

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ АН СССР ПО ПРОБЛЕМАМ УСКОРЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ТРУДЫ
ПЯТОГО ВСЕСОЮЗНОГО
СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ
ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

(Дубна, 5-7 октября 1976)

Том II



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1977

79. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ПРИ НАКОПЛЕНИИ БОЛЬШОГО ТОКА В НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3

Н.А.Винокуров, В.Н.Корчуганов, Г.Н.Кулипанов, Е.А.Переведенцев,
Е.Л.Салдин, А.Н.Скринский

Институт ядерной физики СО АН СССР

Данная работа является кратким обзором результатов изучения некоторых эффектов зависящих от числа частиц в пучке накопителя ВЭПП-3. Экспериментально изучены следующие эффекты: возбуждение когерентных бетатронных неустойчивостей *head-tail* типа, быстрое затухание, накопление ионов, Тушек-эффект, удлинение сгустка. Описаны способы подавления вредных эффектов, позволяющие иметь накопленный ток до 0,5 ампера и ускоренный ток до 0,35 А.

Изучение когерентных бетатронных колебаний пучка, как целого

Колебания пучка, как целого, возбуждались ударом инфлектора и наблюдались с помощью диафрагмированного ФЭУ, сигнал с которого подавался на резонансный фильтр, настроенный на частоту бетатронных колебаний. Таким образом, амплитуда наблюдаемого сигнала была пропорциональна амплитуде колебаний центра тяжести пучка, или его дипольному моменту.

1. На малых токах, когда взаимодействие пучка со стенками вакуумной камеры, пластинами и др. несущественно, мы наблюдали следующие явления:

а) при нулевом хроматизме $\frac{\partial v}{\partial E} = 0$ время существования когерентных колебаний было обратно пропорционально кубической нелинейности $\frac{\partial v}{\partial \alpha^2}$ ведущего магнитного поля (рис. 1а);

б) при не слишком больших $|\frac{\partial v}{\partial \alpha^2}|$ и $\frac{\partial v}{\partial E} \neq 0$ появилась модуляция сигнала с частотой синхротронных колебаний (рис. 1б). При этом когерентные синхротронные колебания отсутствовали. По мере увеличения абсолютной величины хроматизма $|\frac{\partial v}{\partial E}|$ глубина модуляции росла и, когда разброс по бетатронным частотам $|\frac{\partial v}{\partial E} \Delta E|$ превышал синхротронную частоту, сигнал состоял из отдельных импульсов шириной $\sim |\frac{\partial v}{\partial E} \Delta E|^{-1}$, следовавших через период синхротронных колебаний (рис. 1в). Обгибающая сигнала не зависела от $\frac{\partial v}{\partial E}$ и зависела только от $\frac{\partial v}{\partial \alpha^2}$ и поперечного размера. Этот эффект является аналогом спинового эха.

Более подробно кинематика когерентных колебаний исследована в /1/.

2. На больших токах начинали проявляться коллективные эффекты:

а) при $\frac{\partial v}{\partial E} = 0$, начиная с некоторого порогового тока, обратно пропорционально $|\frac{\partial v}{\partial \alpha^2}|$, время существования сигнала (время распыливания частиц пучка по бетатронным фазам) пропорционально $|\gamma \frac{\partial v}{\partial \alpha^2} \beta^2|^{-1/2}$ где β - амплитуда удара инфлектора, если $\frac{\partial v}{\partial \alpha^2} < 0$. При $\frac{\partial v}{\partial \alpha^2} > 0$ и токе больше порогового время существования сигнала определялось радиационным затуханием (пучок не распыливался по бетатронным фазам), а сам сигнал был амплитудно модулирован с периодом $T \propto (\gamma \frac{\partial v}{\partial \alpha^2} \beta^2)^{-1/2}$ (рис. 1г).

Такое поведение пучка имеет простое объяснение /2/. Известно, что для нелинейного осциллятора в переменных действие-угол обратная величина кубической нелинейности играет роль эффективной массы. Взаимодействие пучка с внешними системами (например, со стенками вакуумной камеры) вызывает взаимное притяжение или отталкивание между частицами пучка и, в зависимости от знака эффективной массы $(\frac{\partial v}{\partial \alpha^2})^{-1}$.

частицы группируются по бетатронной фазе, либо разбегаются. Этот эффект аналогичен эффекту отрицательной массы в продольном движении частиц в ускорителях /3/ и движении спутников планет /4/, однако, в отличие от них, является эффектом отрицательной массы в колебательном (а не во вращательном) движении. Как показано в /2/, зная амплитуду удара δ , кубическую нелинейность $\frac{\partial v}{\partial a^2}$ и период модуляции T , можно определить разность когерентного и некогерентного сдвигов бетатронной частоты по формуле

$$\delta v = -\pi^2 (2T^2 f_0^2 \frac{\partial v}{\partial a^2} \delta^2)^{-1},$$

что по нашим измерениям составляет $3 \cdot 10^{-5}$ на ток 1 мА;

б) при $\frac{\partial v}{\partial E} < 0$ наблюдалась неустойчивость с инкрементом, пропорциональным току γ и $\frac{\partial v}{\partial E}$, а при $\frac{\partial v}{\partial E} > 0$ - быстрое затухание с декрементом $\Delta > \gamma \frac{\partial v}{\partial E}$. Такое поведение пучка можно объяснить head-tail эффектом. Тогда из зависимости от знака хроматизма $\frac{\partial v}{\partial E}$ следует, что $\delta v < 0$, что согласуется с выводом пункта а).

Как показано в /2/, развитие неустойчивости должно зависеть не только от абсолютной величины, но и от знака $\frac{\partial v}{\partial a^2}$. При равных $|\frac{\partial v}{\partial a^2}|$ мы наблюдали следующие различия в развитии неустойчивости для $\frac{\partial v}{\partial E} < 0$:

во-первых, при $\frac{\partial v}{\partial a^2} < 0$ пороговый ток неустойчивости, возникающей самопроизвольно, без возбуждения ударом инфлектора, был выше, чем для $\frac{\partial v}{\partial a^2} > 0$ (по нашим расчетам

$$\text{в } -\ln \left| \frac{\partial v}{\partial E} \frac{2\pi f_0}{\Omega_s} \Delta E \right| \text{ раз в пределе } \left| \frac{\partial v}{\partial E} \frac{2\pi f_0}{\Omega_s} \Delta E \right| \ll 1;$$

во-вторых, при $\frac{\partial v}{\partial a^2} > 0$ неустойчивость приводила к полной (~90%) потере пучка, а при $\frac{\partial v}{\partial a^2} < 0$ и не слишком больших токах по сигналу диафрагмированного ФЭУ и по телевизору наблюдался срыв неустойчивости; пучок быстро расплывался по бетатронным фазам без потери частиц, когда амплитуда когерентных колебаний пучка, как целого, достигала некоторой величины a_{\max} . Эффект срыва неустойчивости предсказан в /2/, где получена оценка: $a_{\max} = (\delta v / 2 \frac{\partial v}{\partial a^2})^{1/2}$.

Исходя из вышеизложенного, для подавления поперечных когерентных неустойчивостей накопление и ускорение большого тока велось в режиме $\frac{\partial v}{\partial E} > 0, \frac{\partial v}{\partial a^2} < 0$; минимизация a_{\max} достигалась с помощью коррекций нелинейностей ведущего поля ($\frac{\partial v}{\partial a^2} \approx 10^{-2} \text{ см}^{-2}$).

Удлинение сгустка вследствие искажения потенциальной ямы

Такое удлинение наблюдалось при $\omega_{\text{рез}} > q\omega_0$ и $\xi = Q \frac{\omega_{\text{рез}} - q\omega_0}{\omega_{\text{рез}}} \gg 1$,

где $\omega_{\text{рез}}$ - резонансная частота пассивного резонатора, $q = 19$ - его кратность, $Q = 10^4$ - его добротность /8/. С помощью метода, описанного в /1/, был измерен некогерентный сдиг синхротронной частоты Ω_s . Кроме того, измерялось напряжение U_{19} , наведенное на пассивном резонаторе, и длина сгустка l . Экспериментальные результаты подтверждают расчет, проведенный в /5/. Например, наведенное напряжение U_{19} хорошо описывается формулой:

$$U_{19} = |Z| \gamma \cos \frac{\pi}{2(1 + \frac{U_{19}}{|Z|\gamma})}$$

Зависимости измеренных величин от тока γ приведены на рис.2. Наблюдаемое соответствие в токовой зависимости l и Ω_s свидетельствует о том, что в рассматриваемом диапазоне тока удлинение сгустка вызвано искажением потенциальной ямы.

Накопление ионов остаточного газа в пучке

При сравнительно плохом (~ 10^{-7} мм рт.ст.) вакууме мы наблюдали зависимость вертикального размера пучка от его тока, показанную на рис.3. Такую характерную "гистерезисную" зависимость можно объяснить тем, что начиная с $j_{\text{th}} \approx 20$ мА движение однозарядных ионов Ar вблизи равновесной орбиты электронов становится неустойчивым /6/ и эффективный вакуум улучшается в 2 раза (это следует из "детального

равновесия": $\frac{1}{\sigma_1} \frac{dn_1}{dt} = \frac{1}{\sigma_2} \frac{dn_2}{dt}$, $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \approx 1$;

и, следовательно, вертикальный размер уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. "Гистерезис" наблюдается из-за того, что пороговый ток J_{th} пропорционален площади поперечного сечения пучка, т.е. $\frac{J_{th\uparrow}}{J_{th\downarrow}} = 2$.

Эффект Тушека

При токах выше 50 мА ($\approx 10^{11}$ частиц) время жизни уменьшается с увеличением тока и увеличивается с ростом поперечных и продольного размеров и при увеличении числа сгустков, что можно объяснить эффектом Тушека. На накопителе ВЭШ-3 зависимость упругого рассеяния электронов внутри сгустка от степени поляризации пучка используется для абсолютной калибровки средней энергии электронов по измерению частоты прецессии их спинов, проводимому при помощи резонансной деполяризации [7]. Загрузка одного счетчика определяется электронами, вылетающими из сгустка, и пропорциональна $J^2 \sqrt{qU}/n$ при токах J выше 10 мА ($1,5 \cdot 10^{10}$ частиц), где U - ускоряющее напряжение, q - его кратность, n - число одинаковых сгустков.

При энергии 420 МэВ и расстроенном пассивном резонаторе 19-ой гармоники наблюдалось удлинение сгустка с ростом тока. Увеличение в несколько раз поперечных размеров пучка приводило к укорочению сгустка до "естественной" длины, определяемой квантовыми флуктуациями, следовательно, такое удлинение можно объяснить многократным эффектом Тушека.

Л и т е р а т у р а

1. Н.А.Винокуров, В.Н.Корчуганов, Г.Н.Кулипанов, Е.А.Переведенцев, Влияние хроничности и кубической нелинейности на кинематику бетатронных колебаний. Препринт ИЯФ СО АН СССР 76-87, Новосибирск, 1976.
2. Н.А.Винокуров, Г.Н.Кулипанов, Е.А.Переведенцев. Эффект "отрицательной" массы для нелинейной колебательной системы и его влияние на устойчивость когерентных колебаний. Препринт ИЯФ СО АН СССР 76-88, Новосибирск, 1976.
3. А.А.Kolomensky, А.Н.Lebedev. Intern. Conf. on High Energy Accel., CERN, p.115, 1959. С.Е.Nielsen, А.М.Sessler, К.Р.Symon. Intern. Conf. on High Energy Accel., CERN, p.239, 1959.
4. В.В.Белецкий. Очерки о движении космических тел, М., "Наука", 1972.
5. Н.А.Винокуров, Г.Н.Кулипанов, Е.А.Переведенцев. Исследование эффекта удлинения сгустка на накопителе ВЭШ-3. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-19, Новосибирск.
6. Н.А.Винокуров. О влиянии ионов остаточного газа на динамику пучка в накопителе. Дипломная работа. Новосибирский гос. ун-т, 1974.
7. Я.С.Дербенев и др. Прецизионные измерения энергии пучка в накопительном кольце с использованием прецессии спина поляризованных частиц. Препринт ИЯФ 76 - 64, Новосибирск, 1976.
8. В.Г.Вещеревич, М.М.Карлинер и др. Продольные эффекты при накоплении электронов в ВЭШ-3. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I, стр.397, М., "Наука", 1973.

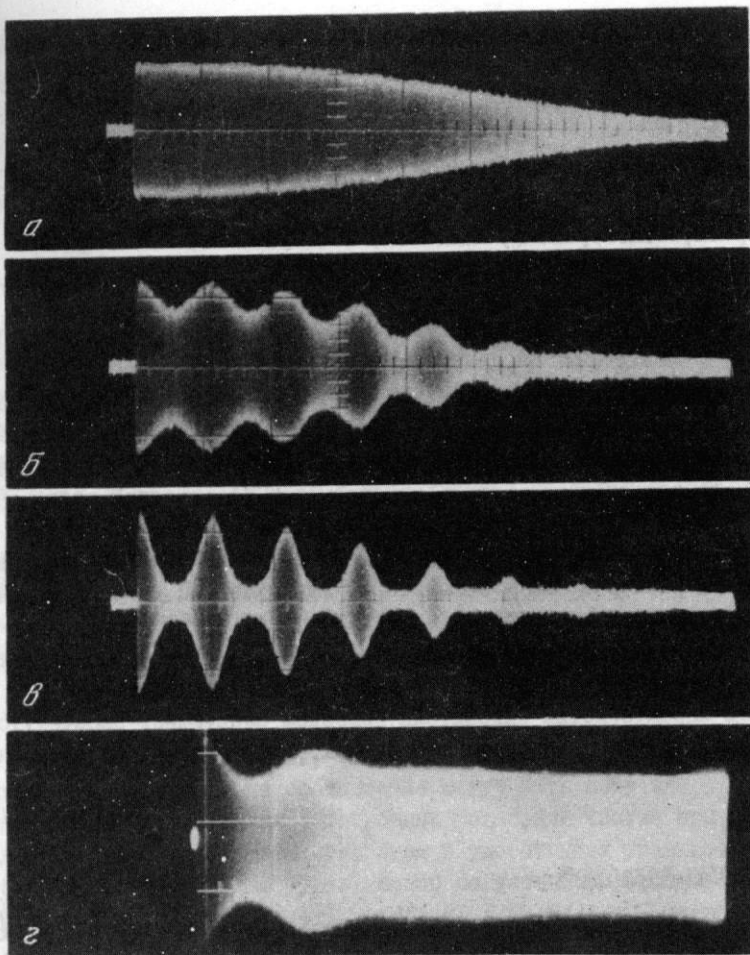


Рис. 1. Осциллограммы сигналов с резонансного усилителя

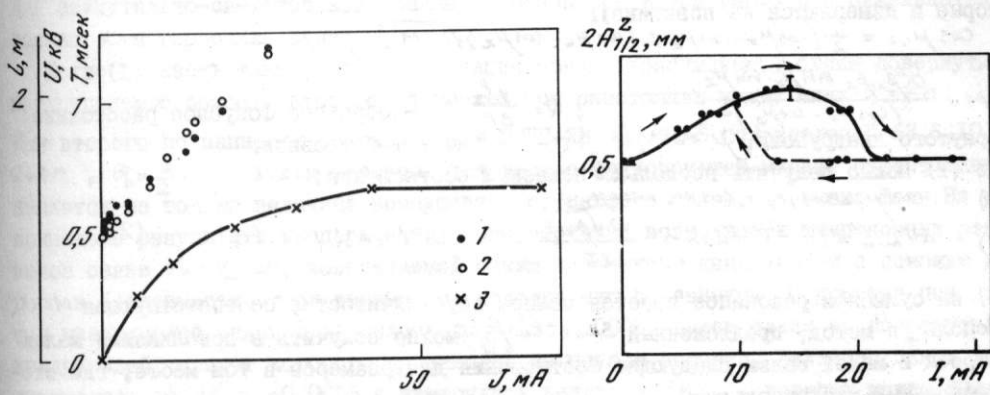


Рис. 2. Зависимость длины сгустка l , периода синхронных колебаний T и наведенного напряжения U_{19} от тока пучка J

1 - T ; 2 - l ; 3 - $U = U_{19}$

Рис. 3. Зависимость вертикального размера пучка от тока

80. ВЛИЯНИЕ СВЯЗИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЕ НА РАЗМЕРЫ ПУЧКА

И.Б.Вассерман, Ф.М.Израйлев, И.А.Кооп, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов
Институт ядерной физики СО АН СССР

В в е д е н и е

Подавление связи поперечных колебаний частиц в пучке имеет важное значение для повышения светимости накопителей со встречными пучками [4]. Уменьшение вертикального размера представляет интерес также при работе с синхротронным излучением, так как позволяет использовать монохроматор без входной щели. Кроме того, выполнение условия $\Theta \ll \frac{1}{\gamma}$, где Θ — собственные углы в пучке, γ — релятивистский фактор, дает возможность работать с поляризованным излучением. Естественный вертикальный размер пучка в накопителе, как известно, определяется связью радиальных и вертикальных колебаний частиц в пучке. Экспериментальное изучение этого эффекта проводилось на накопителе ВЭШ-2М [1], в котором для регулирования связи были установлены 6 квадрупольных линз, повернутых на 45° .

Из основных характеристик накопителя приведем следующие: рабочая точка $V_z = 3,05$; $V_x = 3,08$ и может меняться в широких пределах. Число элементов периодичности $N = 4$.

Бетатронные колебания

Для получения аналитических выражений нормальных частот бетатронных колебаний и размеров пучка удобно воспользоваться матричным аппаратом, который дает возможность получить точные аналитические результаты для случая, когда связь создается одним элементом. Из матрицы перехода кольца со связью (создающейся одним тонким квадруполем, повернутым на 45°) можно получить для частот нормальных колебаний (которые и измеряются на практике):

$$\cos \mu_{1,2} = \frac{1}{2} [\cos \mu_x + \cos \mu_z \pm (\cos \mu_x - \cos \mu_z) \sqrt{1+M}], \quad (1)$$

где $M = \frac{Q^2 \beta_x \beta_z \sin \mu_x \cdot \sin \mu_z}{(\cos \mu_x - \cos \mu_z)^2}$, $Q = \frac{gl}{\beta p}$ — обратное фокусное расстояние повернутого квадруполя, $\mu_i = 2\pi V_i$; $V_{x,z}$ — частоты без связи.

Из (1) можно получить несколько полезных соотношений:

$$1) \quad \cos \mu_1 + \cos \mu_2 = \cos \mu_x + \cos \mu_z, \\ 2) \quad \Delta V_{min} = |V_1 - V_2|_{min} = \frac{Q \sqrt{\beta_x \beta_z}}{2\pi} \quad \text{при } |V_1 - V_2| \ll 1, \quad (2)$$

3) на суммовом резонансе имеется полоса неустойчивости, соответствующая $M < -1$. Используя метод, предложенный *Baxetti* [3], можно получить в приближении малых расстройек и малой связи следующие соотношения для размеров в том месте, где стоит повернутый квадруполь:

$$\frac{\bar{x}_n^2}{\bar{x}_0^2} = \frac{1}{2} \frac{2+M}{1+M}, \quad \frac{\bar{z}_n^2}{\bar{z}_0^2} = \frac{\sin \mu_z \cdot a^2}{\sin \mu_x \cdot b^2}, \quad \text{где} \\ a^2 = \frac{Q^2 \beta_x \beta_z \cdot \sin \mu_x \sin \mu_z}{4}, \quad b^2 = \frac{1}{4} (\cos \mu_x - \cos \mu_z)^2 (1+M), \quad a \ll 1, \quad b \ll 1.$$

Вблизи разностного резонанса ($\frac{\cos \mu_x}{\cos \mu_z} \approx \frac{\sin \mu_x}{\sin \mu_z} \approx 1$)

$$\bar{x}_n^2 / \bar{x}_0^2 = \frac{1+2c^2}{1+c^2},$$

$$\bar{z}_n^2 / \bar{z}_0^2 = \frac{1}{1+c^2}, \quad \text{где}$$

(3)

$$c^2 = \left(\frac{\Delta V}{\Delta V_{\min}} \right)^2, \quad \Delta V = V_x - V_z - \kappa.$$

На суммовом резонансе ($\frac{\cos \mu_x}{\cos \mu_z} \approx -\frac{\sin \mu_x}{\sin \mu_z} \approx 1$)

$$\bar{x}_n^2 / \bar{x}_0^2 = \frac{2c^2-1}{c^2-1},$$

$$\bar{z}_n^2 / \bar{z}_0^2 = \frac{1}{c^2-1}, \quad \Delta V = V_x + V_z - \kappa,$$

κ - номер гармоники резонанса,

где $\sqrt{\bar{x}_0^2}$ и $\sqrt{\bar{z}_0^2}$ - размеры на резонансе связи $V_x - V_z = \kappa$.

Экспериментально измерялся вертикальный размер на полувисоте с помощью системы, описанной в [5]. Величина связи определялась с помощью измерения ΔV_{\min} , которую с помощью повернутых квадрупольей можно было уменьшить практически до нуля. На рис. 1 показаны результаты измерения вертикального размера вблизи резонансов $V_x - V_z = 0$ и $V_x + V_z = 6$ для ВЭШ-2М с естественной связью и с подавленной. Кроме основного, видны синхробетатронные резонансы, отстоящие от основного на $\Delta V = V_S$, где V_S - частота синхротронных колебаний. Отдельно приведен участок вблизи резонанса $V_x - V_z = 0$, где проведена также теоретическая кривая (3). Отличие теоретической кривой от экспериментальной вдали от резонанса, по-видимому, объясняется тем, что I-я не учитывает влияние синхробетатронных резонансов. Нелинейные разностные резонансы 4-го и более высоких порядков не оказывают влияния на размер одного пучка.

В случае двух и более возмущений, создающих связь, матричный метод становится весьма сложным. Некоторые общие соотношения могут быть получены с помощью метода усреднения из уравнений малых бетатронных колебаний частиц при наличии связи [2]. Приведем основные результаты. Разлагая в укороченных уравнениях члены под знаком усреднения по гармоникам Фурье, можно получить соотношение (предполагается, что продольное поле отсутствует) $\ell - nN = \kappa$, где κ - гармоника резонанса, N - число элементов периодичности, ℓ - гармоника возмущения, создающего связь, n - целое.

Для накопителя ВЭШ-2М, где наиболее важен резонанс $V_x - V_z = 0$ и $N=4$, $\ell = 4n$, т.е. на резонанс нулевой гармоники сказываются 0, 4, 8 ... гармоники связи. Для азимутально-симметричной машины на резонанс κ -ой гармоники сказывается только κ -я гармоника связи.

Можно показать также, что компенсация связи, возбуждаемой одним повернутым квадруполем с помощью второго, возможна при расстоянии между ними $\theta_0 = \frac{\pi}{2} n$.

Для второго по важности резонанса для ВЭШ-2М $V_x + V_z = 6$ получается $\ell = 2, 6, 10, \dots, 2+4n$, $\theta_0 = \frac{\pi}{2} n$. Таким образом, для жестко-фокусирующей машины существенным является не только величина возмущения, создающего связь, но и его фаза. На рис. 2 приведены результаты экспериментального изучения возможности компенсации резонанса связи $V_x - V_z = 0$, возбуждаемой одним повернутым квадруполем с помощью другого в зависимости от их взаимного расположения по азимуту. С помощью повернутых квадрупольей связь подавлялась до $\Delta V_{\min} < 0,0003$. Затем одним из повернутых квадрупольей, азимут которого принимался за начало отсчета, величина связи увеличивалась до $\Delta V_{\min} = 0,0055$ и измерялась величина ΔV_{\min} , которую можно было получить, подавляя связь попеременно каждым из оставшихся квадрупольей в отдельности. Возможность компенсации связи уменьшается при увеличении $\Delta \theta$. Результат согласуется с полученными выше соотношениями, имеется сильная зависимость от места нахождения повернутого квадруполя, полная компенсация происходит при

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} n \quad (\Delta \theta = \rho).$$

Во всех измерениях, описанных в настоящем параграфе искажения орбиты поддерживались в пределах ± 1 мм, а квадратичная нелинейность $|E \cdot \frac{\partial^2 V_{k,z}}{\partial E^2}| < 0,6$.

Синхротронные колебания

Синхротронные колебания приводят к новым эффектам, влияющим на размеры пучка. При наличии связи для вертикальных колебаний можно ввести функцию $\psi_z(\theta)$ такую, что для частицы имеющей отклонение энергии от равновесной орбита будет определяться выражением: $z = \psi_z \bar{r} \cdot \frac{\Delta E}{E}$. Подставляя это выражение, а также аналогичное для x -координаты в уравнение бетатронных колебаний со связью [2], получим (все обозначения согласно [2]):

$$\psi_z'' + g_z \psi_z = \frac{e b_0}{\rho c k_z^2} \psi_x' - \frac{e}{\rho c k_z^2} \frac{\partial \psi_x (1 + \chi x)}{\partial x} \psi_x$$

Таким образом, стационарное решение для ψ_z при наличии связи имеет такой же вид, как и для замкнутой орбиты по z при наличии возмущения и носит резонансный характер при $V_x \sim k$.

Второй механизм связан с наличием искажений орбиты и зависимостью частоты бетатронных колебаний от энергии и носит такой же резонансный характер. Действительно, пусть ΔV_z - разброс частот в пучке, z_0 - искажение орбиты равновесной частицы. Используя уравнение для искажения орбиты по z и оставляя только резонансный член, получаем для орбиты частицы, имеющей отклонение от равновесной энергии, для ВЭП-2М ($V_z \sim 3$) $z - z_0 = -z_0 \frac{\Delta V_z}{V_z - g} E \frac{\partial V_z}{\partial E} \frac{\Delta E}{E}$, что соответствует появлению $\psi_z = -z_0 \frac{\Delta V_z}{V_z - g} E \frac{\partial V_z}{\partial E} \frac{1}{R}$. Полное ψ_z определяется суммой обоих эффектов. Квантовые флуктуации при этом возбуждают наряду с радиальными вертикальные бетатронные и синхротронные колебания.

На рис.3 показаны результаты измерения вертикального размера пучка в зависимости от искажения вертикальной орбиты для разных величин $E \cdot \frac{\partial V_z}{\partial E}$ и V_z , что дает возможность оценить вклад в размер различных эффектов. Видно, что влияние V_z может быть весьма существенным, особенно вблизи целого резонанса. Для каждой кривой измерялось ψ_z/ψ_x при $z_0 = 3$ мм, для чего менялась частота обращения и измерялось отношение $\frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{\psi_z}{\psi_x}$. Искажение орбиты, ψ_z и размер пучка изменялись в одном и том же месте.

Таким образом, для подавления вертикального размера существенным является: 1) уменьшение искажений орбиты; 2) ахроматизм системы; 3) соответствующий выбор рабочей точки; 4) наличие достаточного количества элементов, компенсирующих связь.

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, стр.318. М., "Наука", 1973.
2. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. М., Физматгиз, 1962.
3. Bazetti, *Dimensioni con frequenze disuguali e debole accoppiamento*, T-31, Frascati, 1971
4. И.Б.Вассерман и др. Получение высокой светимости на электрон-позитронном накопителе ВЭП-2М. Настоящий сборник, доклад № 42.
5. Э.И.Зинин, В.П.Кутовой. Система измерений и контроля основных параметров пучка в накопителе ВЭП-2М. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, стр.318. М., "Наука", 1975.

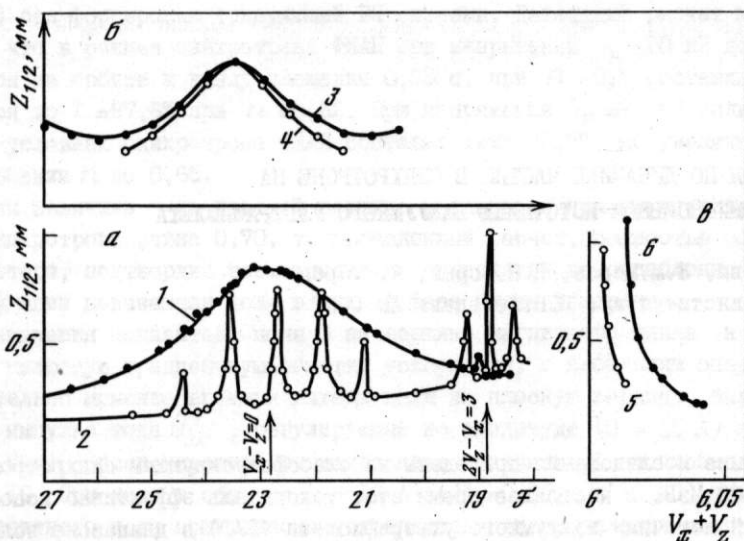


Рис. 1. Зависимость вертикального размера от рабочей точки (F – величина, пропорциональная градиенту квадрупольных линз)

а – вблизи резонанса $\nu_x - \nu_z = 0$:

1 – $\Delta\nu_{\text{крит}} = 0,0055$, 2 – $\Delta\nu_{\text{крит}} = 0,0009$; 6 – то же, $\Delta\nu_{\text{крит}} = 0,0012$:

3 – эксперимент, 4 – теория; в – вблизи резонанса $\nu_x + \nu_z = 6$:

5 – связь подавлена, 6 – естественная связь

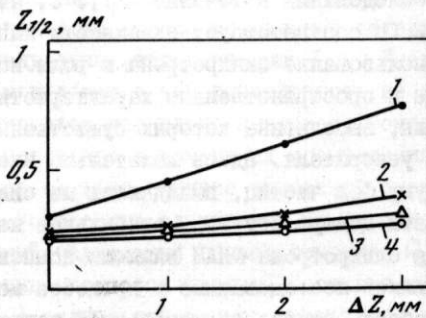
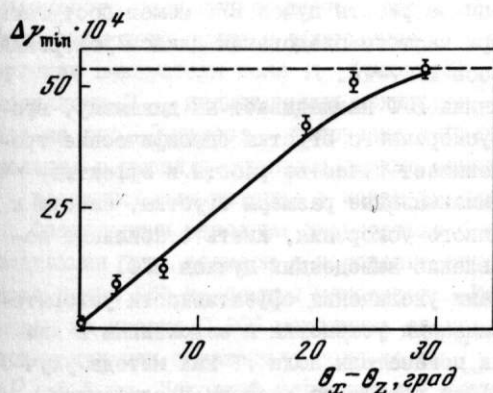


Рис. 2. Зависимость величины связи от места расположения повернутого квадруполь ($\theta_{x,z} = \int_{s_0}^s \frac{ds}{\nu_{x,z} \beta_{x,z}}$, $\nu_x = \nu_z = 3,07$).

Рис. 3. Зависимость вертикального размера от искажений орбиты

1 – $\nu_z = 3,03$, $\psi_z/\psi_x = 0,4 \pm 0,06$, $E \frac{\partial \nu_z}{\partial E} = -2,7$;

2 – $\nu_z = 3,11$, $\psi_z/\psi_x = 0,11 \pm 0,06$, $E \frac{\partial \nu_z}{\partial E} = -2,7$;

3 – $\nu_z = 3,03$, $\psi_z/\psi_x = 0,06 \pm 0,06$, $|E \frac{\partial \nu_z}{\partial E}| < 0,1$;

4 – $\nu_z = 3,11$, $\psi_z/\psi_x = 0 \pm 0,06$, $|E \frac{\partial \nu_z}{\partial E}| < 0,1$

82. КОГЕРЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОННОГО ПУЧКА С ОХЛАЖДАЮЩИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ

Н.С. Диканский, Д.В. Пестриков

Институт ядерной физики СО АН СССР

В работах [1, 2] показано, что с использованием электронного охлаждения (Э.О.) возможно накопление протонных (антипротонных) пучков с малым амплитудным и энергетическим разбросом ($a_p \sim 0.02$ см; $\Delta p/p \sim 10^{-5}$). В таких условиях накопление больших токов может ограничиваться когерентными неустойчивостями накапливаемого пучка. Помимо этого усиление когерентных флуктуаций может приводить к разогреву пучка протонов. В накопителях с Э.О. причиной появления таких неустойчивостей, кроме взаимодействия пучка с различными элементами вакуумной камеры, может быть когерентное взаимодействие протонного пучка с охлаждающим электронным потоком.

В установках для Э.О. протонов с энергией в области нескольких ГэВ для уменьшения влияния дефокусирующих факторов электронный пучок помещается в продольное магнитное поле. При этом, из-за больших частот ларморовского вращения, поперечные (к магнитному полю) степени свободы электронов замагничены по отношению к низкочастотным коллективным полям; в продольном направлении на участке охлаждения электроны движутся свободно. Взаимодействие с протонным пучком приводит к диссипации энергии коллективного движения протонов электронным потоком за счёт возбуждения колебаний плотности электронов с непрерывным (в области низких частот) спектром. В физическом отношении механизм диссипации энергии такой же, как в задаче о взаимодействии протонного пучка с полем ТЕМ волны в согласованных линиях [3]. Исходя из этой аналогии можно ожидать, что взаимодействие электронного и протонного пучков в накопителе с Э.О. будет приводить к неустойчивости азимутально-однородного пучка протонов и вносить "быстрое затухание" в коллективное движение сгруппированного пучка. Исследование коллективной устойчивости пучка протонов, взаимодействующего с охлаждающим электронным потоком, может быть выполнено обычным способом [3].

Пусть $F(\vec{r}, \vec{p}, t)$ - плотность протонов в фазовом пространстве. Колебания протонов около равновесной орбиты будем описывать канонически сопряженными переменными действие $I_\alpha(\vec{r}, \vec{p}, t)$ - фаза $\psi_\alpha = \psi_\alpha(\vec{r}, \vec{p}, t)$. В стационарном состоянии $\dot{I}_\alpha = 0$, $\dot{\psi}_\alpha = \omega_\alpha = \omega_0 \chi_\alpha$, а распределение F не зависит от фаз колебаний: $F = F_{st}(\mathbf{I})$.

В возбужденном состоянии:

$$F = F_{st}(\mathbf{I}) + \tilde{F}(\mathbf{I}, \psi, t) = F_{st} + \sum_{m \neq 0} F_m(\mathbf{I}) e^{im_\alpha \psi_\alpha - i\omega t}, \quad m_\alpha \psi_\alpha \equiv \sum_{\alpha} m_\alpha \psi_\alpha.$$

В первом приближении по взаимодействию с наведенными полями спектр коллективных колебаний пучка близок к невозмущенному $\omega \approx m_\alpha \omega_\alpha$, а нормальные колебания определяются гармониками функции распределения $F_m(\mathbf{I}) \exp(im_\alpha \psi_\alpha - i\omega t)$ [3]. Целые числа $\{m_\alpha\}$ определяют мультипольность колебания.

Для упрощения расчёта декрементов колебаний протонного пучка мы будем предполагать:

I. движение электронного и протонного пучков нерелятивистским;

2. длина протонного пучка много больше поперечных размеров вакуумной камеры накопителя $l_b \gg l_1$;
 3. поперечные размеры протонного пучка много меньше поперечных размеров электронного пучка $a_p \ll a_e$.

В таких предположениях уравнение, определяющее спектр коллективных колебаний протонного пучка, взаимодействующего с электронным потоком, может быть записано в виде:

$$(\omega - m_\alpha \omega_\alpha) F_m = - 4\pi N e^2 m_\alpha \frac{\partial F_{st}}{\partial I_\alpha} \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3 k^2} \overline{\exp[i\vec{k}\vec{r}(I, \varphi, \theta_s)]} \tilde{\delta}(\vec{k}, \omega, \theta_s). \quad (I)$$

Здесь N - число протонов; e - заряд электрона; черта означает усреднение по равновесному азимуту $\theta_s = \omega_0 t$; $\tilde{\delta}(\vec{k}, \omega, \theta_s)$ - Фурье-гармоника искажения плотности электронов, вызванного коллективным движением протонов; вклад собственных полей протонного пучка, не меняющий декрементов коллективных колебаний, опущен.

Искажение плотности электронов $\tilde{\delta}(\vec{k}, \omega, \theta_s)$, вызванное длинноволновыми коллективными полями $k_{||} \ell \ll v_0/\Delta$, $k_{||} \ell_1 \ll 1$ (ℓ - длина участка охлаждения, Δ - разброс продольных скоростей электронов, v_0 - их средняя скорость) с учётом замагниченности поперечного движения электронов, определяется выражением:

$$\tilde{\delta}(\vec{k}, \omega, \theta_s) = - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega_n^2 k_{||}^2}{k^2} \frac{b_{k_{||}n} \exp(-in\theta_s)}{(\omega + n\omega_0 - k_{||}v_0)^2 - \omega_n^2 \frac{k_{||}^2}{k^2}} \int d\Gamma (e^{i\vec{k}_\perp \vec{r}_\perp + in\varphi}) F_m, \quad (2)$$

где ω_n - частота плазменных колебаний электронов ($\omega_n^2 = 4\pi b_0 r_e^2 c^2$), b_0 - плотность электронного пучка, r_e - классический радиус электрона, c - скорость света; \vec{k}_\perp - поперечные к равновесной орбите компоненты волнового вектора ($k^2 = k_{||}^2 + k_\perp^2$); фактор

$$b_{k_{||}n} = \frac{1}{\pi} \frac{\sin \frac{\ell}{2R} (kR - n)}{(kR - n)}$$

отвечает взаимодействию пучков на ограниченном участке орбиты длиной ℓ , $2\pi R$ - периметр орбиты; $\varphi = \theta - \theta_s$; $d\Gamma$ - элемент фазового объёма протонов.

Характер возбуждения электронного пучка определяется величиной плотности электронов b_0 . При $\omega_n \ell_1 / v_0 \gg 1$ происходит быстрая (за время порядка $1/\omega_n \ll \ell/v_0$) компенсация пространственного заряда возмущения плотности протонов F_m электронами:

$$\tilde{\delta}(\vec{k}, \omega) \rightarrow \int d\Gamma (e^{i\vec{k}\vec{r}(I, \varphi, \theta_s)}) F_m.$$

Это приводит к уменьшению когерентного сдвига частоты за счёт собственных полей протонов в $1-\eta$ раз (η - доля орбиты накопителя, занятая электронным пучком).

В обратном предельном случае $\omega_n \ell_1 / v_0 \ll 1$, (2) можно записать в виде:

$$\tilde{\delta}(\vec{k}, \omega, \theta_s) = - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega_n^2 k_{||}^2}{k^2} \frac{b_{k_{||}n} \exp(-in\theta_s)}{(\omega + n\omega_0 - k_{||}v_0)^2} \int d\Gamma (e^{i\vec{k}_\perp \vec{r}_\perp + in\varphi}) F_m, \quad (2.a)$$

отвечающем возбуждению в электронном пучке волн с непрерывным спектром $\omega = k_{||}v_0$.

Подставив (2.a) в (I), получим уравнение $1/4$:

$$\Delta \omega_m F_m = - 4\pi e^2 N \omega_n^2 m_\alpha \frac{\partial F_{st}}{\partial I_\alpha} \sum_n \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3 k^4} \frac{k_{||}^2 b_{k_{||}n} V_{mn}}{(m_\alpha \omega_k + n\omega_0 - k_{||}v_0 + i\varepsilon)^2} \int d\Gamma V_{mn}^* F_m, \quad (3)$$

где $\Delta \omega_m = \omega - m_\alpha \omega_\alpha$; $\varepsilon \rightarrow +0$ - определяет правило обхода; $V_{mn} = (\exp[i\vec{k}_\perp \vec{r}_\perp + in\varphi])_m$. Ввиду нерезонансного характера взаимодействия пучков частота ω в правой части (3) заменена невозмущенным значением $m_\alpha \omega_\alpha$.

I. Вычислим сначала декременты азимутально-однородного пучка протонов $F_{st} = F_0(I_1)P(\Delta p)$. Для простоты ограничимся рассмотрением для аксиально-про-

дольных мод $\omega \approx m_2 \omega_2 + n \omega_0$ плоского пучка протонов с распределением:

$$F_0(I_1) = F_0(I_x, I_z) = \frac{\delta(I_x)}{2\pi I_{z0}} \begin{cases} 1, & I_z \leq I_{z0}, \\ 0, & I_z > I_{z0}. \end{cases} \quad (4)$$

Невозмущенные колебания протонов будем описывать формулами

$$z = a_z \cos \psi_z; \quad p_z = -\frac{P_3 \gamma_z a_z}{R} \sin \psi_z; \quad \varphi = \theta - \theta_z;$$

$$I_z = \frac{P_3 \gamma_z a_z^2}{2R}; \quad \dot{\psi}_z = \omega_z = \omega_0 \gamma_z; \quad \Delta p = p - P_3,$$

P_3 - импульс протона на равновесной траектории.

Для азимутально-однородного пучка нормальными решениями (3) являются гармоники $F_m(I_x, I_z) \exp(in\varphi)$, а частота ω , в отсутствии разброса частот протонов, определяется соотношением:

$$\Delta \omega_{mn} = \frac{Ne^2 \omega_n^2 R m_2 L_m}{\pi P_3 \gamma_z} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk_{||}}{2\pi} \frac{k_{||}^2 \epsilon_{k_{||}n}^2}{(m_2 \omega_2 + n \omega_0 - k_{||} v_0 + i\epsilon)^2}. \quad (5)$$

Выполнив в (5) интегрирование, получим декременты колебаний $\delta = -Im\omega$. Для не слишком высоких мод $m_2 \gamma_z \eta \ll 1$, $n \ll R/\epsilon_1$ декременты определяются выражением

$$\delta_{mn} = -\frac{N \sigma_0 r_p r_e c \eta^2}{\gamma_z \beta^3} m_2 (m_2 \gamma_z + n) L_m, \quad (6)$$

где $r_p = e^2/Mc^2$ - классический радиус протона, $\beta = v/c$, а фактор

$$L_m = \begin{cases} \ln(\epsilon_1/a_e), & |m_2| = 1, \\ \frac{1}{|m_2|(m_2^2 - 1)}, & |m_2| \neq 1. \end{cases} \quad (7)$$

Неустойчивы моды, для которых $m_2(m_2 \gamma_z + n) > 0$. Однако из-за малой величины инкрементов, реальной опасности эта неустойчивость, по-видимому, не представляет и может быть легко подавлена разбросом частот в протонном пучке.

2. Взаимодействие сгруппированного пучка протонов с охлаждающим электронным потоком приводит к появлению "быстрого затухания" когерентных колебаний протонного пучка. Прямое решение уравнения (3) в этом случае затруднительно, поэтому для оценки декрементов воспользуемся экстраполяцией спектра (3) из коротковолновой области /3/. Кроме того, учтем, что из-за большой плотности затухшего протонного пучка разброс бетатронных частот за счёт собственных полей пучка существенно превышает частоту синхротронных колебаний. Это означает, что при расчете декрементов синхротронные колебания протонов можно не учитывать.

В коротковолновом приближении $k \ll k_n \epsilon_0 \ll \epsilon_0 v_0 / \epsilon \Delta$ нормальные решения /3/ близки к $\exp(ix \frac{\theta}{\epsilon_0} - im_2 \gamma_z \theta)$, $x = k_n \epsilon_0$, а декременты колебаний определяются выражением:

$$\delta \approx \frac{2}{3\pi^{3/2}} \frac{N \sigma_0 r_p r_e c \eta m_2^2 L_m}{\beta^3} \left(\frac{\ell}{\epsilon_0}\right)^3 x^2, \quad 1 \ll x \ll \frac{\epsilon_0 v_0}{\epsilon \Delta}. \quad (8)$$

При получении (8) азимутальное распределение протонов было выбрано гауссовым

$$F_{s\ell} = F_0(I_1) P(\Delta p) \frac{\exp[-(\frac{\theta - \theta_0}{\epsilon_0})^2]}{\epsilon_0 \sqrt{\pi}}, \quad \epsilon_0 = 2R\theta_0.$$

Максимальное значение δ в (8) (при $x = \frac{\epsilon_0 v_0}{\epsilon \Delta}$) совпадает с декрементом "быстрого затухания", полученного в /4/ для δ - образного распределения протонов по амплитудам синхротронных колебаний, а сумма декрементов $\sum \delta(x)$ даёт декремент точечного пучка /4/.

Полагая в (8) $\chi = 1$, приходим к выражению, позволяющему оценить декремент "быстрого затухания" колебания m_2 - мультипольности:

$$\delta \approx \frac{2}{3\pi^{3/2}} \frac{N b_0 r_p r_e c \eta m_2^2 L m_2 \left(\frac{\ell}{\gamma \ell_0}\right)^3}{\gamma^5 \beta^3}, \quad \ell_0 \gg \ell \frac{\Delta}{v} \quad (9)$$

(здесь приведена полная зависимость декремента от энергии). Отметим, что из-за сильной нелинейности наведенных полей на размере пучка, декременты в (6) и (9) слабо (как $1/m_2!$) зависят от номера мультипольности колебания m_2 .

Таким образом, в накопителе с Э.О., наряду с демпфированием некогерентных колебаний, электронный пучок осуществляет демпфирование когерентных колебаний накапливаемого пучка. При этом наиболее эффективно демпфируются колебания сгустков, длина которых существенно меньше длины участка охлаждения $\ell_1 \ll \gamma \ell_0 \ll \ell$.

Оценим время "быстрого затухания" для установки НАП-М [2]:
 $\beta = 0.35$, $\ell = 100$ см, $\eta = 0.02$,
 $b_0 = 10^8$ см⁻³. При числе протонов $N = 10^{10}$ и длине сгустка протонов $\ell_0 = 0.1\ell$ время затухания $\tau = \delta^{-1} = 0.25$ сек сравнимо с временем затухания некогерентных колебаний.

Авторы благодарны Я.С.Дербеневу за многочисленные полезные обсуждения и интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

1. G.I.Budker, Ya.S.Derbenev, et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22, N5, 2093, (1975).
2. G.I.Budker, N.S.Dikaasky, et al. "Experimental study of electron cooling". Particle Accelerators, v.7, №4, 1976. Препринт ИЯФ 76-33 СО АН СССР, Новосибирск, 1976.
3. Я.С.Дербенев, Н.С.Диканский, Д.В.Пестриков. Препринт ИЯФ 72-7 СО АН СССР, (1972).
4. Н.С.Диканский, Д.В.Пестриков. Препринт ИЯФ 76-40 СО АН СССР, Новосибирск, 1976.

100 СИСТЕМА ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОТОН-АНТИПРОТОННОЙ КОНВЕРСИИ

Б.Ф.Баянов, Г.И.Будкер, Г.С.Виллевалд, Т.А.Всеволожская, В.Н.Карасик,
Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский

Институт ядерной физики СО АН СССР

В применении к предлагаемым Институтом ядерной физики проектам протон-антипротонных встречных пучков на основе метода электронного охлаждения антипротонов [1,2], в институте разрабатываются системы для эффективной конверсии протонов в антипротоны. Значения акцептанса накопителя $\mathcal{K}\mathcal{E}$ в указанных проектах составляют ~ 70 и ~ 8 мрад.см при одном и том же значении импульса антипротонов $P=1,8$ ГэВ/с, что требует применения существенно различных способов формирования антипротонного пучка.

Угловое распределение антипротонов определяется из выражения для теплового распределения их поперечных импульсов

$$\rho(p_1) dp_1^2 \propto \frac{d^3p}{\exp(E/T) + 1},$$

хорошо согласующегося с экспериментальными данными при $T \sim m_{\mathcal{K}}$ - массе \mathcal{K} -мезона [3]. С учетом малости отношения T/m для антипротонов $\rho(p_1) \sim \sqrt{m_1} \exp(-m_1 c^2/T)$, где $m_1 = \sqrt{p_1^2 + m^2 c^2}/c$, откуда для достаточно малых значений $p_1, p_1^2 \ll m^2 c^2$,

$$\rho(\theta) d\Omega \sim \exp(-\theta^2 p^2 / 2mm_{\mathcal{K}}c^2) d\Omega$$

т.е. гауссовское распределение со средним квадратом угла $\langle \theta^2 \rangle \cong 2mm_{\mathcal{K}}c^2/p^2$.

Среднеквадратичный эмитанс антипротонного пучка, определяемый как

$\mathcal{E}_p = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle \langle r^2 \rangle - \langle r\theta \rangle^2}$, на выходе мишени длиной ℓ при бесконечно тонком протонном пучке равен $\mathcal{E}_p \cong \langle \theta^2 \rangle \ell / 2\sqrt{3}$. При длине мишени, отвечающей максимуму

полного числа антипротонов, равной в вольфраме ~ 7 см при импульсе антипротонов ~ 2 ГэВ/с, $\mathcal{K}\mathcal{E}_p \cong 0,5$ рад.см. С учетом конечного радиуса протонного пучка r_p при однородном распределении частиц по его сечению $\mathcal{E}_p = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle (\ell^2 \langle \theta^2 \rangle / 12 + r_p^2 / 2)}$,

откуда условие тонкости протонного пучка есть $r_p^2 / 2 \ll \ell^2 \langle \theta^2 \rangle / 12 = \langle r_p^2 \rangle$,

где $\sqrt{\langle r_p^2 \rangle}$ - среднеквадратичный радиус эффективного источника антипротонов.

Эффективность захвата в акцептанс \mathcal{E} - отношение числа антипротонов заданного интервала импульсов в пределах акцептанса на выходе мишени к числу рождающихся в этом интервале в результате неупругого взаимодействия с ядрами всех первичных протонов - для согласованных акцептанса и эмитанса пучка есть

$$F \cong \frac{8}{3} \exp\left(-\frac{\ell}{\rho_{яд}^{(in)}}\right) \frac{\mathcal{E}}{\langle \theta^2 \rangle \ell_{яд}^{(in)}} \cdot \left(1 - \frac{1.6 \mathcal{E}}{\ell \langle \theta^2 \rangle} + \dots\right),$$

где $\ell_{яд}^{(in)}$ - длина неупругого ядерного взаимодействия протонов, равная в вольфраме ~ 10 см. Длина мишени, отвечающая максимуму F , есть $\ell_{опт} \cong \sqrt{1.6 \mathcal{E} \ell_{яд}^{(in)} / \langle \theta^2 \rangle}$. Для акцептанса НАП $1/1$, $\mathcal{K}\mathcal{E} = 70$ мрад.см, $\ell_{опт} \cong 2,4$ см, $F \sim 0.05$. Малое значение эффективности захвата объясняется как большим фазовым объемом антипротонного пучка, так и далеко не полным использованием протонов при указанном значении ℓ . При удлинении мишени увеличение эмитанса пучка приводит к уменьшению числа частиц в пределах акцептанса, более быстрому, чем увеличение числа их за счет повышения ядерной эффективности мишени.

Применение фокусировки антипротонов непосредственно на мишени магнитным полем тока, пропускаемого вдоль оси пучка [4], устраняет зависимость эмитанса от дли-

ны мишени и позволяет увеличить её до значения, отвечающего максимуму ядерной эффективности, l_m . Среднеквадратичный эмитанс в этом случае равен $\epsilon_p \approx \langle \theta^2 \rangle / 2\sqrt{K}$, где $K = \frac{e}{pc} \cdot \frac{dH}{dr}$, эффективность захвата $F = \frac{\sigma_{in}}{\bar{\sigma}_{in}} \exp\left(-\frac{\sigma_{in} l_m}{\bar{\sigma}_{in}}\right) \cdot \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{EVK}{\langle \theta^2 \rangle}}\right]^2$, $\sqrt{K} l_m \gg 1$, где σ_{in} и $\bar{\sigma}_{in}$ — сечения неупругого взаимодействия протонов и антипротонов. Для эффективного формирования пучка в пределах акцептанса $\mathcal{H}\epsilon = 70$ мрад.см при $pc \sim 2$ ГэВ требуется поле $\sim 1,5$ Мэ на поверхности мишени диаметром $\sim 2,5$ мм, что может быть достигнуто лишь во взрывном режиме работы мишени. С увеличением акцептанса или импульса частиц требуемое поле уменьшается, однако, одновременно уменьшается и выигрыш в эффективности захвата по сравнению с мишенью без поля оптимальной длины. При малых ϵ требуемая величина поля оказывается недостижимой даже во взрывном режиме.

Развитие техники литиевых линз позволяет применить при малых значениях акцептанса другой способ формирования антипротонного пучка, состоящий в использовании нескольких коротких мишеней, между которыми помещаются линзы, передающие изображение антипротонного пучка с мишени на мишень. При этом поперечные фазовые объемы антипротонов со всех мишеней совмещаются друг с другом, и суммарный эмитанс не выходит за пределы эмитанса с одной мишени. Оптимальная длина мишени в зависимости от числа их есть $l_{opt}^{(n)} \approx l_{opt} / \sqrt{n}$, и эффективность захвата в акцептанс ϵ — $F \approx n \exp(-2n\epsilon / \rho_{rd}^{(in)}) \cdot \frac{8}{3} \epsilon / \langle \theta^2 \rangle \rho_{rd}^{(in)}$.

Если число мишеней равно 4, оптимальная длина каждой из них для $\mathcal{H}\epsilon = 8$ мрад.см и $pc = 1,8$ ГэВ составляет $\sim 3,5$ мм. Среднеквадратичный радиус антипротонного пучка на мишенях равен 0,3 мм, угол, захватываемый в акцептанс, $\theta_m = 0,16$ рад. Фокусное расстояние линз ограничивается условием малости приращения эмитанса пучка за счет хроматической аберрации $2f\theta_m \frac{\Delta p}{p} \leq \sqrt{\langle r_p^2 \rangle}$, что при $\Delta p/p \approx 5\%$ означает $f \leq 1,6$ см. Этому условию удовлетворяет литиевая линза, занимающая весь промежуток между мишенями длиной 10 см, с градиентом поля $\sim 0,6$ Мэ/см, диаметром 1 см и полем на поверхности ~ 300 кэ.

Результаты исследования поведения лития в магнитном поле амплитудой вплоть до 300 кэ подробно описаны в [5]. На их основе разработана линза с полем 200 кэ на поверхности, диаметром 12 мм и длиной 100 мм, предназначенная для фокусировки протонов на мишень (рис.1). Фокусное расстояние линзы при $pc = 76$ ГэВ равно 75 см, приращение эмитанса пучка за счет рассеяния в линзе $3 \cdot 10^{-5}$ рад.см. Линза питается импульсом тока длительностью ~ 600 мкс и амплитудой 600 кА. Доработка этой линзы для использования в описанной выше системе конверсии может быть достигнута уменьшением длительности импульса тока в ~ 2 раза, что позволяет увеличить поле на поверхности линзы до 300 кэ.

Для собирания антипротонов с разбросом импульсов $\Delta p/p = 5\%$ при $pc = 2$ ГэВ в телесном угле $\sim 0,1$ ср (линейный угол $\sim 0,18$ рад) разработана параболическая линза специального профиля, обеспечивающая линейную фокусировку с фокусным расстоянием 20 см [6]. Линза питается импульсом тока амплитудой 500 кА и длительностью 100 мкс. Водяная система охлаждения позволяет работать с частотой до 0,2 Гц. Исследования механических свойств линз [7], подтвержденные ресурсными испытаниями на сотни тысяч импульсов, позволяют проектировать линзы с полями ~ 150 кэ на ресурс до $\sim 10^6$ импульсов при минимальной толщине стенок.

Для светосильной ($\theta \geq 0,2$ рад) фокусировки пучков с большим разбросом импульсов ($\Delta p/p \geq 10\%$) была разработана взрывная параболическая линза с полями 0,3-1 Мэ. Длительность полупериода импульса тока 3 мкс, амплитуда 1,5 МА [8].

Создание мегагауссных линз взрывного действия, как и мегагауссного конвертора, потребовало разработки систем дистанционной автоматической замены разрушающихся элементов с подключением их к контактам на мегаамперные токи и изоляцией на напряжение до 20 кВ. Часть этой проблемы, связанная с высоковольтной изоляцией и

и высокоточными контактами, решена путем использования сменных разрушающихся изоляторов и контактов с гидравлическими прижимами под давлением 1000 атм (рис.3). Взрывной элемент представляет собой заранее смонтированный патрон, автоматически вставляемый в стационарную ошиновку и подключающийся к ней гидравлическими контактами.

Для надежной работы систем конверсии в предельных режимах и условиях высокого уровня радиации, были разработаны универсальные коаксиальные ошиновки с гидравлическими контактами (Рис.1-3), позволяющие в случае неисправности дистанционно отключать и заменять любой элемент. Надежность работы контактов проверена ресурсными испытаниями в 10^6 циклов при токе в 10^6 А.

Питание элементов осуществляется через согласующие трансформаторы с коэффициентом трансформации 5+10, которые предполагается расположить за защитой и соединить с нагрузкой малоиндуктивными токопроводами, заканчивающимися посадочными местами для гидравлических контактов.

В настоящее время выбирается вариант компоновки элементов блока конверсии внутри защиты, схема устройств дистанционной отстройки, контроля и транспортировки отдельных элементов.

Л и т е р а т у р а

1. Report of VAPP-NAP Group in Proceedings of 8-th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, CERN, p.72 (1971).
2. Г.И.Будкер и др. Предложение по осуществлению встречных протон-антипротонных пучков на основе метода электронного охлаждения в проекте ускорительно-накопительного комплекса Большого Серпухова. Настоящий сборник, доклад № 140.
3. Е.Л.Фейнберг, УФН, т.104 (1971), 539.
4. Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский. Схема получения антипротонов на установке со встречными протон-антипротонными пучками. Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям, том II. М., "Наука", 1972, стр.196.
5. Б.Ф.Баянов, Г.И.Сильвестров. Возможность применения лития для создания цилиндрических линз с большими магнитными полями. Препринт ИЯФ 76-41, Новосибирск, 1976.
6. Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, В.Н.Карасик, Г.И.Сильвестров. Параболическая линза для фокусировки вторичных частиц с энергией в несколько ГэВ. Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям, том II. М., "Наука", 1972, стр.224.
7. Г.С.Виллевалд, В.Н.Карасик, Г.И.Сильвестров. Исследование механических характеристик высокоточных параболических линз в режимах динамического нагружения. Препринт ИЯФ 75-98, Новосибирск, 1975.
8. Г.И.Будкер, Г.С.Виллевалд, В.Н.Карасик, Г.И.Сильвестров. Параболические линзы взрывного действия с полями 0.3 + 1 Мэ. Препринт ИЯФ 76-58, Новосибирск, 1976.

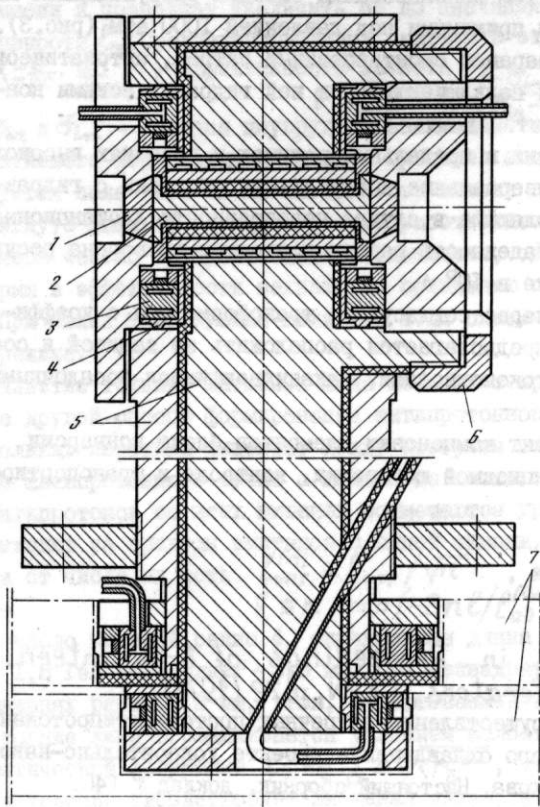


Рис. 1. Литиевая линза в универсальной ошивке

1 - бериллиевый фланец; 2 - литиевая линза; 3 - гидравлический зажим; 4 - контактная цапга; 5 - универсальная коаксиальная ошивка; 6 - байонетный прижим; 7 - стационарный токоподвод

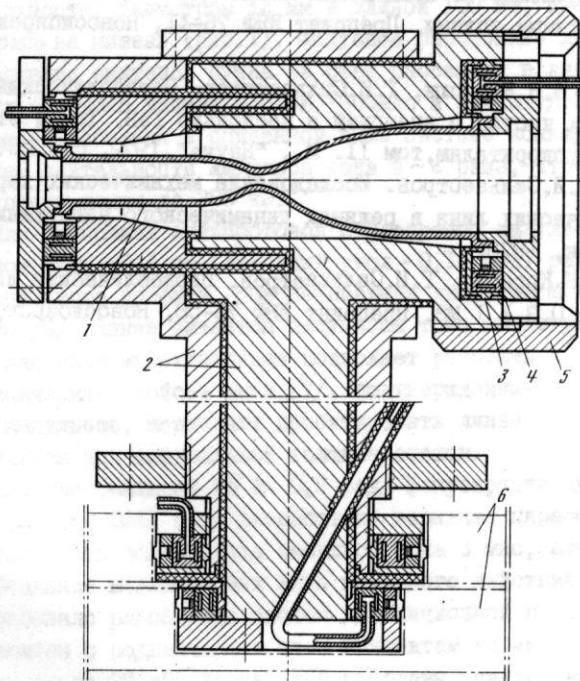


Рис. 2. Параболическая линза в универсальной ошивке

1 - параболическая линза, 2 - универсальная коаксиальная ошивка, 3 - контактная цапга, 4 - гидравлический зажим, 5 - байонетный прижим, 6 - стационарный токоподвод

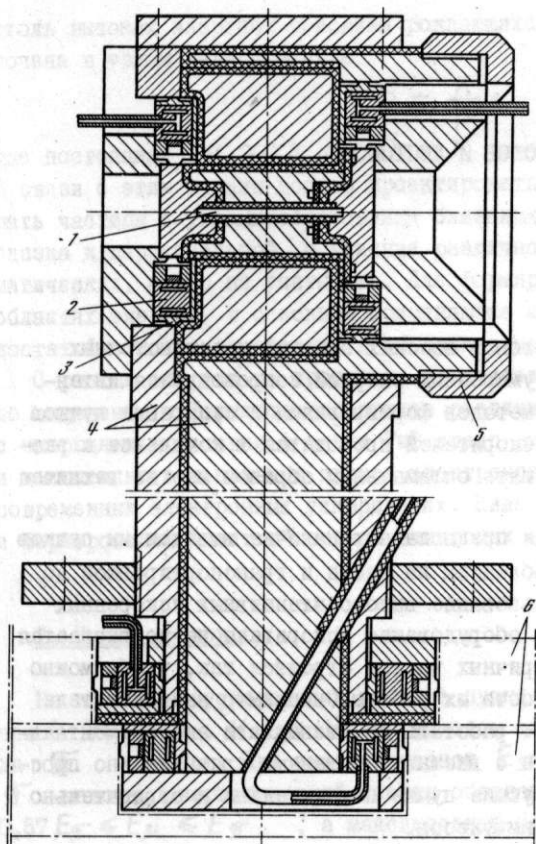


Рис. 3. Блок взрывного конвертора
в универсальной ошиновке

1 - блок взрывного конвертора, 2 -
гидравлический зажим, 3 - контактный
панга, 4 - коаксиальная универсальная
ошиновка, 5 - байонетный прижим, 6 -
стационарный токоподвод

104. ИМПУЛЬСНЫЕ КАНАЛЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.Л.Анашин, В.М.Барбашин, Т.Е.Вячеславова, Т.А.Всеволожская, В.А.Киселев,
В.И.Купчик, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, Э.М.Трахтенберг

Институт ядерной физики СО АН СССР

Разветвленная сеть каналов для транспортировки пучков является неотъемлемой частью современных ускорительных комплексов. Большой опыт ИЯФ СО АН СССР в разработке импульсных каналов на установках ВЭП-1 /1/, ВЭП-2 и ВЭП-3 / 2/ получил дальнейшее развитие при разработке каналов для транспортировки электронов и позитронов из бустерного накопителя ВЭП-3 в накопитель ВЭП-4 /3/. Сложная трасса канала, высокая энергия пучка ($E \approx 2$ ГэВ) и повышенные требования к стабильности его параметров на входе в накопитель ВЭП-4 - все это привело к разработке новых технических решений, которые, по мнению авторов, могут найти широкое применение при создании систем разводки пучков высоких энергий ($E > 1$ ГэВ).

1. Для пучков с энергией > 1 ГэВ становятся особенно очевидными преимущества импульсных магнитов перед магнитами с постоянным питанием. Меньшие размеры и вес (что весьма существенно для магнитов с радиусом и азимутальной длиной в несколько метров), малая потребляемая мощность, особенно при частоте циклов менее одного герца, возможность обойтись без водяного охлаждения обмотки - все это повышает надежность магнитов, облегчает их точную установку и вставку.

При проектировании импульсных магнитов основным является выбор между одновитковой и многовитковой конструкциями обмоток.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации импульсных систем убеждает нас в преимуществах одновитковой конструкции магнитов и квадрупольных линз /4/, обладающих по сравнению с аналогичными многовитковыми элементами следующими основными преимуществами:

- а) увеличенная зона хорошего поля за счёт формирования его и поверхностями полюсов и скинновыми поверхностями токоведущих шин;
- б) конструктивная простота и эксплуатационная надёжность за счёт более простой обмотки и меньшего напряжения на ней;
- в) минимальные габариты и вес.

Основная трудность - необходимость запитать обмотку током $50 + 80$ кА - обходится применением согласующих трансформаторов с коэффициентом трансформации $10 + 15$, соединенных с нагрузкой гибкими токопроводами, состоящими из систем коаксиальных кабелей большого сечения, соединенных параллельно.

Проблема вентильной коммутации больших импульсных токов в настоящее время достаточно просто решается применением последовательно-параллельно включенных тиристоров, каждый из которых способен коммутировать в импульсном режиме реактивную мощность в несколько мегаватт /5/.

2. Разработана конструкция импульсного поворотного магнита, изготовление которого может быть осуществлено на обычных станках без применения больших карусельных станков.

Поперечное сечение такого магнита показано на рис.1. Предварительно склеенные и точно обработанные плоские шихтованные пакеты I с азимутальным размером

200 мм. вкладываются на резиновые прокладки 2 в сварной силовой корпус 3 вместе с предварительно отвальцованными и обмотанными стеклотканью шинами 4.

Шины прижимаются к базовым поверхностям магнитопровода технологическими распорками 5, а резиновые прокладки 2 обеспечивают поджим всех пакетов к базовой технологической плите, задающей плоскость разреза магнитопровода.

После проверки точности взаимной выставки пакетов и шин вся сборка герметизируется, откачивается на вакуум и пропитывается эпоксидным компаундом под давлением 2+4 атмосферы. Аналогично изготавливается плоская крышка 6, представляющая собой второй полюс 0-образного магнита. По вышеописанной технологии для магнитов с апертурой $\Sigma \times \Delta R = 40 \times 60 \text{ мм}^2$, равновесным радиусом 4 метра и азимутальной длиной 3 метра удалось получить точность взаимного расположения шин и полюсов лучше 0,1 мм.

Конструкция квадрупольной линзы канала, поперечное сечение которой показано на рис.2, основана на тех же принципах. Блок шин I, две половинки магнитопровода 2 и силовой корпус 3 после вакуумирования пропитываются компаундом под давлением и образуют единый монолит, хорошо противостоящий силовым импульсным нагрузкам.

3. Конструкция магнита позволяет использовать его без вакуумной камеры; при этом уплотнительные прокладки размещаются между основным магнитопроводом и крышкой и на торцах магнита, что применялось нами ранее на всех импульсных каналах.

Но при частоте циклов менее 1 Гц и длительности полупериода синусоидального тока 6 мс становится целесообразным применение внутренней вакуумной камеры из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм (камера изготовлена из стандартной трубы $\phi 56 \times 1,5$). При этом резко облегчается контроль контактов в токоподводах и эксплуатация вакуумной системы, а наличие камеры практически не отражается на топографии поля в апертуре в максимуме тока и приводит лишь к ослаблению амплитуды поля на 1,5%.

При частоте циклов 0,1 Гц и максимальном поле в 1,5 Т, выделяемая в камере мощность легко снимается на шины, и установившаяся температура не выше 30+40°.

Камеры аналогичной конструкции устанавливаются в квадрупольных линзах, и это позволяет собрать весь канал на индиевых уплотнениях и использовать безмасленную откачку насосами НОРД-100.

4. При формировании магнитного поля в импульсных системах ферромагнитными полюсами и скиновыми поверхностями токоведущих шин основным фактором, искажающим топографию поля, является изоляционный зазор между полюсом и шиной, эффективная величина которого $\Delta \varepsilon \varphi \sim \sqrt{\Delta(\Delta + \delta)}$,

где

Δ - изоляционный зазор

δ - толщина скин-слоя.

Влияние этого зазора может быть скомпенсировано увеличением плотности тока в районе зазора, что достигается специальным профилированием шины (см. рис.1).

При величине изоляционного зазора 1 мм и толщине скин-слоя $\delta = 7 \text{ мм}$ ($\tau_{\text{имп}} \approx 6 \text{ мс}$) оптимальное шиммирование обеспечивает в фазе максимума тока однородность поля с точностью 0,1%, и эта зона однородного поля составляет 90% апертуры $40 \times 60 \text{ мм}^2$ при поле в 1,5 Т.

В импульсной квадрупольной линзе поле формируется также как в магните, поэтому зазоры между токоведущими шинами и магнитопроводом конструктивно выполняются минимальными.

5. При трассировке каналов широко используется установка магнитов с поворотом вокруг оси входа или выхода пучка, что обеспечивает поворот пучка сразу в двух плоскостях одним магнитом ("трехмерная" геометрия).

Например, с помощью такой установки двух магнитов с углом 30° и шести квадрупольных секций между ними одновременно осуществляется ахроматический перенос пучка на 5 м в горизонтальной плоскости и подъем пучка по вертикали на 1,5 м.

Возникающая при таком расположении магнитов связь вертикальных и радиальных колебаний пучка, приводящая к появлению вертикальной дисперсионной функции, учитывается при расчете оптической схемы канала.

Такой метод установки магнитов позволяет уменьшить число поворотных магнитов в канале, что особенно важно для каналов со сложной геометрией.

6. Для упрощения системы питания импульсных элементов и снижения требований на стабильность амплитуды поля рекомендуется широко применять последовательное включение всех элементов на ахроматических участках каналов (в нашем случае состоящих из двух поворотных магнитов и 3 или 6 квадрупольных секций между ними). Все эти элементы запитываются от вторичной обмотки одного согласующего трансформатора током до 80 кА. Конструктивно это выполняется с помощью гибкого токопровода, состоящего из 12 параллельных секций коаксиального кабеля.

Полная энергоемкость такого последовательно включенного участка канала достигает 50 кДж.

Компенсация небольших отличий реальных эффективных длин магнитов, составляющих по измерениям 0,5%, осуществляется или шунтированием, или введением в канал слабых корректирующих магнитов с углом поворота 10^{-2} радиан.

7. Ввод пучка в камеру накопителя осуществляется импульсным *septum*-магнитом, в котором впервые применена внутренняя камера из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,4 мм. При этом весь магнит размещается в атмосфере, что резко упрощает его выставку и обслуживание и повышает эксплуатационную надежность.

Магнит имеет радиус 4,44 м, максимальное поле 1,5 Т и запитывается импульсом тока 60 кА длительностью 300 мкс, имеющего обратную полуволну для компенсации релаксационных составляющих внешнего поля.

Малая величина внешнего поля ($H_{вн}/H_0 \approx 6 \cdot 10^{-4}$) обеспечивается его затуханием в наружной шине, толщина которой 1,5 мм — больше скин-слоя, и наличием ферромагнитного экрана, роль которого выполняет сам участок вакуумной камеры накопителя, выполненный из стали 3. Суммарная толщина ножа δ (см. рис. 3) (стенка вакуумной камеры в магните + наружная шина магнита + стенка вакуумной камеры накопителя) составляет 3,2 мм. Для достижения этого столь малого размера и повышения силовой прочности наружная шина впускного магнита 1, участок камеры накопителя 2 и вакуумная камера впускного магнита 3 выполнены конструктивно единым блоком из специальной многослойной заготовки (ст3+BrX-0,5+X18H9T), изготовленной по методу сварки взрывом, разработанному в Институте Гидродинамики СО АН СССР.

Л и т е р а т у р а

1. Е. С. Миронов и др. Материалы совещания по физике и технике метода встречных пучков. Харьков, 1962, стр. 47.
2. Т. А. Всеволожская и др. Труды Всесоюзного сов. по уск. зар. частиц, т. I, стр. 95. М., ВИНТИ, 1970
3. Т. А. Всеволожская и др. Труды третьего Всесоюзного совещ. по ускор. заряд. частиц, т. I, стр. 122. М., "Наука", 1973.
4. Б. Ф. Баянов и др. Труды Всесоюзн. сов. по уск. зар. част. т. I, стр. 283. М., ВИНТИ, 1970.
5. Л. Л. Данилов и др. Там же, стр. 287.

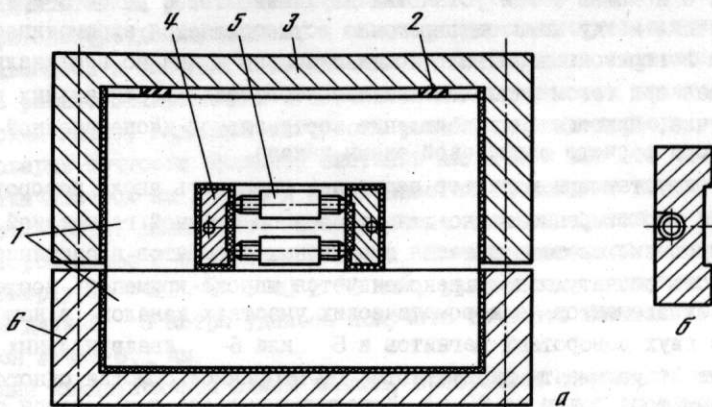


Рис. 1. Поперечное сечение поворотного магнита

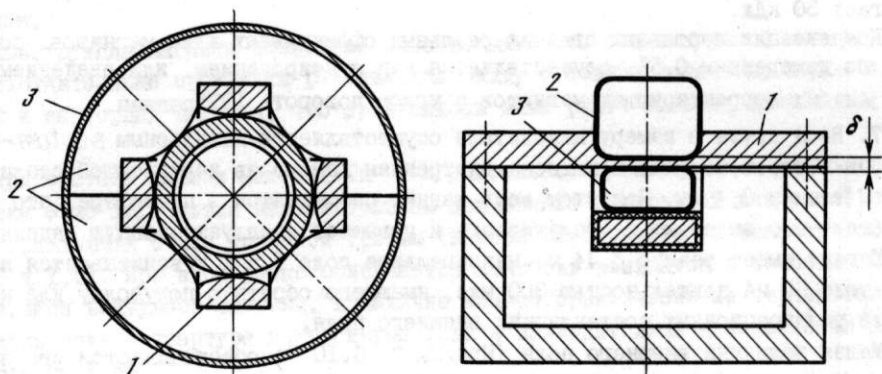


Рис. 2. Поперечное сечение квадрупольной линзы

Рис. 3. Поперечное сечение впускного магнита

110. НАКОПИТЕЛИ ВЭПН-2М И ВЭПН-3 - ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В.Анашин, Г.А.Корнюхин, Г.Н.Кулипанов, А.Л.Мироненко, С.И.Мишнев,
В.Ф.Пиндурин, А.Н.Скринский, Э.М.Трахтенберг, Г.М.Тумайкин, В.Б.Хлестов,
Ю.М.Шатунов, М.А.Шеромов

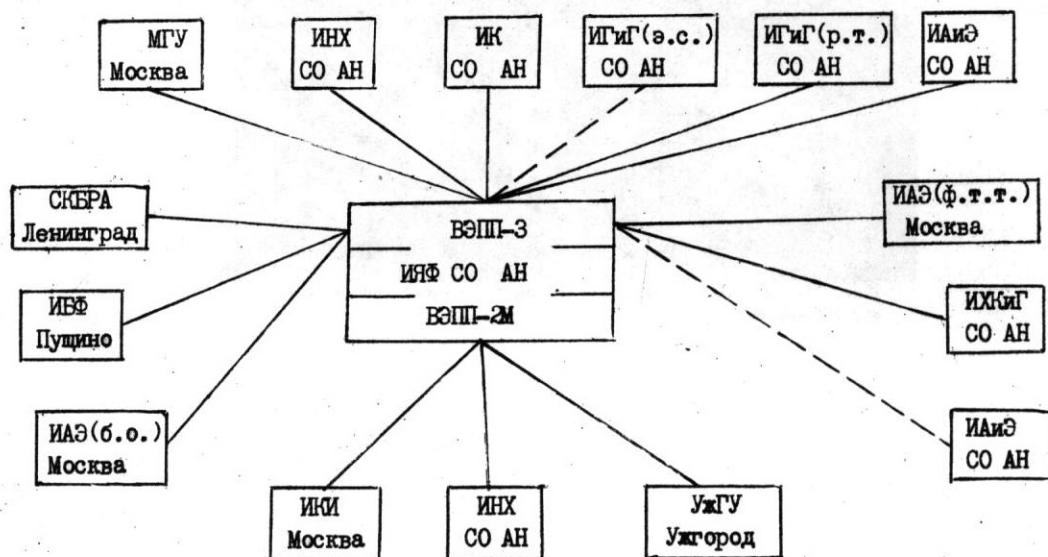
Институт ядерной физики СО АН СССР

В последние годы в ИЯФ СО АН СССР получило развитие новое направление работ, связанное с использованием синхротронного излучения (СИ) в физике, биологии и химии. Работы ведутся в рамках программы, начатой в 1973 году совместно институтами: ядерной физики СО АН СССР, атомной энергии им.Курчатова, биофизики АН СССР (г.Пушино), неорганической химии СО АН СССР и катализа СО АН СССР.

Цель программы:

- оборудование каналов для вывода СИ из накопителей ВЭПН-2М и ВЭПН-3, модернизация накопителей с точки зрения использования их, как источников СИ;
- создание набора экспериментального оборудования для структурных исследований и спектроскопии, включая использование ЭМ в автоматизации экспериментов с использованием СИ;
- отработка методик и проведение экспериментов с использованием СИ.

В настоящее время к этой программе присоединилось еще ряд институтов СО АН СССР и других научных центров СССР (см.схему).



Всего сейчас работает 12 групп общей численностью ~ 60 человек, до конца 1976 года начнут работу еще 4 группы.

Повышенный интерес других институтов и организаций к работе с СИ в ИЯФ СО АН СССР /1,2/ связан с тем, что в ИЯФ имеется накопитель ВЭПН-2М используемый как источник СИ в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена и накопитель ВЭПН-3, являющийся источником СИ в области мягкого и жесткого рентгена.

Основные параметры накопителей, определяющих их качества как источников СИ, приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены "потребительские" характеристики пучков СИ.

На накопителе ВЭШ-2М синхротронное излучение выводится через 8 окон диаметром 20 мм, находящихся на расстоянии 0,6 м от точки орбиты, из которой идет излучение. Для потребителей СИ в настоящее время предназначено три окна.

К первому окну подсоединен вакуумный канал, который обеспечивает непосредственное соединение вакуумной камеры рентгеновского спектрометра (рабочий вакуум 10^{-6} Торр) с вакуумной камерой накопителя с рабочим вакуумом 10^{-9} Торр (рис.2). Для этого в канале установлены три секции дифференциальной откачки, каждая из которых включает в себя участок канала с малой проводимостью 1, буферный объем 2, азотную ловушку 3 и магниторазрядный насос 4.

Второе окно для вывода СИ перекрывается фольгой бериллия толщиной 250 мкм, через которую рентгеновский пучок с $\lambda < 10 \text{ \AA}$ выводится в атмосферу.

Третье окно будет использовано для нового вакуумного канала, специально предназначенного для абсолютной калибровки детекторов в области вакуумного ультрафиолета $\lambda = (500 - 2000) \text{ \AA}$ для ИКИ АН СССР. Особенность нового вакуумного канала - большая апертура ($\Psi_x = 20$ мрад) и возможность точного учета всех потерь света.

На накопителе ВЭШ-3 оборудован пока один канал СИ, позволяющий одновременно (за счет геометрического деления пучка СИ) вести три различных эксперимента на трех площадках.

На накопителе ВЭШ-3 синхротронное излучение выводится из плоской части магнита с участка траектории, лежащего на расстоянии 45 см от края магнита (рис.3).

Ось канала расположена под углом $\Psi = 4^\circ$ к оси прямолинейного промежутка, длина канала $L = 2,5$ м. Пучок СИ выводится в атмосферу через бериллиевые окна I толщиной $\delta = 0,15$ мм, разделенные форвакуумным объемом 2, который предназначен для устранения проникновения в вакуумную камеру ВЭШ-3 атмосферного воздуха при случайном или радиационном повреждении выходной фольги. Для уменьшения тепловых нагрузок на выходную фольгу, перед ней расположен фильтр 3 из бериллия изменяемой толщины, который поглощает длинноволновую часть спектра. Диаметр выходной фольги $d = 30$ мм, что позволяет выводить пучок СИ в радиальный угол $\Psi_x \sim 10$ мрад.

Установки для рентгеноструктурного анализа обычно располагаются на выходе канала СИ, на расстоянии 2,5 м от точки излучения. Для экспериментаторов, не требующих максимальной плотности потока фотонов, оборудованы площадки на расстоянии 8,5 и 11 м от точки излучения. Пучок СИ в этом случае транспортируется по дополнительной вакуумной трубе необходимой длины, имеющей входное и выходное окно из бериллия толщиной 150 мкм.

Разработан проект модернизации накопителя ВЭШ-3, как источника СИ. В прямолинейном промежутке накопителя ВЭШ-3, на участке с малыми β и Ψ - функциями будет установлена "змейка" из знакопеременных сверхпроводящих магнитов. Разработка проекта такой змейки ведется в одной из лабораторий ИЯФ. Постановка "змейки" позволит существенно увеличить яркость источника СИ (в 100 - 200) и сдвинуть спектр СИ в более коротковолновую часть. Кроме того при модернизации накопителя будет увеличено количество каналов СИ до четырех. Рядом с туннелем накопителя ВЭШ-3 будет построен специальный бункер, куда будут выведены каналы СИ. Полезная площадь бункера $\sim 90 \text{ м}^2$. На втором этаже предполагается размещение специальных лабораторных помещений (фотолаборатория, препаративские, пульты для размещения электроники, ЭМ и т.д.).

Использование СИ в качестве принципиально нового интенсивного ультрафиолетового источника излучения потребовало адекватной аппаратуры для постановки экспериментов на СИ. ИЯФ, имеющий большой опыт в создании разнообразной современной физической аппаратуры и использовании ЭМ для автоматизации экспериментов предал

большую работу в разработке и изготовлении такой аппаратуры для работы с СИ. Наиболее интересными приборами являются:

1). Двухкоординатный детектор для экспериментов по дифракции синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне длин волн $\lambda/3$. Двухкоординатный детектор представляет собой многопроволочную пропорциональную камеру, соединенную с ЭВМ М-6000. Детектор имеет эффективность регистрации 30% ($\lambda = 2 \text{ \AA}$), число каналов 4000, размер канала $2 \times 2 \text{ мм}$, быстродействие 10^5 событий в секунду.

2). Однокоординатная пропорциональная камера для регистрации γ - квантов с энергией $h\nu = (5 - 20) \text{ кэВ}$. Эффективность регистрации $\approx 100\%$ ($\lambda = 2 \text{ \AA}$), число каналов 1000, рабочая длина детектора 300 мм, ширина канала 0,3 мм, быстродействие до 10^5 событий в секунду, информация выводится на ЭВМ М-6000 или на многоканальный анализатор.

3). Прецизионный рентгеновский спектрометр, работающий в режиме связи с ЭВМ "Одра-1325" для изучения тонкой структуры спектров поглощения. Спектрометр состоит из монохроматора, управляемого от ЭВМ "Одра-1325" (точность углового отсчета 3") и детектора (ФЭУ или пропорционального счетчика), сигнал с которого вводится в ЭВМ, обработанная информация выдается на графический дисплей в удобном виде.

Мощные пучки синхротронного излучения и наличие экспериментального оборудования позволили начать исследования с помощью СИ по широкой тематике.

Л и т е р а т у р а

1. Т.Д.Мокульская и др. Использование синхротронного излучения накопителя ВЭШ-3 для рентгеноструктурных исследований, ДАН, 1974 г., т. 218, № 4, стр.824.
2. Е.С.Глускин и др. Использование синхротронного излучения накопителя ВЭШ-2М для получения ультрамягких рентгеновских спектров. Изв.АН СССР (серия физическая), 1976, т.40, № 2, стр.226.
3. С.Е.Бару и др. Применение многопроволочных пропорциональных камер для рентгеноструктурных исследований", ДАН, 1976, т. 227, № 1, стр. 82.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры накопителей - источников СИ.

	Е ГэВ	R м	f_0 МГц	I мА	$2\delta_x \times 2\delta_z$ мм ²	l см	τ час	$P_{СИ}$ кВт
ВЭШ-2М	0,67	1,22	16,7	100	2,6 x 0,16	5	0,5 - 10	1,48
ВЭШ-3	2,2	6,15	4,03	100	1,5 x 0,15	20	2,0 - 100	20,0

Т а б л и ц а 2

Параметры пучков СИ на выходе канала.

	Используемый спектр λ	Количество каналов СИ шт	Освещенность $\frac{\text{фот}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$	Яркость $\frac{\text{фот}}{\text{стер} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек}}$
ВЭШ-2М	6 - 3000	1 + 2	$(0,2-2) \cdot 10^{16} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$(1-5) \cdot 10^{23} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$
ВЭШ-3	0,5 - 6	1(3)	$(0,1-2) \cdot 10^{17} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$(0,2-1) \cdot 10^{24} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$

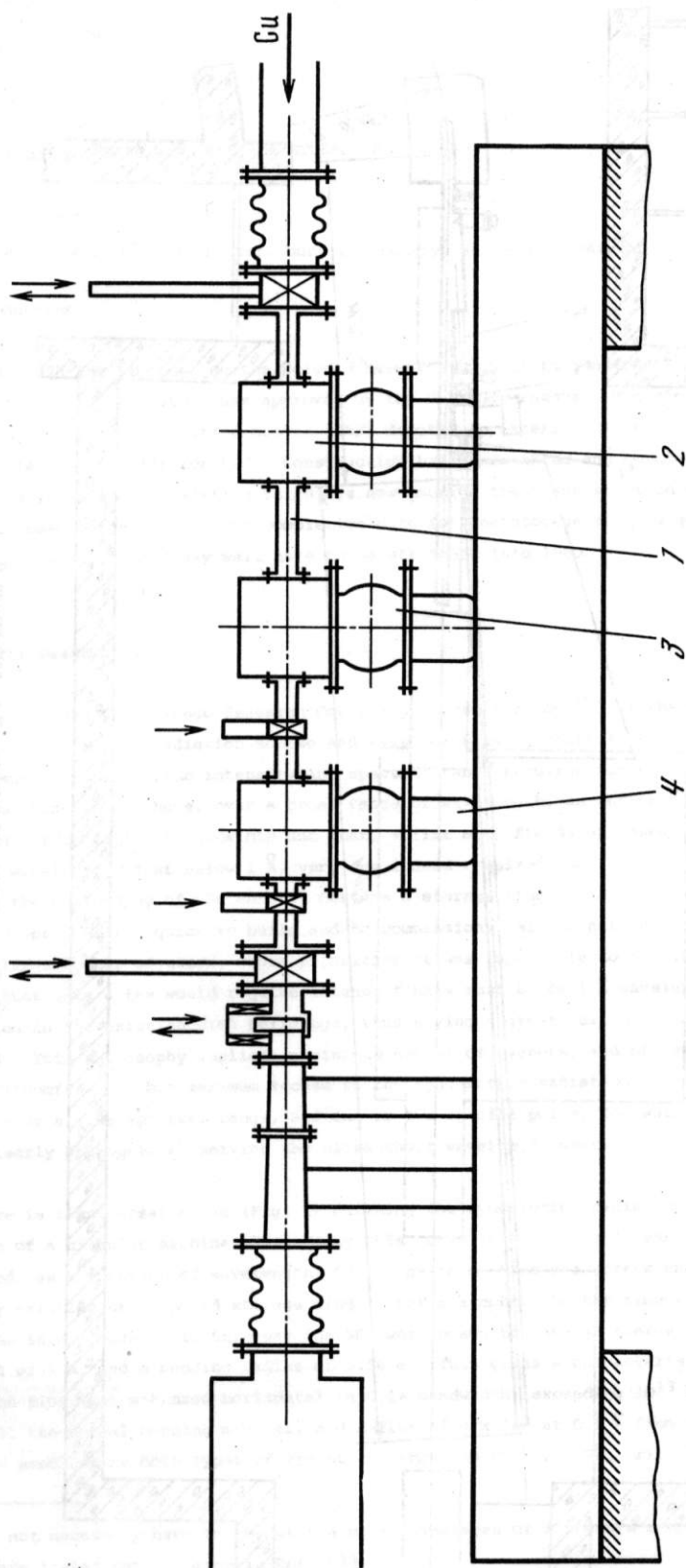


Рис. 1. Схема канала для вывода СИ из накопителя ВЭПП-2М

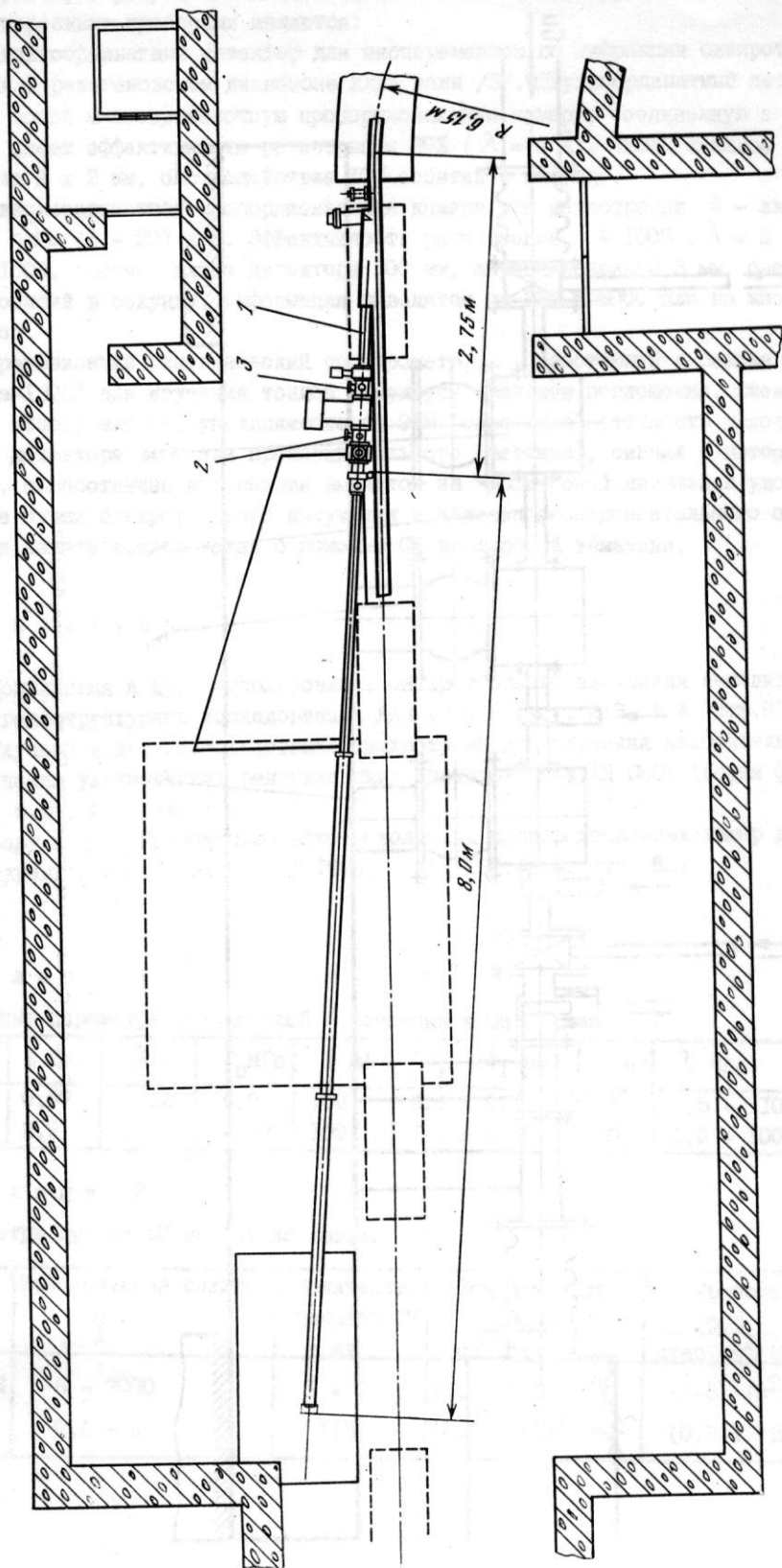


Рис. 2. Схема канала для вывода СИ из накопителя ВЭПП-3

130. СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ИИФ СО АН СССР НА ОСНОВЕ ВОДЯНЫХ ЛИНИЙ

В.А.Корнилов, В.М.Лагунов, В.М.Федоров

Институт ядерной физики СО АН СССР

Работы по применению воды в качестве диэлектрика в накопителях электрической энергии были начаты в Институте ядерной физики СО АН СССР по предложению Будкера Г.И. в 1965 году. К тому моменту была известна лишь одна работа Шеррера [1], в которой описывалось применение в Военно-Морской лаборатории США импульсного конденсатора с водяной изоляцией.

К настоящему времени в Институте созданы несколько ускорителей импульсного действия, в которых используется водяная изоляция, отработана система приготовления воды, проведены исследования электрической прочности воды и т.п.

В системе приготовления воды исходная вода с удельным сопротивлением $\rho = 5 \cdot 10^4$ Ом.см. пропускается через электрокоагулятор и фильтр конструкции Института горного дела СО АН СССР и поступает в герметичные накопительные баки и затем в установку. Имеется замкнутый контур очистки, который включает накопительные баки, электронасос, ионнообменные колонки, фильтры с тонкостью фильтрации 5 мкм и установку. Во время циркуляции по контуру вода дегазируется. Производительность насоса выбирается такой, чтобы за 1 час перекачивался объем воды, равный примерно объему установки. При этом через 1,5-2 часа удельное сопротивление воды в контуре достигает предельного значения $\rho = 2 \cdot 10^7$ Ом.см при нормальной температуре и $\rho = 4 \cdot 10^7$ Ом.см. при охлаждении до 9°C. Во время разборки установки вода перегоняется в накопительные баки и сохраняется. Максимальная производительность системы равна 10 м³/час.

Исследования, проведенные в 1970г., предпробойных явлений в воде в однородном электрическом поле при межэлектродном зазоре 3 мм показали, что при временах пробоя меньше $t \leq 1$ мксек пробой начинается с положительного электрода [2]. Эти исследования были продолжены в дальнейшем в Институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР [3]. Применение теневой съемки в кадровом режиме с экспозицией ~3 нсек позволило установить, что при приложении электрического поля на микронеоднородностях электрода происходит локальное выделение энергии в областях размером ≤ 10 мкм. Эти микровзрывы вызывают возмущения жидкости и некоторые из них инициируют пробой промежутка. Эти результаты дополняют эмпирические закономерности, полученные в AWRE группой Мартина в середине 60-х годов и которые нам стали известны в 1971 г. из работы Шипмана [4].

Изучение влияния внешнего давления на электрическую прочность воды [5] показало, что пробивная напряженность в воде заметно растет с увеличением давления: изменение давления от 3 до 130 атм увеличивало электрическую прочность с 300 до 700 кВ/см при длительном времени воздействия напряжения ($t = 20$ мксек по уровню 0,5). Возрастание электрической прочности воды при ее сжатии открывает возможность создания накопителей энергии мегаджоульного диапазона, которые можно будет заряжать в течение достаточно длительного времени (~10 мксек).

В институте проведены исследования электрической прочности воды в условиях, когда можно исключить влияние микронеоднородностей электродов. По предложению Д.Д.Рютова [6] этого можно достичь созданием на поверхности электродов переходных

слоев с плавно спадающей в глубь жидкости проводимостью. Эксперименты [7] показали, что экранирование электрода жидким электролитом увеличивает электрическую прочность воды до $E=1,3$ МВ/см при $t \sim 5$ нсек, что в 4 раза больше электрической прочности промежутка при отсутствии слоев. Эти результаты служат прямым подтверждением определяющей роли приэлектродных процессов в иницировании пробоя водяных промежутков.

В 1967 г. впервые в СССР в Институте ядерной физики СО АН СССР был создан и применен в экспериментах по нагреву плазмы генератор быстро нарастающего магнитного поля на основе водяных линий [8]. Генератор работал при напряжении 200 кВ, создавал импульс тока с фронтом 50 нсек и амплитудой 200 кА. Работа с водяными линиями при времени зарядки 1,5 мсек и площади электродов $4 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ показала, что напряженность электрического поля в воде может достигать значения 100 кВ/см. Давление в воде было примерно 20 атм.

В 1971 году был создан генератор "Водяной" [9], особенностью конструкции которого является высокое давление воды (100 атм). Рабочее напряжение накопителя $(I+I,2) \cdot 10^6 \text{ В}$, зарядка осуществляется с помощью резонансного трансформатора, максимум напряжения достигается на втором полупериоде колебаний через 6 мсек от начала импульса. Напряженности поля равны 140 и 200 кВ/см на положительном и отрицательном электродах соответственно, площадь электродов $0,8 \cdot 10^4 \text{ см}^2$. Генератор "Водяной" (рис.1) представляет собой одинарную формирующую линию длиной 55 см с волновым сопротивлением 2,3 Ома. С целью оптимизации передачи энергии из формирующей линии к вакуумному диоду применена промежуточная передающая линия с волновым сопротивлением 8 Ом. Коммутатором является водяной зазор величиной 3-4 см, работающий в режиме самопробоя. Полученный электронный пучок имеет длительность 45 нсек, ток 110 кА, энергию электронов 0,8 МэВ.

С 1973 г. в Институте ведутся работы по созданию генератора "Вода I-10" с запасом энергии в накопителе 15 кДж. Этот генератор спроектирован по схеме двойной формирующей линии на напряжение 10^6 В . Время зарядки линии 1,2 мсек, напряженность поля на положительном электроде $E=135$ кВ/см. Площадь электродов $2,8 \cdot 10^4 \text{ см}^2$. В конструкции накопителя использованы изоляторы из капролона при сравнительно высокой напряженности поля вдоль поверхности изолятора ($E_{\text{ср}}=110$ кВ/см) (рис.2). Для уменьшения напряженности поля на краю положительного потенциального электрода с малым радиусом закругления ($R=0,5$ см) последний прикрыт двумя кольцевыми изоляторами из капролона (Iа, рис.2). Разрядник работает в воде с внешней синхронизацией по принципу усиления электрического поля на остром крае промежуточного электрода. Генератор был испытан в укороченном варианте. Предполагавшаяся многоканальность пробоя воды в коммутаторе пока не достигнута. Число каналов резко колеблется от выстрела к выстрелу в пределах 1-3.

В 1973 году начались работы по созданию генератора электронного пучка "Акватен" с использованием водяной изоляции на запасаемую энергию 30 кДж. Генератор (рис.3) представляет собой одинарную формирующую линию волновым сопротивлением 2,7 Ома, образованную двумя цилиндрами с диаметрами 100 и 150 см. При конструировании установки средняя напряженность поля была принята равной $E_{\text{ср}}=100$ кВ/см, чтобы сделать более надежной работу высоковольтных вводов и коммутирующего разрядника. Конструкция ускорителя рассчитана на давление 15 атм. Рабочее напряжение $2,5 \cdot 10^6 \text{ В}$. Время зарядки 1,5 мсек. Коммутатор шестиканальный газовый в атмосфере SF_6 , синхронизация тригатронного типа. Вакуумный диод плоский, индуктивность порядка 40 нГн. Ожидаемые параметры электронного пучка: ток 400 кА, энергия электронов $1,2 \cdot 10^6 \text{ эВ}$, длительность 60 нсек.

Испытания модели коммутатора с тригатронным поджигом на напряжении $0,8 \cdot 10^6 \text{ В}$ показали, что коммутатор имеет разброс срабатывания 4 нсек и время

срабатывания 25 нсек. Среднее число одновременно срабатывающих каналов составляло 2,5 из 4.

Во всех импульсных ускорителях Института ядерной физики применяется трансформаторная схема зарядки. Исходная батарея имеет напряжение 50 кВ. Коммутаторы либо газовые, либо вакуумные. Для изоляции повышающей обмотки трансформаторов и высоковольтных вводов применяется пленочная многослойная изоляция, пропитанная под вакуумом водой или раствором $CuSO_4$. В такой изоляции достигнута рабочая напряженность поперек слоев пленки порядка 10^6 В/см при времени удержания напряжения порядка 1 мксек. Вдоль слоев пленки напряженность поля равна $60+100$ кВ/см. Электрические поля в установках при наличии границы раздела между водой и твердым диэлектриком рассчитывались на ЭВМ по программе КСИ БЭСМ Вычислительного Центра СО АН СССР.

Схема трансформаторной зарядки имеет некоторые преимущества перед схемой ГИНа: 1) отсутствие открытых высоковольтных частей с напряжением 10^6 В, что избавляет от необходимости помещения зарядной системы в бак; 2) малые размеры в диапазоне энергий до 100 кДж; 3) доступ к разрядникам батареи. Однако имеются определенные недостатки: в схеме безжелезного трансформатора очень высокими являются требования малоиндуктивности первичной батареи; в реальных конструкциях при обеспечении времени зарядки 1 мксек коэффициент передачи энергии из батареи в накопитель оказывается малым (25+35%).

Л и т е р а т у р а

1. В.Шеррер. Программа исследований взрывающихся проволочек в *NRL* и *AFSWP*. Взрывающиеся проволочки, пер.с англ.стр.109-122, М., ИЛ, 1963.
2. А.П.Алхимов, Воробьев В.В., В.Ф.Климкин, А.Г.Пономаренко, Р.И.Солоухин, ДАН, 194, № 5, 1052 (1970).
3. В.Ф.Климкин, А.Г.Пономаренко. Вопросы газодинамики. Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, стр. 260. Новосибирск, 1975.
4. I.D.Shipman. *IEEE*, *ns*, 18, N 14, 243 (1971).
5. Е.А.Абрамян, В.А.Корнилов, В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко, Р.И.Солоухин, ДАН, 201, № 1, 56 (1971).
6. Д.Д.Рютов, ПМТФ, № 4, 186, (1972).
7. А.П.Алхимов, В.В.Воробьев, В.Ф.Климкин, А.Г.Пономаренко, Р.И.Солоухин. Исследование механизма электрического пробоя дистиллированной воды в наносекундном диапазоне. Тезисы докладов на заседании секции IV Научного Совета АН СССР по теоретическим и электрофизическим проблемам энергетики. Томский гос.ун-т, 1971.
В.В.Воробьев, В.А.Капитонов, Э.П.Кругляков. Письма ЖЭТФ, 19, в.2, 95 (1974).
8. Б.И.Куликов, В.М.Лагунов, Ю.Е.Нестерихин, В.М.Федоров. Устройство для генерации мощных электрических импульсов. Авт. свидет., № 270059. Бюлл. изобрет., № 16, 1970, В.А.Капитонов, В.А.Корнилов, В.М.Лагунов, Ю.Е.Нестерихин, А.П.Пашурин, А.Г.Пономаренко, ПМТФ, № 2, 29, (1970).
9. Э.Л.Бояринцев, В.А.Капитонов, В.А.Корнилов, ДАН, 217, №4, 808, (1971).

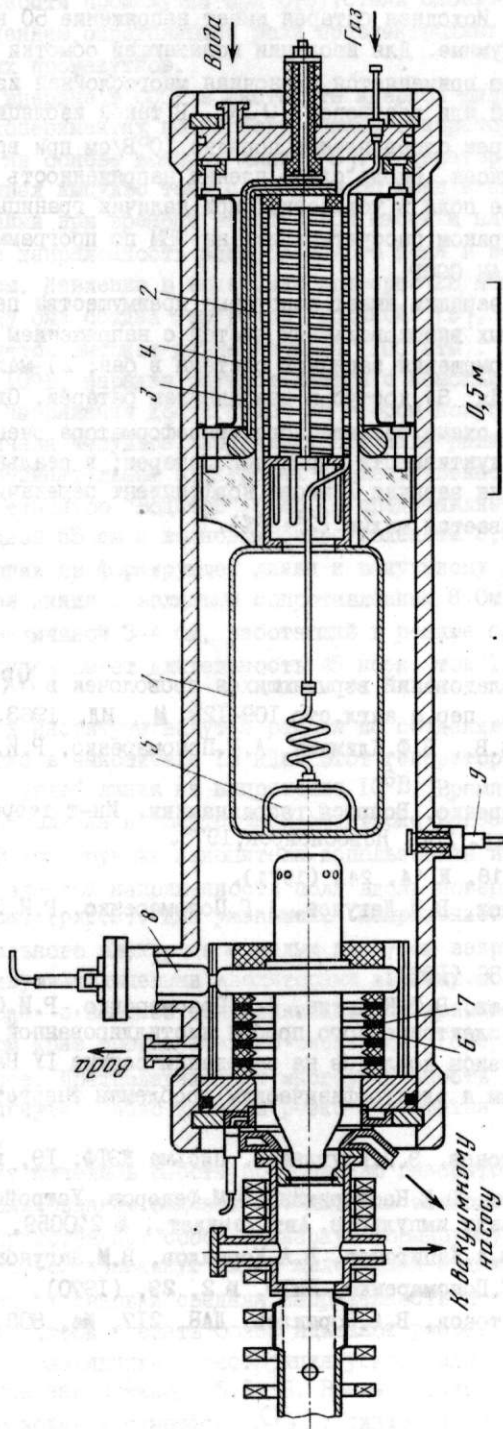


Рис. 1. Генератор "Волной"
 1 - форнирующая линия; 2-3 - резонансный трансформатор; 4 - шеночная излучающая высокочастотная обмотка; 5 - демпфер для сжатия руды;
 6, 7 - изоляторные и гранитные кофла ускорительной трубки; 8, 9 - датчики напряжения

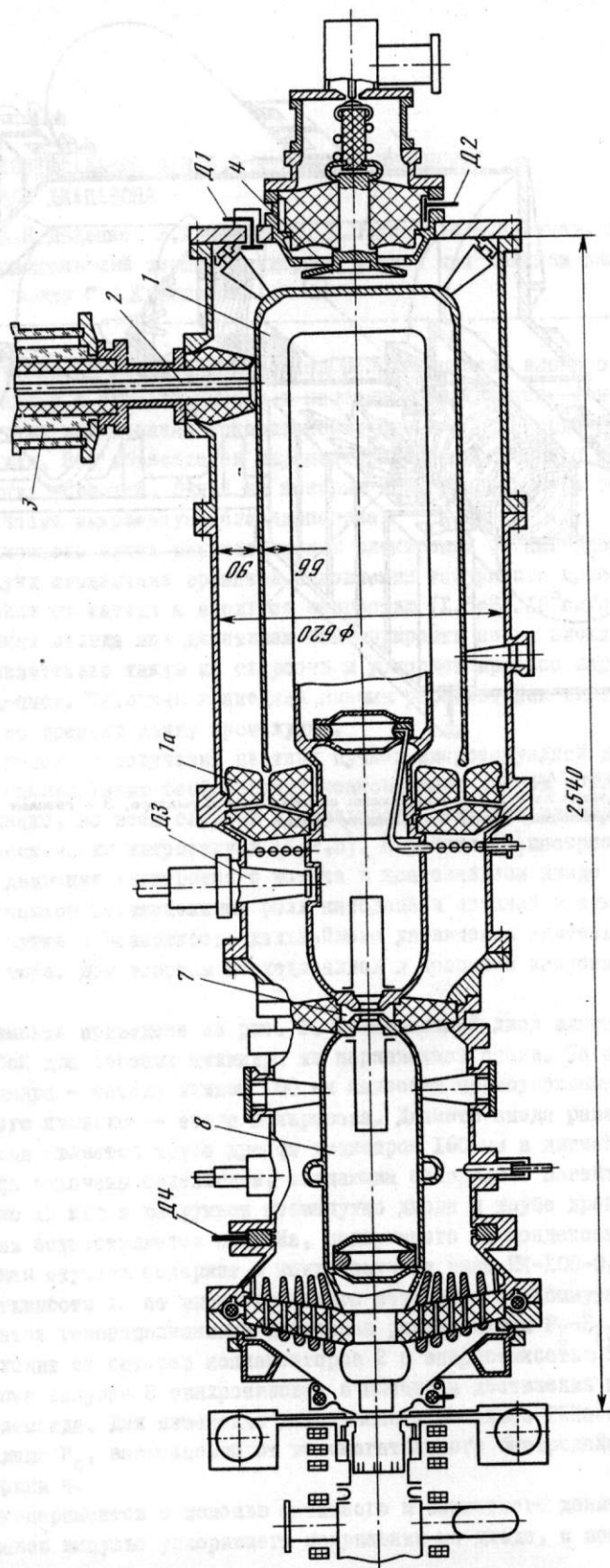


Рис. 2. Генератор "Вода 1-10"
 1 - импульсная формирующая линия; 1а - высоковольтный цилиндр и изоляционный узел; 2 - высоковольтный ввод; 3 - повышающий трансформатор;
 4 - промежуточный триггерный электрод водного разрядника; 7 - промежуточный газовой разрядник; 8 - иррадирующая линия; Д1-Д4 - датчики
 напряжений

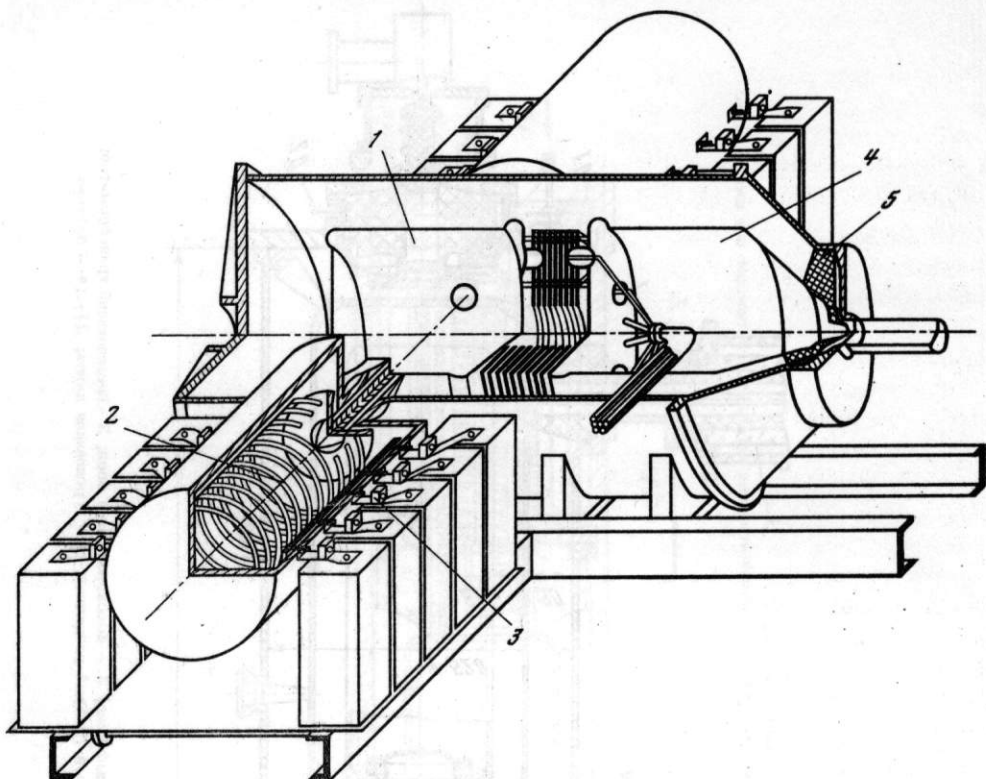


Рис. 3. Генератор "Акваген"

1 - формирующая линия; 2 - повышающая обмотка трансформатора, 3 - газовые управляемые разрядники; 4 - передающая линия; 5 - изолятор диода

137. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-2М СО ВСТРЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫМИ ПУЧКАМИ (состояние на 1976 г.)

В.А.Гусев, М.Н.Захваткин, А.Н.Кирпотин, И.А.Кооп, Э.Л.Неханевич, С.И.Мишнев, В.А.Сидоров, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов
Институт ядерной физики г.Новосибирск

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2М /1/ включает в себя электронный синхротрон Б-3М, бустерный слабофокусирующий накопитель ВЭПП-2, предназначенный для посередного накопления и ускорения электронов и позитронов, и жесткофокусирующее кольцо ВЭПП-2М, для одновременного накопления электронных и позитронных пучков с энергией до 670 МэВ в каждом пучке (рис.1).

На комплексе ведется несколько физических программ:

1. Работа со встречными электрон-позитронными пучками на накопительном кольце ВЭПП-2М. Систематические эксперименты идут с 1974 года, максимальная светимость $1 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.
2. Изучение радиационной поляризации электронного и позитронного пучков.
3. Эксперименты по электровозбуждению ядер на внутренней газовой мишени на накопительном кольце ВЭПП-2.
4. Эксперименты с использованием синхротронного излучения.
5. Ускорительные эксперименты.

Каждая из физических задач требует своего режима работы большинства элементов комплекса и изменения их выходных параметров по заданной программе. В связи с большой продолжительностью циклов (например, время накопления позитронов около 1 часа, время поляризации порядка 2 часов) необходима высокая надежность и точность отработки последовательных операций, связанных с накоплением и переводом пучков. Такой объем перестроек с нужной точностью может быть выполнен за короткое время с помощью управляющей ЭВМ.

Задача построения управления подобными системами, в своей сущности сводится к связи между ЭВМ и отдельными устройствами с большим количеством исполнительных элементов и датчиков. Система управления, связанная с вводом и выводом информации, требует создания многоступенчатой иерархической коммутации. Коммутаторы высшей ступени более сложные, нижней ступени, объединяющие группу однородных элементов, могут быть специализированы и упрощены.

Управление всеми основными элементами комплекса ведется от управляющей вычислительной машины УВК М-6000. Использован минимальный комплект, дополненный ОЗУ (до 12 К), расширителем ввода-вывода (РВВ) до 24 каналов. Структурная схема управления комплексом приведена на рис.2. Она имеет 16 программных каналов коммутации, к которым подключены внешние устройства. Специализированные коммутаторы подключаются к машинному коммутатору стандартной интерфейсной картой. Такой подход позволил применить систему управления только с двухступенчатой схемой коммутации. Специализированные коммутаторы, с точки зрения машины, являются такими же внешними устройствами как телетайп и дисплей. На рис.2 показаны внешние устройства:

1. Интегрирующий цифровой вольтметр /2/ (погрешность 10^{-4} , разрешающая способность 1 мкВ), с аналоговым коммутатором на 64 канала.

2. Быстрый аналого-цифровой преобразователь поразрядного взвешивания /3/ (погрешность 10^{-3} , время измерения 300 мксек на 1 канал), с аналоговым коммутатором на 128 каналов.

3. Быстрый АЦП поразрядного взвешивания с измерителем импульсных величин на 15 каналов.

4. Измеритель частоты, на основе частотомера ЧЗ-34 с коммутатором на 16 каналов.

5. Система управления электронно-оптическим каналом /3/ на 32 канала с возможностью расширения до 64 каналов.

6. Измеритель координат пучков в канале накопителя ВЭПП-2М на 9 каналов.

7. Измеритель положения пучка в ЭОК Б-3М - ВЭПП-2 на основе пролетного проволочного датчика на 32 канала.

8. Электронная стойка сбора информации о радиационной поляризации электронного и позитронного пучков с 32 пересчетных схем.

9. Электронная стойка сбора информации о синхротронном излучении с 8 пересчетных схем и включающая в себя измерители тока электронного и позитронного пучков в накопителе ВЭПП-2М.

10. Дисплей ВИДЕОТОН-340.

11. Осциллограф СИ-48Б для вывода графической информации о ходе эксперимента.

12. Оперативные управляющие устройства типа "РУЧКА" /5/.

13. Телетайп.

14. Фотоввод - I500.

Все устройства подключаются к М-6000 или через стандартные дуплексные регистры, или специализированные коммутаторы (интерфейсы связи).

Для ввода и вывода информации можно применять не только программные каналы, но и каналы доступа в память.

Большое число элементов, управляемых с помощью многоканальных цифро-аналоговых преобразователей /4/, не имеет своих регистров памяти. Применение таких ЦАПов (один на 32 канала), оказалось экономически выгоднее для управления элементами не требующими высокой точности обработки заданных параметров, но потребовавшими непрерывного возобновления информации. Для этой цели был специально разработан канал чтения из памяти (КЧП), позволивший использовать некоторую область ОЗУ в качестве циркулирующей памяти и осуществить независимо от программы непрерывный вывод информации на объекты управления. Максимальное время цикла чтения слова по каналу КЧП составляет около 7,5 мксек. Применение КЧП позволило осуществить принцип непрерывной ретрансляции данных также и при остановке ЭВМ, что невозможно сделать с помощью программного канала.

Общая схема вывода информации на объекты управления представлена на рис.2. Вывод информации на управление элементами комплекса производится на следующие устройства:

1. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) статического типа /5/ с разрядной сеткой. Погрешность коэффициента деления $5 \cdot 10^{-5}$. Число двоичных разрядов 16, один знаковый.

2. Многоканальный ЦАП, состоящий из статического ЦАПа и синхронных аналоговых запоминающих в каждом канале /4/.

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

4. Командно-коммутирующие регистры (дискретные коммутаторы - ДК). Число коммутируемых объектов - 16. Выходы потенциально развязаны при помощи реле.

В настоящее время к КЧП подключены часть элементов, имеющих свои регистры памяти. Удобством такого рода подключения явилась упрощенная логика связи, исключение потери информации при возможных остановках машины, возможность быстрого наращивания количества элементов управления.

Подготовлен и введен в работу цикл программ, который условно можно разбить на следующие группы:

1. Программы управления.
2. Программы контроля.
3. Программы первичной обработки результатов эксперимента.

Функции программ управления сводятся к заполнению информацией соответствующей области ОЗУ, к которой подключен КЧП. В каждом режиме работы комплекса ВЭШ-2М в эту область вводится определенный массив чисел из памяти, где хранятся информации о различных режимах. Время и последовательность перехода с одного режима на другой задается отдельной программой. Смена режимов выполняется по команде оператора или автоматически при выполнении какого-либо условия (например, накопление заданного числа частиц в накопителе ВЭШ-2). Оператор посредством дисплея может менять по своему усмотрению любое число в любом из массивов.

Программы контроля следят за правильностью работы оконечных исполнительных устройств и сообщают оператору о несоответствии выходного сигнала числу (коду) в любом из каналов регулирования. Организована первичная обработка результатов эксперимента. Это — измерение светимости, измерение положения равновесной орбиты, измерение радиационной поляризации электронов. Информация выводится на дисплей или телетайп.

Система управления комплексом функционирует с 1973 г. Полностью автоматизирован процесс смены режимов накопления и перевода из одного кольца в другое электронных и позитронных пучков.

Все эксперименты проводятся только с помощью УВК М-6000.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер и др. Состояние работ на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭШ-2М. Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. I. М., "Наука", 1973.
2. Ю.А.Болванов, М.Н.Захваткин и др. Управление ускорительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР. Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, стр. 202. М., "Наука", 1975.
3. Б.А.Бакланов, В.Ф.Веремеенко и др. Система питания электромагнита и линз накопителя ВЭШ-3, управляемая с помощью ЭВМ. Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II. М., "Наука", 1973.
4. М.М.Карлинер, В.И.Нифонтов, А.Н.Острийко. Прецизионный цифро-аналоговый преобразователь. Автометрия, № 2, 1972.
5. М.Н.Захваткин, А.П.Лысенко, Э.Л.Неханович. Оперативное двухканальное управляющее устройство типа "РУЧКА". Препринт ИЯФ, 72-26, Новосибирск, 1976.

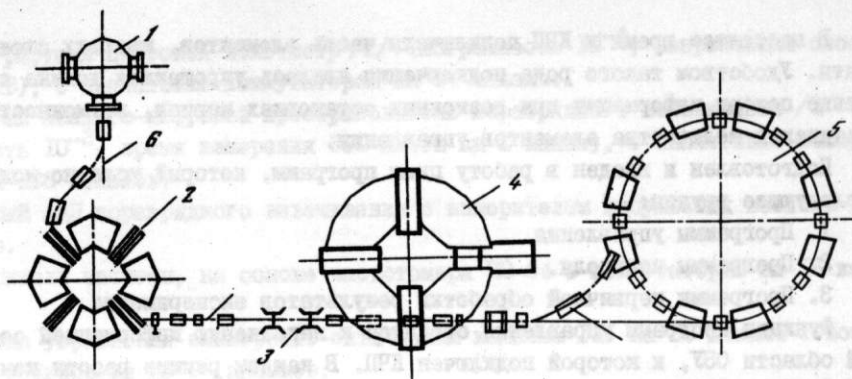


Рис. 1. План комплекса ВЭПП-2М

1 - импульсный линейный ускоритель; 2 - синхротрон Б-3М, 3 - конвертер; 4 - накопитель бустер ВЭПП-2; 5 - накопитель ВЭПП-2М; 6 - электронно-оптические каналы

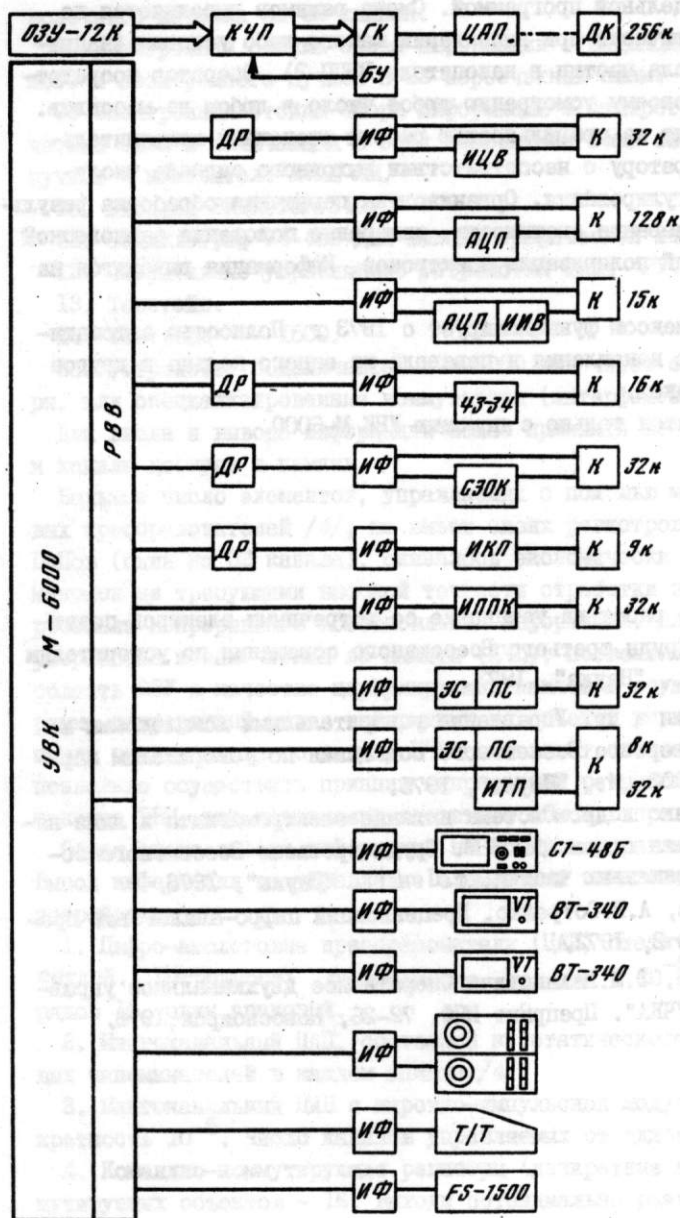


Рис. 2. Структурная схема управления комплексом

ИФ - интерфейс связи; ДР - дуплексный регистр; К - коммутатор связи с объектами; ИЦВ - интегрирующий цифровой вольтметр; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ИИВ - измеритель импульсных величин; СЭОК - схема управления электронно-оптическими каналами; ЦАП-ШИМ - цифроаналоговый преобразователь с широтно-импульсной модуляцией; ЭС - электронная стойка сбора информации; ПС - пересчетные схемы; ИКП - измеритель координат пучка; ИППК - измеритель параметров пучка в канале; ИТП - измеритель тока пучка; КЧП - канал чтения из памяти; ГК - групповой коммутатор; БУ - блок управления каналом чтения

138. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4

С.Д.Белов, Б.А.Гудков, Э.И.Елинер, А.А.Жоленц, А.С.Калинин, М.М.Карлинер,
В.И.Кокосулин, Э.А.Купер, Б.В.Левичев, А.С.Медведко, Н.А.Мезенцев,
В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Ю.И.Ощепков, Г.С.Пискунов, А.В.Проскурин,
И.Я.Протопопов, В.Я.Сазанский, А.Ф.Серов, В.С.Шабанов, Ю.И.Эйдельман

Институт ядерной физики СО АН СССР

В институте заканчивается изготовление и монтаж ускорительного комплекса ВЭПП-4 для экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками. В состав комплекса входят: накопитель заряженных частиц ВЭПП-3 (инжектор), электронно-оптический канал транспортировки заряженных частиц из ВЭПП-3 в ВЭПП-4 и собственно накопительное кольцо ВЭПП-4. В данной работе описывается система управления каналом и кольцом ВЭПП-4. Основные системы накопителя (силовое питание электромагнитов кольца, линз и корректоров прямолинейных промежутков; наблюдения и коррекция равновесной орбиты; питание мультипольных коррекций, а также электронно-оптический канал) не имеют ручного управления. Управление комплексом осуществляется из центра управления пятью универсальными ЭВМ Одра-1325 фирмы МЕРА-ЭЛЬВРО (ПНР) с интерфейсом и программным обеспечением фирмы "Ай-Си-Эл" (Англия). ЭВМ объединены межмашинной связью и с помощью аппаратуры передачи данных взаимодействуют с оконечными устройствами контроля и управления комплексом [1]. Общее число точек управления превышает 500, контроля 3000. Общение оператора с ЭВМ осуществляется при помощи дисплеев ВИДЕОТОН-340 (ВНР), буквенно-цифровых табло, цифровых пультов управления, преобразователей угла поворота в код для плавного управления выбранным каналом, планшетов для удобного вызова необходимых программ.

Канал транспортировки частиц (см.рис.1) насчитывает более 40 поворотных магнитов, дублетов и триплетов линз, нацеливающих катушек, работающих в импульсном режиме. При помощи цифро-аналоговых преобразователей регулируется уровень поля и время запуска элементов канала. В каждом из элементов контролируется величина поля, напряжение на конденсаторных батареях, время запуска генераторов; во время перепуска измеряется положение пучка вторично-эмиссионными датчиками, информация с которых обрабатывается в ЭВМ, что позволяет скорректировать параметры канала для последующих перепусков.

Силовое питание магнитной системы накопителя включает питание поворотных и фокусирующих элементов полуколец, дублетов квадрупольных линз, мощных корректоров, а также электромагнитов экспериментального промежутка - всего 20 каналов управления. Это позволяет перестраивать структуру промежутков для получения оптимальных характеристик пучка. С помощью АЦП, связанных с ЭВМ, осуществляется контроль токов и напряжений на обмотках элементов.

Коррекция равновесной орбиты и мультипольные коррекции содержат около 350 каналов, управляемых от ЭВМ посредством узлов с буферными запоминающими устройствами емкостью 64 слова. Предусмотрен машинный контроль токов и напряжений обмоток коррекции.

Система измерения положения равновесной орбиты содержит 52 пикап-станции. Датчик пикап-станции электростатический, имеет 2 пары пластин для измерения положения пучка. Обработка сигналов с датчиков будет производиться на 2-ой гармонике частоты обращения пучка в 8; обрабатывающих узлах, связанных с ЭВМ через буферное ЗУ. Электронику пикап-станций предполагается использовать также для проводки пучка.

Общий контроль включает:

- контроль температуры токонесущих шин - около 1300 точек
- измерение вакуума в канале и кольце ВЭПП-4 - около 300 точек
- контроль положения пробников и вакуумных клапанов - около 50 точек
- состояние источников питания и цепей управления - около 500 точек.

Большинство измерительной и управляющей аппаратуры кольца разработано в виде автономных узлов с буферными ЗУ емкостью 64 или 128 слов.

Использование ЭВМ для управления комплексом предполагает наличие развитой системы матобеспечения.

Очевидно, что должна быть создана большая библиотека, которая содержит достаточное количество рабочих, наладочных и тестовых программ; должна быть обеспечена возможность их изготовления, хранения, редактирования и обмена. Весьма существенна организация многопрограммной работы ЭВМ и возможность одновременной работы нескольких программ.

В системе матобеспечения комплекса ВЭПП-4 реализация этих возможностей обеспечивается операционной системой-диспетчером. Диспетчер выполняет следующие функции: загружает и запускает рабочие и вспомогательные программы, распределяет время работы центрального процессора между программами в соответствии с их приоритетами, осуществляет контроль за работой внешних устройств, обрабатывает внешние прерывания и, в соответствии с их характером, перестраивает работу находящихся в памяти программ, расширяет набор доступных для программ команд, экстракодов, осуществляет и контролирует межпроцессорную связь.

Оператор поддерживает контакт с диспетчером используя наборы директив, вводимых с клавиатуры алфавитно-цифрового дисплея.

Ввиду экспериментального характера установок, невозможности заранее предсказать последовательность операций, которые должна производить ЭВМ над элементами, необходима возможность написания программ на проблемно-ориентированном языке высокого уровня, вводимых непосредственно с пульта оператора комплекса. Опыт использования ЭВМ на ускорительно-накопительных установках ИЯФ подтверждает важность этого требования [2].

Для реализации этих требований, разработан язык, представляющий собой попытку объединения наиболее привлекательных возможностей языка ФОРТРАН-IV и некоторого набора специальных операторов, посредством которых программа может осуществлять различные функции по управлению установками комплекса.

Специальные операторы реализуются сгенерированной во время трансляции программы последовательности обращений к ранее написанным пакетам системных подпрограмм. Структура этой последовательности определяется описанием специального оператора, хранящимся в системной библиотеке. Подобные описания могут быть изменены, исключены из библиотеки или добавлены к имеющимся, поэтому набор специальных операторов при необходимости легко может быть изменен или расширен.

Транслятор, обрабатывая текст исходной программы, вводимый с клавиатуры алфавитно-цифрового дисплея или с магнитных носителей, генерирует один или несколько так называемых "полукомпилированных" сегментов. Формат сегментов позволяет объединять в одной программе также и сегменты, написанные на языках различных уровней, входящих в систему матобеспечения ОДРА-1300, таких, как ФОРТРАН PLAN и других.

Как полукompилированные сегменты, так и готовая программа могут быть сохранены для занесения в системные библиотеки.

В настоящее время большая часть аппаратуры передачи данных, управления и контроля изготовлена и отлажена.

Операционная система написана полностью и находится в состоянии отладки; написана большая часть транслятора и начата разработка вспомогательных программ систем компиляции - редактора, программ ведения библиотек, загрузчика.

Л и т е р а т у р а

1. М.Н.Захваткин, М.М.Карлинер, Э.Я.Купер, Э.Л.Неханевич, В.И.Нифонтов, А.Д.Орешков, Ю.И.Ощепков, Т.С.Пискунов, А.В.Проскурин, В.С.Шабанов, Ю.А.Болванов, В.А.Гусев, В.В.Каргалычев, А.В.Леденев. Управление ускорительно-накопительными комплексами в ИЯФ СО АН СССР. Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II. М., "Наука", 1975. 1975.
2. Б.В.Левичев, Н.А.Мезенцев, Е.А.Переведенцев, И.Я.Протопопов. Математическое обеспечение управления накопителем ВЭШ-3 от ЭВМ. Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II. М., "Наука", 1973.

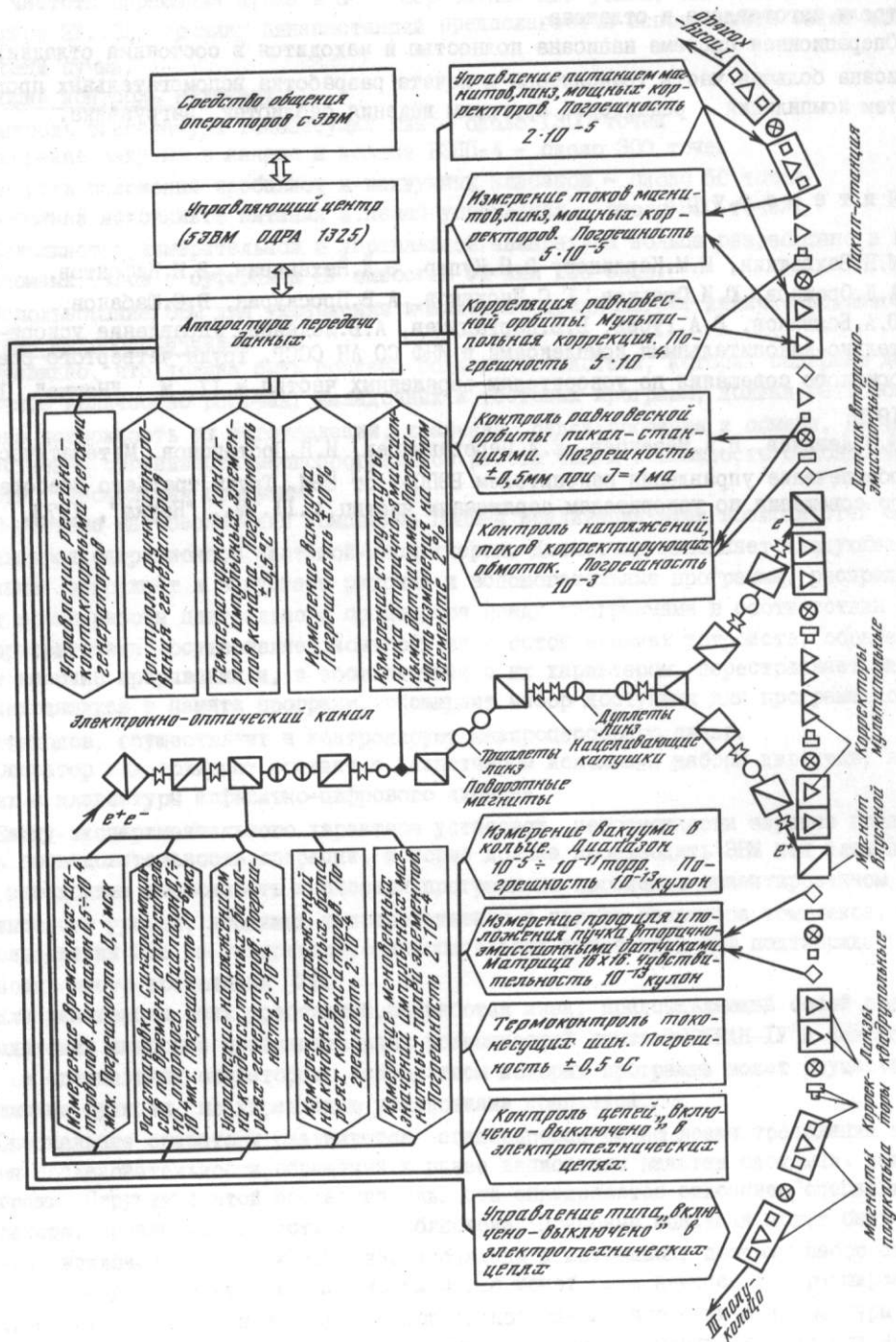


Рис. 1. Структурная схема системы управления и контроля

140. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ВСТРЕЧНЫХ ПРОТОН-АНТИПРОТОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ПРОЕКТЕ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БОЛЬШОГО СЕРПУХОВА

Г.И. Будвер, Т.А. Всеволожская, Н.С. Дижанский, И.Н. Мешков, В.В. Пархомчук,
Г.И. Смьлвестров, А.Н. Скринский

Институт ядерной физики СО АН СССР

Институт ядерной физики предлагает осуществить в программе ускорительно-накопительного комплекса Большого Серпухова встречные протон-антипротонные пучки на основе метода электронного охлаждения, предложенного и разработанного в Институте.

Метод электронного охлаждения /1/ позволяет демпфировать колебания протонов и антипротонов в накопителях, что в свою очередь дает возможность производить многократное накопление антипротонов в один и тот же фазовый объем, а также сжимать пучки до предельно малых размеров по всем направлениям. Уже потому, что речь идет о накоплении антипротонов в течение многих тысяч импульсов (циклов синхротрона) в один и тот же фазовый объем, этот метод имеет априорные преимущества по сравнению с любыми другими методами, не использующими демпфирования колебаний. Исключение представляет метод накопления, использующий распад $\tilde{\Lambda}_c$ -гиперонов /2/, но он крайне неэффективен.

Поскольку окончательный проект основного Серпуховского кольца не выбран, ниже будем рассматривать некоторый условный базовый ускоритель-накопитель с энергией 1 ТэВ, периметр 20 км, диаметром камеры $2A = 5$ см, числом бетатронных колебаний на обороте $\nu \sim 30$, что соответствует средней β -функции 120 м.

1. Некоторые основные понятия и оценки

Эффективность системы встречных пучков характеризуется энергией частиц (2E) в системе центра инерции, определяющей возможные реакции, и светимостью \mathcal{L} , определяющей количество реакций в единицу времени. Отметим, что для встречных пучков 2 x 1 ТэВ эффективная энергия составляет $2 \cdot 10^{15}$ эВ.

Светимость \mathcal{L} представляет собой величину, которая будучи умножена на сечение процесса, дает число актов в единицу времени

$$\mathcal{L} = \frac{N_p N_{\bar{p}}}{S T} \frac{\ell}{L}, \quad (1)$$

где N_p и $N_{\bar{p}}$ - число протонов и антипротонов; T - период обращения, S - сечение пучков, L - длина области пересечения пучков, ℓ - протяженность наблюдаемой части длины L . Максимальная светимость достигается при $\ell = L$ и максимальном значении $N_p N_{\bar{p}} / S$. Последнее определяется эффектами встречи.

Эффекты встречи связаны с тем, что собственное поле одного пучка создает резонансные условия для встречных частиц.

В результате этого минимальное сечение пучка, при котором встречный пучок может существовать в камере, определяется выражением:

$$S = \frac{r_p \beta_0 N}{\gamma \Delta \nu}, \quad (2)$$

где $r_p = 1,6 \cdot 10^{-16}$ см - классический радиус протона, $\gamma = E/mc^2$ - релятивистский фактор, β_0 - значение β -функции в месте встречи (аналог фокусного расстояния магнитной системы), $\Delta \nu$ - допустимый сдвиг частоты бетатронных колебаний, не приводящий к их нелинейной раскачке. Обычно $\Delta \nu$ лежит в пределах от 0,1 до 0,001 в зависимости от времени затухания, выбранной магнитной системы и искусства её настройки. На электрон-позитронных накопителях удается получить $\Delta \nu = 5 \cdot 10^{-2}$. В случае протон-антипротонных встречных пучков, когда отсутствует затухание на высокой энергии, следует, видимо, принять значение $\Delta \nu$ на порядок меньше. Тогда, считая, что пучок занимает в среднем половину апертуры базового накопителя, из (2) получим:

$$N \leq 10^{13}$$

При большем количестве частиц второй пучок погибает. Конечно, это относится только к двум встречающимся пучкам на одной дорожке. Поскольку минимальное значение S определяется только эффектами встречи, светимость установки при заданном числе антипротонов достигает максимума при $N_p = N_{\bar{p}}$. Дальнейшее увеличение числа протонов приводит только к расширению пучка антипротонов и, увеличивая фон, не увеличивает светимость.

Максимальная светимость при $N_p = N_{\bar{p}} = N$ есть:

$$\mathcal{L} = \frac{N \gamma \Delta \nu}{r_p \beta_0 T} \cdot \frac{c}{L} \approx 5 \cdot 10^{20} \frac{N}{\beta_0} \text{ (см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{)}. \quad (3)$$

Для увеличения светимости β_0 делают много меньше средней β -функции. При подобном изменении β_r и β_z предельное по эффектам встречи число частиц не меняется. При правильном согласовании магнитной системы места встречи с основной магнитной системой это не приведет к расширению пучка в основной магнитной системе. В противном случае уже небольшие неточности в этом согласовании могут привести к расширению пучка в основной магнитной системе и еще больше понизит предельное число частиц накопителя. На электрон-позитронных накопителях β_0 удается довести до 5 см (такой же должна быть сделана длина ступки). В нашем случае получение таких малых значений β -функции и коротких ступок может представить трудности: для малых β_0 могут потребоваться большие поля, а короткие ступки при отсутствии затухания скорее всего будет трудно сохранить длительное время, в особенности, для больших N . Поэтому будем каждый раз рассматривать два значения β -функции в месте встречи: 5 см и 200 см, которые в каком-то смысле, ограничивают сверху и снизу интересующий нас интервал.

В первом случае светимость $\mathcal{L} = 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ получается уже при $N = 10^{11}$ за счет того, что в месте встречи диаметр пучка $d = 4 \cdot 10^{-2}$ мм. Эти параметры уже достигнуты на современных электрон-позитронных накопителях.

При вакууме 10^{-11} торр взаимодействие с остаточным газом много меньше, чем со встречным пучком, и последнее определяет время жизни пучка при отсутствии коллективных процессов, радиочастотных шумов и т.п. При энергии 1 ТэВ определяющим является ядерное взаимодействие ($\sigma_{\text{яд}} \approx 5 \cdot 10^{-26} \text{ см}^{-2}$). Таким образом, время жизни пучка по этому процессу составляет 2,5 суток для $\beta_0 = 5$ см и 100 дней для $\beta_0 = 200$ см.

Как уже говорилось, в основу проекта положен метод электронного охлаждения/1/.

При инъекции антипротонов в промежуточный накопитель необходимо обеспечить захват антипротонов с большим разбросом поперечных импульсов, который и определяет в этом случае время охлаждения. Затухание достаточно сжатого пучка антипротонов происходит с характерным временем, определяемым температурой электронного

пучка. Вводя одномерный поперечный фазовый объем пучка антипротонов

$$\Omega = \pi \theta_p^2 \frac{x}{2} = \pi \theta_p^2 \beta \quad (4)$$

($x = 2\beta\theta$ - поперечный размер, все величины - на участке охлаждения), удобно представить время охлаждения цилиндрического пучка антипротонов в виде:

$$\tau_p = 0.1 \frac{\gamma^5 (v/c)^4}{r_p^2 \eta L} \frac{e}{J_e} \frac{\Omega^{5/2}}{\sqrt{\beta}}, \quad (5)$$

где $J_e = j_e S = j_e \Omega \beta$ - полный ток электронов.

Эффективность накопителя, где происходит охлаждение пучка антипротонов, в данном случае установки НАП, параметры которой приведены в разделе III, характеризуется захватываемым фазовым объемом Ω и временем затухания τ_p . Поскольку время затухания растет как $\Omega^{5/2}$, а число антипротонов, захватываемых из конвертора, только как Ω (см. (II), раздел II), наиболее рационально выбрать Ω таким, чтобы время охлаждения равнялось длительности цикла работы синхротрона:

$$\tau_p = 5 \text{ сек}$$

При токе $J_e = 100 \text{ а}$ и средней β -функции накопителя НАП, равной 5м, получаем $\Omega = 0,8 \cdot 10^{-2}$, что соответствует поперечному размеру пучка в накопителе 2,5 см.

II. Конверсия протонов в антипротоны

Фазовый объем рождающихся антипротонов будет малым несмотря на большие углы рождения вторичных частиц, если удастся сделать достаточно малым размер антипротонного пучка в месте конверсии. Такой прием очень эффективен при электрон-позитронной конверсии, что определяется малостью радиационной длины вольфрама, используемого в качестве материала конвертора (радиационная длина около 3мм). Ядерная длина даже самых тяжелых веществ не меньше 7 см. Продольная протяженность источника антипротонов приводит к появлению эффективного фазового объема у антипротонного пучка даже при бесконечно тонком пучке протонов. Для антипротонов с импульсом ρ средний квадрат углов рождения есть

$$\langle \theta^2 \rangle \approx \frac{2m_p m_e c^2}{\rho^2} \quad (6)$$

и разброс координат на выходе из конвертора длиной l_x равен

$$\Delta r = \pm l_x \theta / 2. \quad (7)$$

Соответственно, эффективный одномерный фазовый объем, в котором рождаются антипротоны, составляет

$$\Omega_p = \frac{\pi l_x \langle \theta^2 \rangle}{2} = \frac{\pi m_p m_e c^2 l_x}{\rho^2}. \quad (8)$$

Для антипротонов с импульсом $\rho = 1,8 \text{ ГэВ/с}$ при длине мишени $l_x = 7 \text{ см}$ (порядка длины ядерного поглощения) эта формула дает $\Omega_p = 0,9 \text{ рад.см.}$ Величина эта намного превышает возможный фазовый объем накопителя антипротонов с электронным охлаждением, и без специальных мер может быть использована лишь малая доля полного фазового объема рождающихся антипротонов.

Для накопителя с фазовым объемом Ω , много меньшим полного эмитанса Ω_p , и захватываемым относительным разбросом импульсов $\Delta\rho/\rho$ эффективный коэффициент конверсии протонов с импульсом 70 ГэВ/с в антипротоны с импульсом 1,8 ГэВ/с будет равен

$$\alpha = \frac{N_p}{N_p} = 2 \cdot 10^{-3} \Omega \frac{\Delta\rho}{\rho}. \quad (9)$$

При разбросе импульсов 5% и фазовом объеме накопителя $\Omega = 0,8 \cdot 10^{-2}$, при котором время охлаждения может быть сделано меньше времени следования импульсов ускорителя (5 сек), эффективный коэффициент конверсии будет около

$$\alpha = 0,8 \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

При числе ускоренных протонов 10^{13} протонов/импульс скорость накопления антипротонов будет равна $1,6 \cdot 10^6$ сек⁻¹. Уже такая скорость накопления может обеспечить предельную светимость установки, равную $3 \cdot 10^{31}$.

Скорость накопления антипротонов можно в несколько раз увеличить, используя для повышения коэффициента конверсии следующий прием. Вместо одной мишени - конвертора используются несколько коротких мишеней, между которыми помещаются разработанные в ИЯФ очень коротко-фокусные параболические или литиевые линзы /4/, передающие изображение пучка антипротонов с мишени на мишень (рис.1). При этом фазовые объемы антипротонов со всех мишеней совмещаются друг с другом, и итоговый фазовый объем (рассеяние в мишенях и линзах может быть сделано достаточно малым) оказывается равным фазовому объему короткой одиночной мишени. Кроме того, в запасе остается повышение на порядок даваемого ускорителем числа протонов, которое с использованием бустера должно составить 10^{14} протонов-импульс. Полное осуществление описываемой системы может обеспечить, таким образом, скорость накопления вплоть до $1 \cdot 10^8$ антипротонов/сек.

Для огромного числа экспериментов достаточно светимости 10^{31} см⁻² сек⁻¹. Такая светимость при скорости накопления порядка 10^8 антипротонов/сек будет достигаться очень быстро. В принципе же, эта скорость накопления (разумеется после решения остальных, очень сложных проблем) может обеспечить светимость еще на два порядка выше.

III. Накопитель антипротонов НАП и система электронного охлаждения

В рассматриваемом проекте установка НАП предназначена только для охлаждения конвертируемых антипротонов. Конечно, после охлаждения предыдущей порции антипротонов можно инжектировать новую порцию, как это делается в электрон-позитронных накопителях, однако, при очень большом числе импульсов накопления это технически не оправдано. Поэтому предполагается использование промежуточного накопителя с малой апертурой и упрощенной системой электронного охлаждения, в которой антипротоны будут инжектироваться после охлаждения в НАП и где будет осуществляться многократное накопление охлажденных и хорошо сформированных сгустков.

Установка НАП представляет собой накопитель типа рейстрек с краевой фокусировкой и длинными прямолинейными промежутками (7м), предназначенными для размещения устройств электронного охлаждения. Схема аналогична установке НАП-М /1/. Радиус поворотных магнитов 3м, вертикальная апертура 3 см, горизонтальная апертура 42см, магнитное поле 20 кГс, β -функция около 5м, энергия антипротонов 1,1 ГэВ (импульс 1,8 ГэВ/с).

При энергии накапливаемых антипротонов порядка ГэВ рационально использовать систему электронного охлаждения с рекуперацией энергии электронного пучка, аналогичную той, которая используется в настоящий момент на экспериментальной установке ИЯФ /1/. В прямолинейных промежутках накопителя в продольном магнитном поле пропускается со скоростью, равной скорости антипротонов, пучок электронов, энергия которых затем рекуперирована. В обсуждаемом случае речь идет о токе порядка 100 А при напряжении около 0,6 Мв. Соответствующие эксперименты по рекуперации энергии электронов, проведенные в более простой геометрии и примерно при том же напряжении, но несколько меньших токах, дали положительные результаты. Достаточно подробно изучен процесс рекуперации энергии электронов в продольном магнитном поле при напряжении около 100 кВ и токе 1А /5/. Совокупность полученных результатов показывает, что при реактивной мощности пучка в обсуждаемом проекте порядка 100 Вт его активная мощность также достаточно велика - порядка нескольких сот киловатт, поскольку напряжение на рекуператоре хотя практически и не за-

висит от полной энергии электронов (при достаточно хорошей оптике рекуператора), возрастает с ростом тока пучка (как $J_e^{2/3}$), и для тока 100А трудно рассчитывать, что его удастся сделать существенно меньше 1 кВ. Это ограничивает как величину тока в пучке, так и количество пучков. Поэтому в настоящее время рассматривается система, в которой один и тот же электронный пучок с током 100А многократно проходит через область электронного охлаждения, перемещаясь с одного радиуса на другой и меняя при этом энергию соответственно энергии антипротонов.

Для того, чтобы захватить антипротоны с малым поперечным фазовым объемом ($\Omega_z \approx \Omega_r$) и большим энергетическим разбросом, необходима радиальная апертура накопителя, много большая вертикальной. Сделаем размер электронного пучка по обоим направлениям одинаковым (порядка вертикальной апертуры). Если систему сопро-вождающим магнитного поля выполнить в виде плоского тора (рис.3), то центробеж-ный дрейф на поворотах вокруг радиальной оси за один оборот будет смещать элек-тронный пучок в радиальном направлении. При $H = 5$ кГс электронный ток 100 А прой-дет 14 раз через область охлаждения до рекуперации. Циркулирующий в камере ток будет порядка 1,4 кА при токе катода 100 А. Таким способом увеличение полезного тока пучка электронов достигается без увеличения мощности, рассеиваемой в коллек-торе, и нагрузки источников.

IV. Общая блок-схема и схема работы установок в режиме длительного накопления

Схематически комплекс (рис.2) состоит из следующих элементов:

1. Синхротрон на 76 ГэВ со всеми его инжекторными устройствами и т.п. При мак-симальных требованиях на число антипротонов может оказаться необходимой некото-рая переделка ВЧ-системы с тем, чтобы все частицы собрать в конце ускорения в один сгусток длиной меньше периметра НАП (или несколько сгустков такой же длины при использовании нескольких накопителей НАП). Того же результата можно достичь с помощью системы, укладывающей одновременно несколько сгустков в один НАП (си-стема каналов-задержек). При менее жестких требованиях можно ограничиться име-ющейся системой, попытавшись увеличить число частиц в одной сепаратрисе.

2. Протон-антипротонная конверсионная система с линзами многократного исполь-зования при магнитных полях в них порядка нескольких сот килогаусс (Рис.1).

3. Накопитель-охладитель антипротонов - установка НАП со средним радиусом 7,5м с кинетической энергией антипротонов 1,1 ГэВ (импульс 1,8 ГэВ/с).

4. Система электронного охлаждения с тороидальным магнитным полем. Ток като-да 100А, циркулирующий ток 1,4 кА, энергия электронов - 0,6 МэВ. Поскольку в то-роидальном продольном магнитном поле неизбежно имеется область, где ток электро-нов течет в обратном направлении, возможно использование системы одновременно на два накопителя НАП, расположенные друг над другом, что может оказаться полезным при инжекции из нескольких сепаратрис синхротрона.

5. Промежуточный накопитель антипротонов. Для него может быть выбрана магнит-ная система типа НАП-М с уменьшенной апертурой при энергии 1,1 ГэВ или другая фокусирующая структура, допускающая длинные промежутки для (упрощенной) системы электронного охлаждения.

6. Основной базовый ускоритель-накопитель на энергию 1 ТэВ. Для магнитной си-стемы ускорителя-накопителя для осуществления эффективной работы в режиме встреч-ных пучков характерна необходимость реализации в месте встречи пучков малое зна-чение β -функции, что следует из (3). Детальный анализ позволяет надеяться со-здать магнитную структуру, имеющую значение β функции вплоть до десяти санти-метров. Кроме поперечных размеров, необходимо уменьшение и длины сгустков до зна-чений порядка значения β -функции.

С точки зрения использования синхротрона и базового ускорителя для других экспериментов, а также для решения принципиальных вопросов, связанных с большим временем существования пучка на высокой энергии без затухания, наиболее перспективным может оказаться метод работы с утилизацией накопленных антипротонов между циклами подъема и спуска магнитного поля в базовом ускорителе. На первый взгляд, такая утилизация кажется тривиальной. Между двумя подъемами и спусками поля необходимо добавлять антипротоны в количестве, равном потерям частиц за счет взаимодействия с остаточным газом и встречным пучком, т.е. много меньше, чем без процесса утилизации [см. (1)]. Время жизни пучка на высокой энергии в этом случае достаточно сделать в несколько раз больше времени подъема и спуска поля в базовом накопителе, чтобы это практически не оказалось на средней светимости. При этом, резко облегчается решение вопросов борьбы с шумами и другие проблемы, связанные с длительным существованием пучков. В таком режиме в систему вводится среднее затухание, время которого равно длительности одного цикла. После каждого цикла пучок возвращается обновленным.

7. Система впуска-выпуска и система каналов, соединяющих следующие установки:

- а) синхротрон-конверсионная система;
- б) конверсионная система - накопитель-охладитель НАП;
- в) НАП - промежуточный накопитель;
- г) промежуточный накопитель - синхротрон;
- д) синхротрон - базовый ускоритель-накопитель.

Приведенная последовательность перечисления каналов отражает и последовательность перепуска частиц при инжекции антипротонов.

Проведенный анализ показывает, что метод электронного охлаждения позволяет при использовании Серпуховского синхротрона в качестве инжектора протонов накапливать достаточное количество антипротонов для осуществления на основном кольце ускорителя-накопителя встречных протон-антипротонных пучков очень высокой светимости на предельную энергию проектируемой Серпуховской машины. Использование разработок, проведенных в Новосибирске, позволяет придать системе накопления антипротонов конкретный вид, а проведенные экспериментальные исследования и технические испытания элементов и большие запасы, заложенные в проекте, дадут достаточную уверенность в его практической осуществимости.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, Я.С.Дербенев, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, Б.Н.Сукина, А.Н.Скринский. Атомная энергия, 40, №1, 49 (1976).
2. S. van der Meer. CERN/ISR-PO/70-5.
Report of VAPP-NAP Group. Proceedings of 8-th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators. CERN, p.72 (1971).
3. Б.Ф.Баянов, Г.И.Будкер, Г.С.Виллевалд, Т.А.Всеволожская, В.Н.Карасик, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский. Система эффективной протон-антипротонной конверсии. Настоящий сборник, доклад № 100.
5. В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, В.Г.Файнштейн. ЖТФ, 46, №8, 1678 (1976).

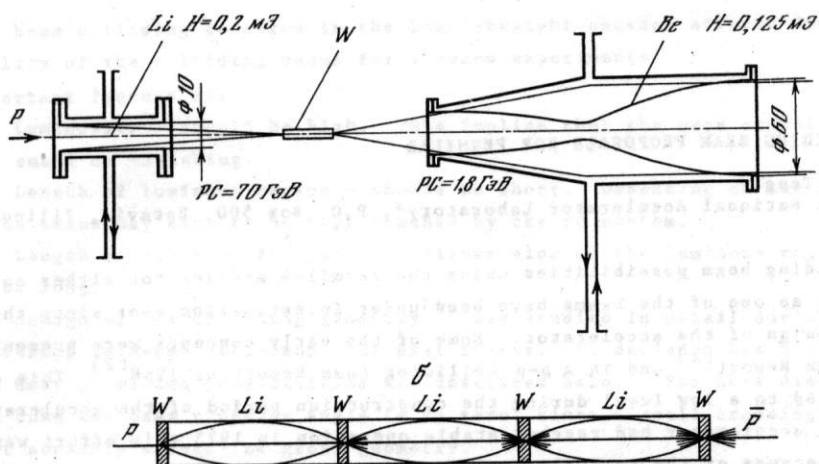


Рис. 1. Две схемы протон-антипротонной конверсии (а,б)

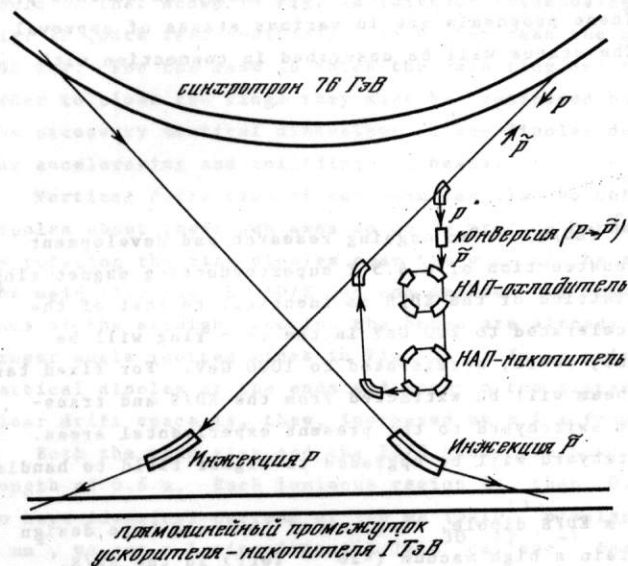
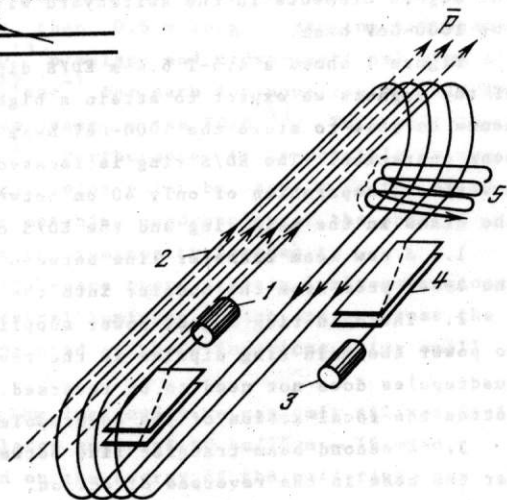


Рис. 2. Схема протон-антипротонного комплекса

Рис. 3. Схема установки электронного охлаждения

1 - электронная пушка; 2 - электронный пучок; 3 - коллектор электронов; 4 - отклоняющее устройство; 5 - витки магнита, создающего магнитное поле



143. ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЕ НАКОПИТЕЛИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ (Новосибирск)
ПРИГЛАШЕННЫЙ ДОКЛАД (ОБЗОР)

А. Н. Скринский

Первой установкой, на которой в 1967 году были поставлены эксперименты по физике электрон-позитронного взаимодействия, был ВЭШ-2 - электрон-позитронный накопитель Института ядерной физики (Новосибирск) на энергию до 2×670 МэВ./1/. В следующем году начались эксперименты на накопителе АСО (Франция). В настоящее время эксперименты в разных странах ведутся на 7 электрон-позитронных накопителях; максимальная достигнутая энергия - $2 \times 4,5$ ГэВ. Электрон-позитронные эксперименты дают значительную часть фундаментальной информации в современной физике элементарных частиц.

Накопитель ВЭШ-2 имел светимость до 2×10^{28} см⁻²сек⁻¹ и развитие исследований в его области энергий требовало резкого повышения светимости. В 1970 году эксперименты на ВЭШ-2 были закончены и комплекс ВЭШ-2 был дополнен специальным накопителем ВЭШ-2М /2,3/ с очень жесткой фокусировкой в местах встречи и длинными промежутками, свободными для экспериментов; старый накопитель ВЭШ-2 теперь используется в качестве бустера (рис.1). В стандартном режиме работы комплекса, эксперименты на ВЭШ-2М и накопление позитронов в ВЭШ-2 ведется почти непрерывно. После накопления (на энергии 120 МэВ) нужного позитронного тока, что занимает около 10 минут, энергия в ВЭШ-2 поднимается до энергии эксперимента и новая порция позитронов добавляется в ВЭШ-2М. Следующая пара минут уходит на добавление такой же порции электронов. Такой режим работы позволяет предельно приблизить среднюю светимость к максимальной.

Основные параметры накопителя ВЭШ-2М приведены в табл.1

Магнитная система накопителя ВЭШ-2М состоит из четырех зеркально-симметричных суперпериодов. Минимум вертикальной β -функции достигается в центре каждого из длинных прямолинейных промежутков, три из которых предназначены для экспериментов. Вертикальная β -функция в месте встречи может достигать 3 см.

Максимальная светимость, полученная на накопителе ВЭШ-2М на характерной энергии ϕ -мезонного резонанса 2×510 МэВ, составляет $1,2 \cdot 10^{30}$ см⁻²сек⁻¹ /4/, что на порядок превышает рекордные достижения для этой области энергии на других накопителях.

Список экспериментов, проведенных к настоящему времени на накопителе ВЭШ-2М, приведен в табл.2.

Обширный круг экспериментов планируется провести в следующем году. Особенно расширятся наши возможности после ввода в действие сверхпроводящего магнитного анализатора.

Особо следует остановиться на работе с поляризованными пучками (этот вопрос подробно обсуждается в докл. Шатунова /5/). Сейчас на ВЭШ-2М уже хорошо освоено получение поляризованных встречных пучков как одиночных, так и встречных. Поляризацию выгодно проводить на высокой энергии, а затем уже устанавливать уровень, нужный в данном эксперименте. Задачу прохождения спиновых резонансов (включая резонансы с частотой обращения) можно сейчас считать решенной и освоенной экспериментально.

Максимальный достигнутый ток поляризованных электронов и позитронов -12 мА, максимальная "поляризованная" светимость $-2 \cdot 10^{29} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.

Поляризованные пучки были использованы в нескольких экспериментах. Во-первых, оказалось возможным, измеряя среднюю частоту аномальной спиновой прецессии по частоте деполяризации внешним высокочастотным продольным магнитным полем, с высокой точностью измерять абсолютную энергию частиц в накопителе (уже сейчас лучше $2 \cdot 10^{-5}$). Это позволило измерить массу ψ -мезона с точностью $\pm 0,13$ МэВ (в два раза лучше средне-мировой) и сумму масс заряженных K^{\pm} -мезонов с точностью ± 70 КэВ (в два раза лучше среднемировой).

Более подробно опишем эксперимент по прецизионному сравнению аномальных магнитных моментов электрона и позитрона измерением их частот прецессии при их движении по одной и той же равновесной траектории в магнитном поле накопителя.

Эксперимент проводился на энергии 625 МэВ одновременно с двумя пучками (электронным и позитронным). По прошествии двойного времени поляризации включалось поле деполяризатора малой амплитуды и его частота медленно перестраивалась. По скачку скорости счета рассеянных внутри сгустков электронов и позитронов определялись их частоты прецессии. Сравнение этих частот дает сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона. Покажу, что эти моменты равны с точностью не хуже $1 \cdot 10^{-5}$, что на два порядка выше точности остальных экспериментов по измерению аномального магнитного момента позитрона.

Для демонстрации действительной разрешающей способности метода, энергии электронов и позитронов были слегка раздвинуты с помощью радиального электрического поля. По измерениям ясно видно, что частоты прецессии раздвигались на ожидаемую величину. Синхротронное излучение накопителя ВЭПП-2М используется сейчас для работ по анализу структур молекул, готовятся несколько новых экспериментов. На рис. 2 приведена схема каналов СИ. Работы ведутся институтами соответствующего профиля совместно с ИЯФ. Основная мощность излучения на ВЭПП-2М приходится на область $10 - 1000$ А. Поэтому на этом накопителе мы сосредоточили работы, в которых экспериментальные объекты соединяются непосредственно с вакуумной камерой накопителя (при эффективной дифференциальной откачке). Спектральная плотность и особенно спектральная яркость синхротронного излучения накопителя ВЭПП-2М в указанном спектральном диапазоне на много порядков превышает параметры источников любого другого известного типа.

Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-3 /6/ позволяет сейчас иметь частицы с энергией до 2,2 ГэВ в каждом пучке. Его схема приведена на рис. 3, основные параметры сведены в табл. 3.

Имеющаяся в настоящее время скорость накопления позитронов 1,5 мА/час (максимальный накопленный ток 5 мА) позволяет иметь светимость не выше $1 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Эта светимость, к сожалению, гораздо ниже тех, с которыми работают накопители **SPEAR** и **DORIS**. Учитывая это обстоятельство, а также значительно более широкий, чем подготовленный нами, фронт экспериментов, мы приняли решение ограничить наше сегодняшнее участие в исследовании ψ -мезонов точным (на порядок лучше, чем известно сейчас) измерением их масс с использованием разработанного нами и описанного выше метода прецизионного измерения масс рождающихся частиц по частоте аномальной спиновой прецессии. Поляризованные пучки на ВЭПП-3 уже получены и нужна точность (лучше $1 \cdot 10^{-4}$) абсолютного измерения энергии электронов уже достигнута.

Получение большого накопленного тока электронов (до 300 мА, $6 \cdot 10^{11}$ частиц) и однооборотный выпуск его с очень малым фазовым объемом на энергии 1,35 ГэВ позволили поставить работу по точному измерению магнитного момента Σ^+ - гиперона с

использованием магнитного поля в 1 МГс, получаемого с помощью взрывного генератора.

Накопитель ВЭШ-3 будет использоваться в комплексе ВЭШ-4 в качестве промежуточного накопителя позитронов и электронов. Основная задача в подготовке к этой функции — резкое увеличение скорости накопления позитронов. Для этой цели разработан специальный сильноточный ускоритель электронов на энергию выше 30 МэВ с током не менее 20 А при длительности 30 нсек, соответствующей времени оборота в синхротроне-инжекторе Б-4. ВЧ-питание линейного ускорителя осуществляется от мощного (не менее 50 Мвт) импульсного гирокона. Эти параметры линейного ускорителя позволяют инжектировать в синхротрон не менее 1 мА позитронов и поднять скорость накопления позитронов в ВЭШ-3, по крайней мере, до 3 мА/мин, что с запасом обеспечивает накопление нужных токов в ВЭШ-4. В настоящее время идет наладка этого линейного ускорителя.

Значительная часть рабочего времени накопителя ВЭШ-3 идет на эксперименты с использованием его синхротронного излучения. Основная часть мощности излучения при энергии 2 ГэВ из плоского магнита полукольца приходится на длины волн от 5 до 0,5 А (энергия квантов от 3 до 30 КэВ). В этом диапазоне спектральная плотность и яркость синхротронного излучения ВЭШ-3 на 2 порядка превышает параметры лучших острофокусных рентгеновских трубок с вращающимся анодом в характеристических линиях материала анода. По сравнению с тормозной частью спектра трубок превышение составляет 5-6 порядков. Предполагаемая постройка сверхпроводящей магнитной змейки повысит интенсивность синхротронного излучения еще на 2 порядка и поднимет верхнюю границу энергии полезных квантов до 100 КэВ.

Все эксперименты на ВЭШ-3 с использованием СИ ведутся на выпущенном сквозь бериллиевую фольгу пучке рентгеновского излучения.

Список основных экспериментов, выполненных на ВЭШ-3 с использованием СИ, приведен в табл.4.

Подходит к концу сооружение накопителя ВЭШ-4, который готовится к работе в электрон-позитронном варианте на энергии до 2 x 7 ГэВ. Общая схема комплекса приведена на рис.5 и основные параметры в табл.5. Как уже говорилось, электроны и позитроны в накопитель будут инжектироваться из ВЭШ-3 на энергии 1,8 ГэВ в виде хорошо сформированных коротких ступок с нужным распределением по сепаратрисам (простейший вариант — по одному ступку накопленных электронов и позитронов в ВЭШ-4).

Электрон-позитронный накопитель ВЭШ-4 /8/ имеет два полукольца со средним радиусом 45,5 м, соединенных двумя длинными промежутками (рис.4). В одном из них, длиной 40м, расположен впуск частиц в накопитель, резонаторы ВЧ системы и четыре дублета квадрупольных линз, осуществляющих фокусировку и согласование промежутка с полукольцами.

Второй промежуток длиной около 55 м предназначен для проведения экспериментов. В нем расположены три места встречи пучков и 15 квадрупольных линз, согласующих промежутки и создающих в местах встречи необходимые параметры пучков /9/.

В центральном месте встречи будет установлен магнитный детектор МД-1 (рис.5) с объемом поля 9,5 м³. Поле в детекторе направлено перпендикулярно плоскости орбиты пучков, что позволяет проводить анализ продуктов реакции, вылетающих даже под нулевым углом.

С каждой стороны от МД-1 стоят дополнительные поворотные магниты, поле в которых направлено в ту же сторону, что и в МД-1. Между доворотным магнитом и линзой находится система пропорциональных камер для регистрации рассеянных электронов в процессах двойного электророждения,



Эта система обеспечивает регистрацию рассеянных электронов с потерей энергии 14–50%. Кроме того, предусматривается смещение положения орбиты по радиусу внутри для регистрации электронов с меньшей потерей энергии. Так, при энергии 3,5 ГэВ можно регистрировать электроны с потерей энергии 5%. Точность измерения энергии рассеянных электронов будет составлять около 1%. Эффективность регистрации зависит от процесса и энергии и составляет от 1 до 30%.

Одной из серьезных проблем МД-1 является проблема фона от синхротронного излучения.

Магнитная система накопителя рассчитана на протон-антипротонный вариант ВАШ-НАП /10/ и позволяет иметь энергию до 20 ГэВ, что значительно выше максимальной энергии, допускаемой планируемой ВЧ мощностью и размером вакуумной камеры. На энергии 7 ГэВ поперечные размеры электронного и позитронного пучков достигают такой величины, что полностью заполняют вакуумную камеру с учетом необходимого запаса на возможные искажения орбиты и на обеспечение высокого времени жизни. Предусматривается возможность повышения жесткости магнитной системы накопителя, что позволит иметь энергию 8.5 ГэВ.

Ускорение частиц в ВЭШ-4 будет осуществляться 10 резонаторами, работающими на 221 гармонике частоты обращения ($\lambda = 1,65$ м). На этапе наладки накопителя предполагается работа с одним резонатором, запитанным от лампового генератора мощностью в 160 кВт. При этом максимальная возможная энергия пучков 3.9 ГэВ. Основное питание резонаторов мощностью в несколько мегаватт будет осуществляться от разрабатываемого в институте ВЧ генератора – гирокона /11/. Ввод этого генератора на полную мощность позволит получить предельную энергию.

Инжекция в ВЭШ-4 будет осуществляться по вертикали. Для более полного использования фазового объема накопителя принята схема инжекции с предударом накопленного пучка при помощи прединфлектора, установленного за полюсы бетатронных колебаний до инфлектора.

Полукольцо ВЭШ-4 включает в себя 19 элементов периодичности типа FBDB с совмещенными функциями фокусировки и поворота. Элемент периодичности состоит из двух магнитных блоков – фокусирующего и дефокусирующего (рис.6). Каждый магнитный блок на 2/3 занят однородным и на 1/3 фокусирующим (дефокусирующим) полями.

Проектный вакуум в камере накопителя с пучком лучше 10^{-8} торр на полукольцах и $10^{-10} + 10^{-11}$ в местах встречи /12/. Вакуум будет обеспечиваться, в основном, сосредоточенными и распределенными магниторазрядными насосами и сосредоточенными испарительными титановыми насосами.

Управление и контроль всеми элементами комплекса предусмотрены от ЭВМ /13/. Будут использоваться четыре ЭВМ Одра-1325 с 32к слов оперативной памяти и до 256к слов внешней памяти на магнитных барабанах. Все машины объединяются межмашинной связью. Взаимодействие с оператором будет осуществляться через дисплей "VIDEO-TOM-340", широкую печать, буквенно-цифровые индикаторы. Создается большой набор программ, обеспечивающих работу комплекса.

На рис.2* для разных энергий показана максимальная светимость в боковом месте встречи (В,С) в случае одного сгустка электронов и позитронов. Для центрального места встречи светимость всюду в 2,5 раза меньше. Ограничение светимости вызвано электромагнитным взаимодействием встречных пучков, характеризуемым линейным сдвигом частот бетатронных колебаний. Допустимый сдвиг частот обычно лежит в пределах $0,02 + 0,1$. В расчетах принято $\Delta V = 0,05$. При уменьшении энергии в накопителе светимость падает пропорционально $E^{4 \text{ кэВ}}$. На высоких энергиях светимость ограничена мощностью ВЧ, вкладываемой в пучки. Так, для мощности 1 МВт максималь-

* См. настоящий сборник, доклад № 47, рис.2.

** Считается, что фазовый объем пучков определяется квантовыми флуктуациями.

ная светимость $6 \cdot 10^{31}$ достигается на энергии 6.3 ГэВ. Далее с ростом энергии светимость уменьшается пропорционально E^{-3} .

Пунктирной линией на рисунке показана светимость для случая ограничения числа частиц вследствие малой скорости накопления или различных неустойчивостей, связанных с высокой интенсивностью.

Уменьшая β -функцию в месте встречи А до $10 + 15$ см можно, с потерей вертикального фазового объема, поднять светимость до $I = 10^{29} E(\text{ГэВ})$ на 1 мА позитронного тока. Это возможно, если осуществить перестройку фокусирующей системы экспериментального промежутка после накопления пучков /6,14/.

Предусмотрена возможность многослужбовой работы. Для уменьшения электромагнитного взаимодействия, орбиты e^+ и e^- предполагается разводить в неиспользуемых местах встречи и на противоположном азимуте с помощью электростатических пластин. Достаточное их количество позволит проводить эксперименты в произвольном месте встречи, а также в любой их комбинации.

ВЭПП-4 планируется также использовать как источник синхротронного излучения в области длин волн от 1 до 0,01 А (энергии квантов от 10 до 1000 КэВ) для проведения широкого круга экспериментов. Предусматривается несколько вариантов вывода синхротронного излучения из накопителя: а) из плоской части стандартного магнита в месте стыковки полукольца с прямолинейным промежутком; б) из магнитного детектора; в) из специально установленной системы из трех компенсирующих друг друга магнитов и сверхпроводящей магнитной "змейки".

Т а б л и ц а I

Основные параметры накопителя ВЭПП-2М

Максимальная энергия	- 670 МэВ
Средний радиус кольца	- 284.57 см
Частоты бетатронных колебаний	ν_z - 3.08
	ν_r - 3.06
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	- 0.17
Длина экспериментального промежутка	- 110.56 см
Радиационные потери энергии за оборот ($E=670\text{МэВ}$)	- 14.8 КэВ
Времена радиационного затухания	- 5.4, 8.8, 2.3 мсек
τ_z, τ_r, τ_s	
Энергетический разброс в пучке за счет квантовых флуктуаций синхротронного излучения $\Delta E/E$	- $0.48 \cdot 10^{-3}$
Значения β_z, β_r, η в местах встречи	- 6.5, 45, 41 см
Размеры пучков в месте встречи $2\sigma_z, 2\sigma_r$	- 0.02, 0.7 мм
(Время жизни (на малом токе, максимальное))	- 30 час.
Управление комплексом осуществляется с помощью ЭВМ М-6000	

Т а б л и ц а 2

Перечень экспериментов, проведенных на установке ВЭШ-2М

1. Изучение радиационной поляризации пучков.
2. Изучение азимутальной анизотропии рождения вторичных частиц на поляризованных встречных пучках:
 - а) $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ (E = 650 МэВ)
 - б) $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ (E = 510 МэВ)
3. Измерение массы Φ -мезона в канале $\Phi \rightarrow K_S K_L$ (детектор "ОЛЯ").
4. Измерение массы Φ -мезона в канале $\Phi \rightarrow K^+K^-$ (фотоэмульсионная методика).
5. Измерение массы заряженных каонов (фотоэмульсионная методика).
6. Поиск узких резонансов в области энергии 2E от 760 до 1340 МэВ.
7. Изучение ω - Φ интерференции в канале $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
8. Измерение $|F_\pi|^2$ в области энергии 2E от 900 до 1340 МэВ.
9. Измерение $|F_{K\pm}|^2$ при $2E > m_\pi$
10. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$
11. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
12. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S(\pi^+\pi^-)K_L(\pi^+\pi^-)$
13. Прецизионное сравнение магнитных моментов электрона и позитрона

Т а б л и ц а 3

Основные параметры накопителя ВЭШ-3

Максимальная энергия по магнитной системе	- 3.7 ГэВ
Существующая система ВЧ-питания позволяет работать на	- 2.2 ГэВ
Периметр	- 74.4 м
Коэффициент уплотнения орбит	- 0,0675
Время затухания при E = 0.45 ГэВ	- 0,1 сек
Частоты бет. колебаний	~ 5,2
Радиационные потери на оборот (КэВ)	- 13 E ⁴ ГэВ
Энергетический разброс $\pm \Delta E / E$	- 3,3 · 10 ⁻⁷ γ
Размеры пучка при энергии 2,2 ГэВ	
2 σ _r	- 0,1 мм
2 σ _z	- 2 мм
ℓ сгустка	- 30 см
Время жизни (на малом токе, макс.)	- 30 час.
Управление комплексом осуществляется с помощью ЭВМ "ОДРА-1325"	

Т а б л и ц а 4

Работы с СИ, проводимые на накопителе ВЭПП-3

Название работы	Время проведения работы	Институт
Рентгеноструктурный анализ биологических объектов	1973-1976 гг.	ИАЭ им. Курчатова, ИЯФ
Исследование структуры сократительных белков и мышц в разных функциональных состояниях	1974-1976 гг.	ИБФ, ИЯФ
Изучение электронной структуры катализаторов	1974-1976 гг.	ИКСО, ИЯФ
Исследование различных схем монохроматизации и кристалл-монохроматоров для синхротронного излучения	1975-1976	СКБРА
Рентгеновская голография	1976	ИЯФ
Исследование халькогенидных материалов в качестве регистрирующих сред для рентгеновского излучения; контактная микроскопия	1976	ИАЭ, ИЯФ
Рентгеновская топография кристаллов	1976	ИКАН СССР, ИГиГ, ИЯФ
Исследование люминесценции кристаллов	1976	МГУ, ИЯФ
Мессбауэровская дифрактометрия	1976	ИЯФ, ИАЭ
Оперативное определение малых концентраций элементов в соединениях	1976	ИЯФ, ИГиГ, ИНХ, ИБФ

Т а б л и ц а 5

Основные параметры накопителя ВЭПП-4

Максимальная энергия	- 7 ГэВ
Максимальная возможная светимость	
в месте встречи А	- $4 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$
в месте встречи В, С	- $1 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$
Периметр	- 366,2 м
Частоты бетатронных колебаний	- 9,2
Коэффициент уплотнения орбит	- 0,0204
Время затухания	- 3 мсек
Горизонтальный фазовый объем	- 3,3 мрад. см
Вертикальный фазовый объем	- 0,8 мрад. см
Энергетический разброс ($\Delta E/E$)	- $1,7 \cdot 10^{-3}$
Частота обращения	- 0,819 Мгц
Гармоника ВЧ	- 22Г
Радиационные потери на обороте	- 5,9 МэВ
Полное ускоряющее напряжение	- 10 МВ
Элемент периодичности	
Максимум β_z	- 12 м
Максимум β_z	- 12 м
Максимум ψ	- 2,3 м

Параметры мест встречи

Место встречи	Светимость* в $10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$	β_z (см)	β_r (см)	ψ (см)	ℓ (метр)	I^- (мА)
А	2,4 I^+ (мА) E(ГэВ)	46	223	100	9,5	1,6КЕ ³
В,С	6,7 I^+ (мА) E(ГэВ)	16,5	195	15	2,8	1,8КЕ ³

* Светимость указана для случая ограничения тока позитронов

ℓ - участок, свободный от квадрупольных линз;

К - коэффициент связи бетатронных колебаний;

I^- - требуемый электронный ток.

Л и т е р а т у р а

1. V.L.Auslender, G.I.Budker, Ju.N.Pestov, V.A.Sidorov, A.N.Skrinsky, A.G. Khabakhrashev. Physics letters, 25B, 433 (1967).
2. Г.И.Будкер, В.Е.Балакин, Л.М.Барков и др. Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М Новосибирского института ядерной физики. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1972), т.1, стр.318. М., "Наука", 1973.
3. Г.И.Будкер, И.Б.Вассерман, В.Г.Вещеревич и др. Состояние работ на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1974), т.II, стр. 313. М., "Наука", 1975.
4. И.Б.Вассерман, И.А.Кооп, В.П.Кутовой и др. Получение высокой светимости на накопителе ВЭПП-2М. Настоящий сборник, доклад №42.
5. Status report on electron-positron storage ring VEPP-3. The VIII Intern. Conf. on High Energy Accel. CERN. 1971. p.138.
6. Г.И.Будкер и др. Настоящий сборник, доклад №50.
7. A.N.Skrinsky. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-20, No.3, 756 (1973).
8. А.А.Жоленц, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский. Организация мест встречи пучков малой β - функцией на накопителе ВЭПП-4. Настоящий сборник, доклад №47.
9. Proton antiproton colliding beams. (Novosibirsk). The VIII International Conf. on High Energy Accelerators, CERN, 1971.p.72.
10. Г.И.Будкер и др. Высоочастотная система электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4 на основе гирокон-мощного УКВ генератора с негруппированным релятивистским пучком. Настоящий сборник, доклад №51.
11. В.В.Анашин. Вакуумная система накопителей заряженных частиц ИЯФ СО АН СССР. Настоящий сборник, доклад №48.
12. С.Д.Белов и др. Структура системы автоматического управления и контроля на накопителе ВЭПП-4. Настоящий сборник, доклад №138.
13. Г.Н.Кулипанов и др. Управление размером пучка в накопителе перестройкой фокусирующей системы. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1972), т.1, стр.324. М., "Наука", 1973.

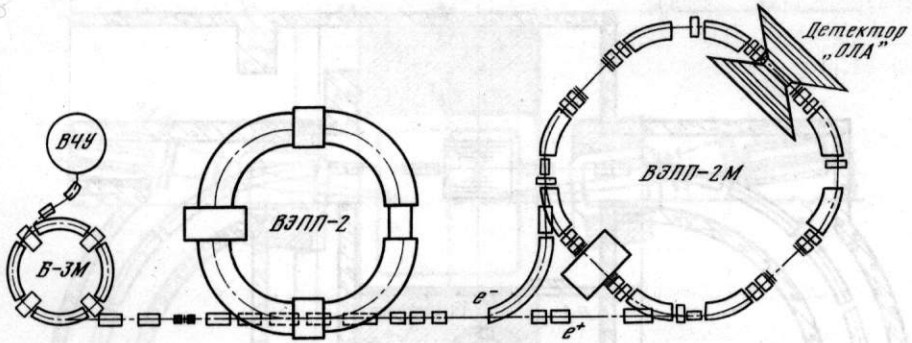


Рис. 1. Схема комплекса ВЭПП-2- ВЭПП-2М

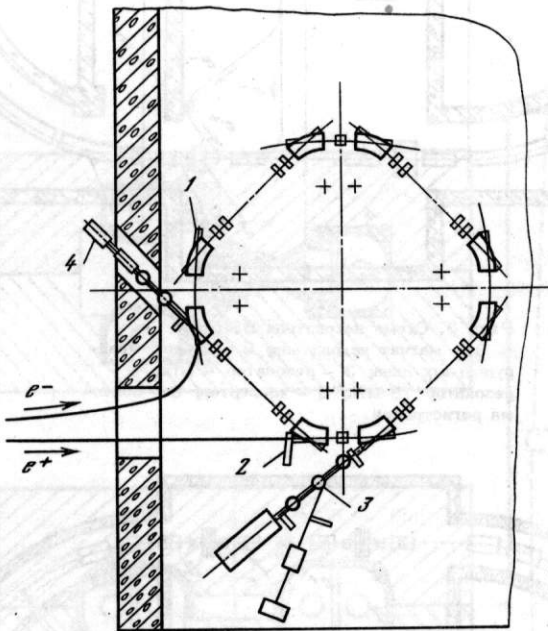


Рис. 2. Каналы СИ на накопителе ВЭПП-2М
1 - 4 - каналы для потребителей СИ

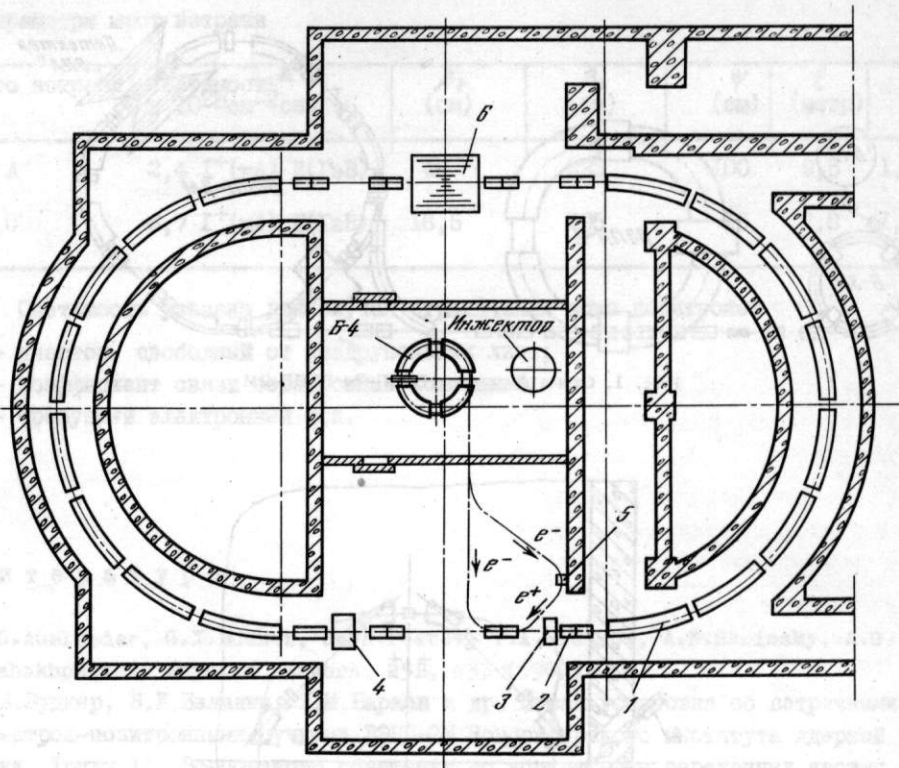


Рис. 3. Схема накопителя ВЭПП-3

1 - магнит накопителя; 2 - дублет квадрупольных линз; 3 - резонатор 4 мГц; 4 - резонатор 75 мГц; 5 - конвертор; 6 - система регистрации

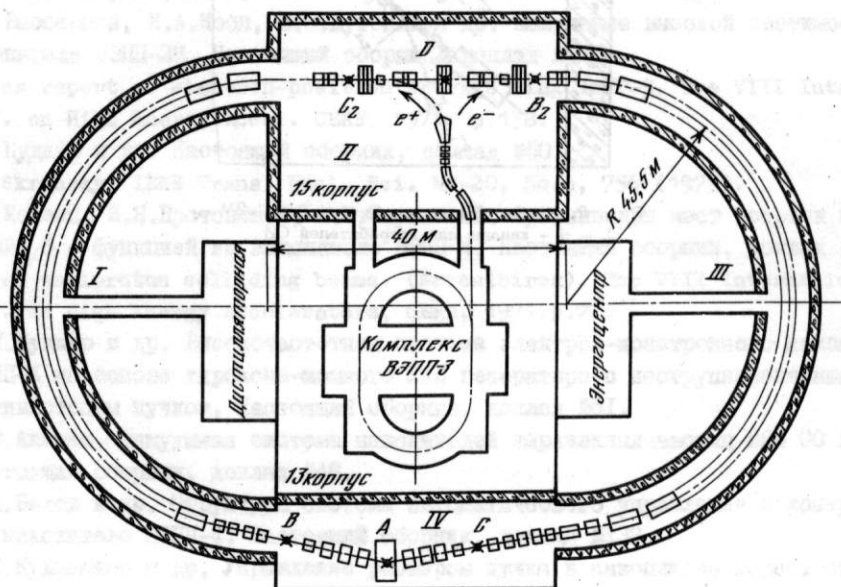


Рис. 4. Схема комплекса ВЭПП-4

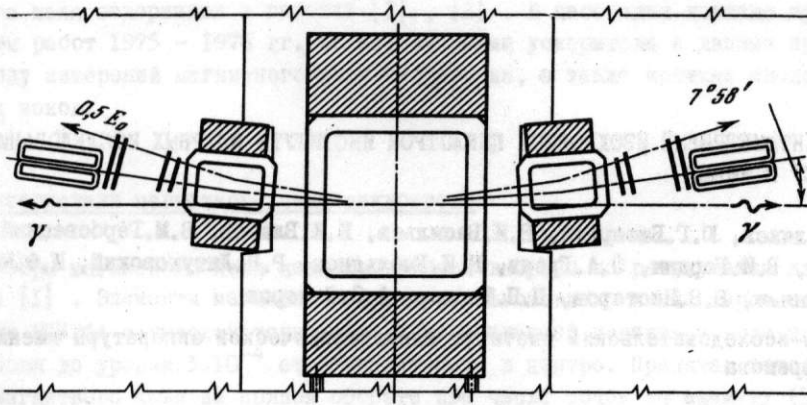


Рис. 5. Центральное место встречи накопителя ВЭПП-4

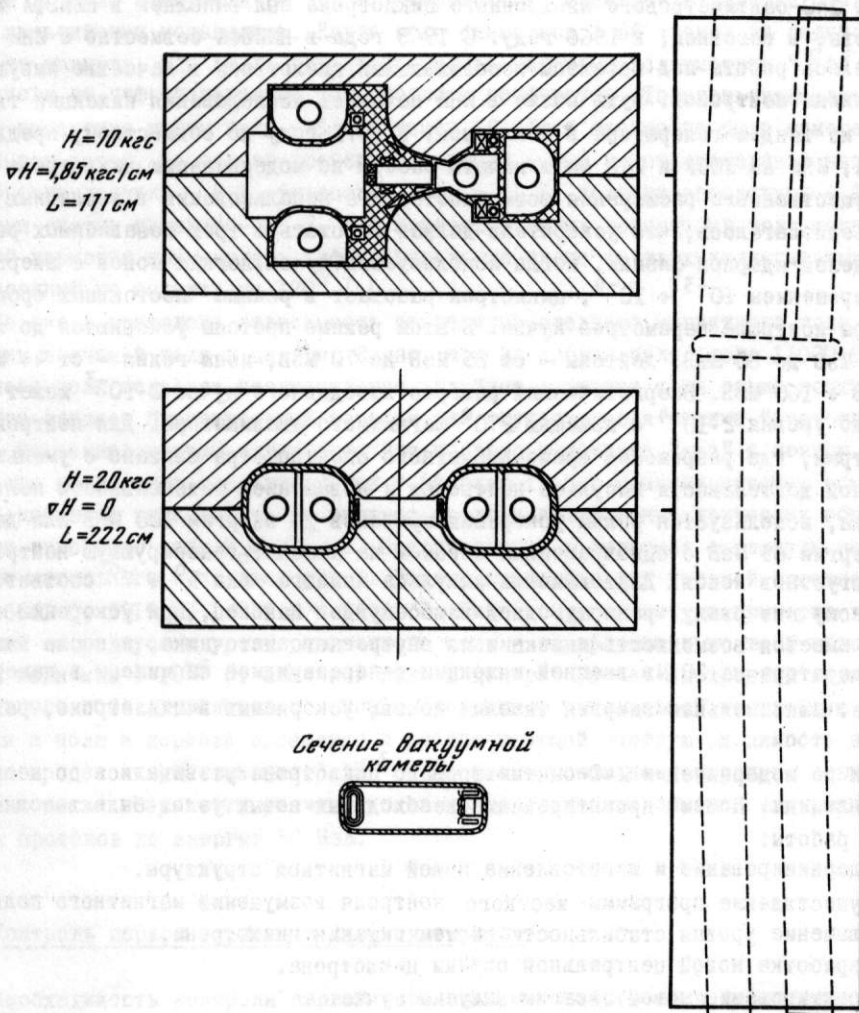


Рис. 6. Магнит накопителя ВЭПП-4