

Д.64

4

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 74 - 86

**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**

**УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ**

Новосибирск

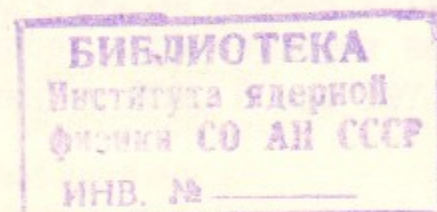
1974

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

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается установка, созданная для изучения электронного охлаждения — накопитель протонов НАЦ-М на энергии протонов до 150 МэВ.



INSTALLATION FOR EXPERIMENTS ON ELECTRON COOLING

V.V. ANASHIN, G.I. BUDKER, N.S. DIKANSKY, V.I. KUDELAINEN,
A.S. MEDVEDKO, I.N. MESHKOV, V.V. PARCHOMCHUK, D.V. PESTRIKOV,
V.G. PONOMARENKO, R.A. SALIMOV, A.N. SKRINSKY, B.N. SUCHINA

ABSTRACT

The proton storage ring NAP-M designed for investigation of electron cooling is described.

Для проведения экспериментов по электронному охлаждению /1/ в ИЯФ СО АН СССР построен накопитель протонов, представляющий собой модель НАП /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
Частоты бетатронных колебаний	$Q_x - 1.4$ $- 1.2$
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	$\alpha - 0.8$
Критическая энергия	- 110 МэВ
Апертура в поворотных магнитах	-
	$\Delta Z - 7$ см
	$\Delta r - 10$ см
	$\Delta B/B - 1 \cdot 10^{-4}$
Стабильность ведущего поля	- 4
Число прямолинейных промежутков	- 4
Число магнитов	- 4
Частота ускоряющего напряжения	- 0.36 МГц
Инжекция	- 2.23 МГц
При энергии 65 МэВ	10 В
Ускоряющее напряжение	

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 $\text{tg } \theta = 0.579$) 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 ± 0.05 во всем диапазоне изменения ведущего пол γ . Дипольные обмотки создают корректирующие поля до 100 Гс, что позволяет производить γ - Σ 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	$< 5 \cdot 10^{-3}$
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, впуск частиц по вертикали с отклонением на угол $3^{\circ}30'$ с помощью импульсного электростатического инжектора.

Прогривная вакуумная камера выполнена из нержавеющей стали. Конструкция позволяет производить прогрев камеры без разборки магнитов. Температура прогрева до 300°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 $1 \pm 2 \cdot 10^{-8}$ 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.2. Задающим элементом для линейной перестройки частоты генератора служит датчик Холла ($B(t)$). Для компенсации запаздывания его сигнала в цепях управления используется напряжение с витка ($\dot{B}(t)$). Точная подстройка частоты осуществляется по координате пучка. Цепь обратной связи через дифференциальный пикап-электрод содержит интегрирующий усилитель и обеспечивает подавление "ошибки" в координате в $k \approx 16000$ 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 $\Delta B/B \leq 10^{-4}$. Закон нарастания токов в магнитах и корректирующих элементов 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 пушки 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, причем 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 десятью апертурными пробниками восьмью 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, расположенным на другом конце промежутка (/5/, рис.4). Вертикальный размер измеряется апертурным пробником с помещенным на конце сцинтилляционным счетчиком и 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 регистрируется 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, магнитометром, 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 $(\partial r / \partial \omega_s)_B$ и $(\partial \omega_s / \partial B)_E$ 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.Дербенев, М.С.Диканский, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский. "Кинетика электронного охлаждения", доклад на IV-м Всесоюзном сов.по уск.заряженных частиц, (1974).
2. Группа ВАП-НАП "Протон-антипротонные встречные пучки", доклад на УШ-ой Мед.конф. по ускорителям высокой энергии, ЦЕРН (1971).
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.уск. заряженных частиц, т.1, "Наука", 31 (1972).
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.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. "Первые эксперименты по электронному охлаждению", доклад на IV-м Всесоюзном сов.по уск. заряженных частиц (1974).

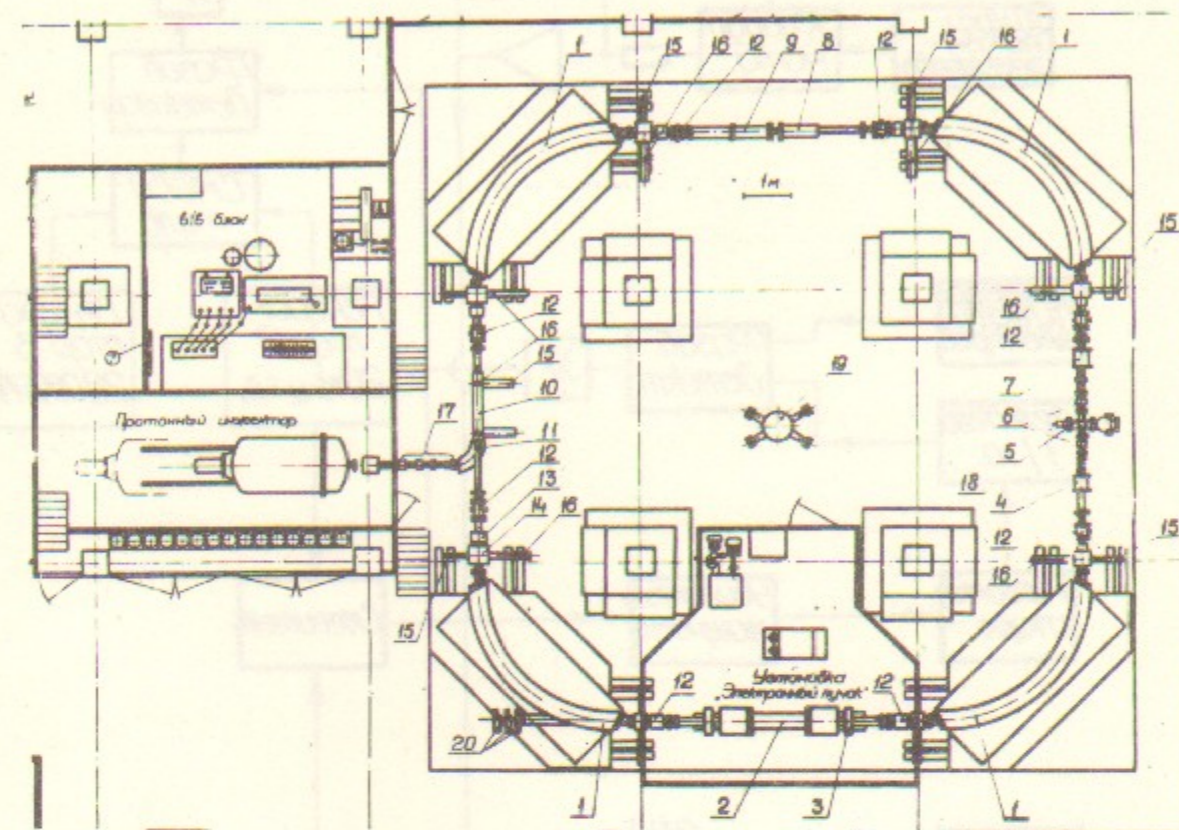


Рис.1. Схема накопителя протонов НАП-М.

1 - магниты, 2 - установка с электронным пучком, 3 - корректирующий магнит, 4 - пробник со сцинтилляционным счетчиком, 5 - магнелиевая струя, 6 - вакуумные клапана, 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 инжекции, 18 - пояс Роговского, 19 - геодезический знак, 20 - счетчики нейтралов.

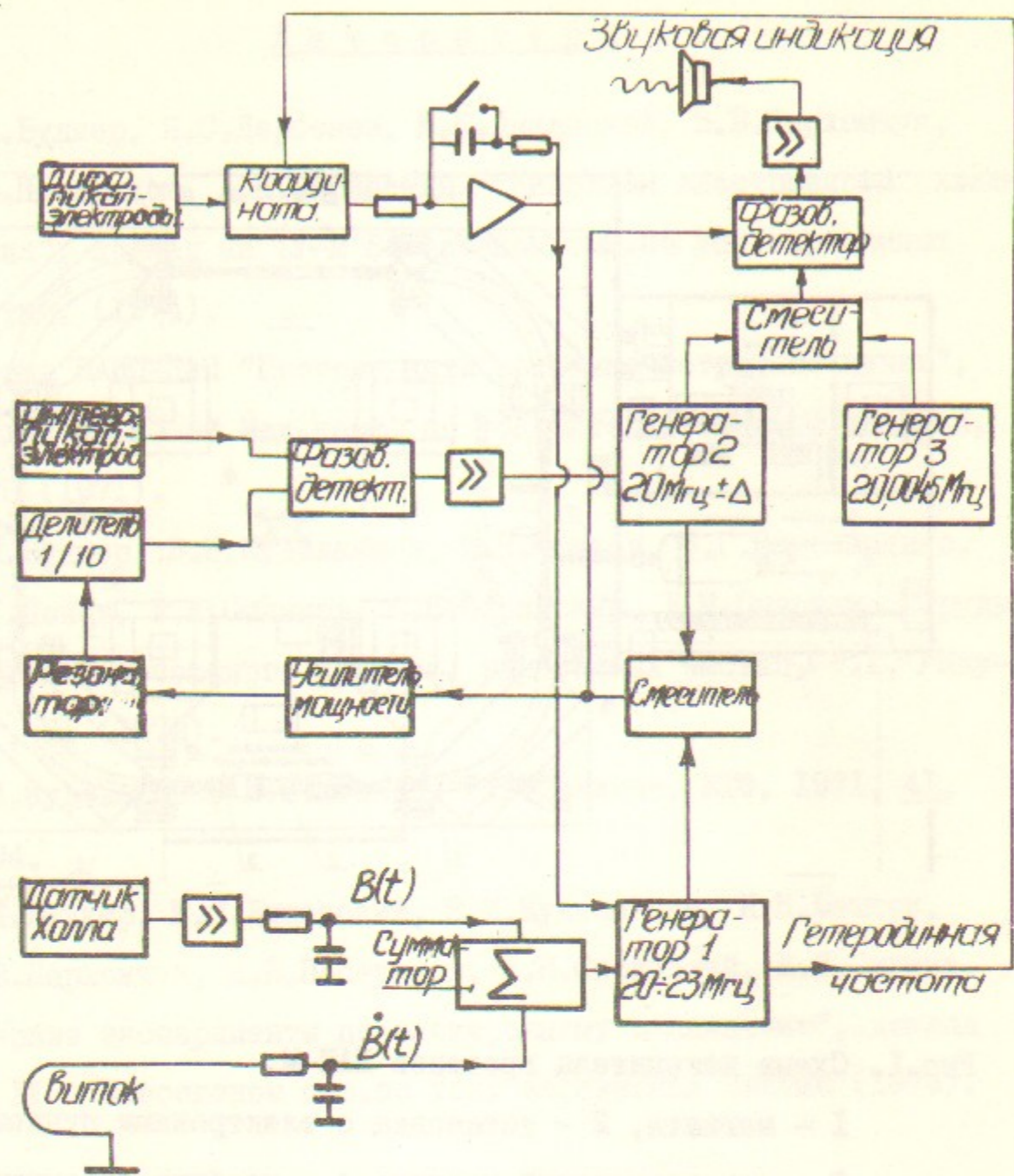


Рис.2. Блок-схема ВЧ-системы.

Ответственный за выпуск Г.А.СПИРИДОНОВ
 Подписано к печати 28.X-1974г. МН 08543
 Усл. 0,5 печ.л., тираж 300 экз. Бесплатно
 Заказ № 86

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР, вт