамыкатель; 8 - связь с нагрузкой; 9 - конденсатор настройки; 10 - входной контур; 11 - балластная нагрузка; 12 - связь с нагрузкой

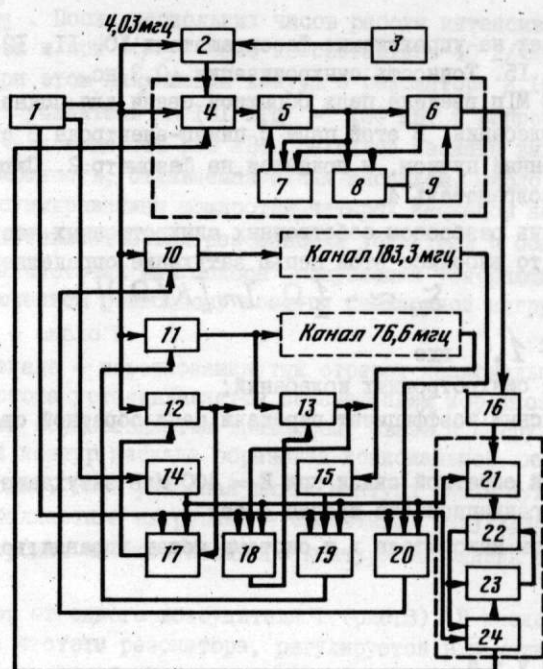


Рис. 3. Функциональная схема ВЧ питания накопителя ВЭПП-3