

И. 71

Институт ядерной физики СО АН СССР
Новосибирск

ВЭПП - 2

30 июня 1972 года

Рабочие материалы



1. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ВЭПП-2

В состав комплекса входят следующие установки:

- 1 - два ускорителя-инжектора типа ИЛУ;
- 2 - канал ИЛУ-Б-3М;
- 3 - электронный синхротрон Б-3М;
- 4 - канал Б-3М-ВЭПП-2;
- 5 - накопитель-бустер ВЭПП-2;
- 6 - канал ВЭПП-2 - ВЭПП-2М;
- 7 - накопительное кольцо ВЭПП-2М.

1. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ-ФОРИНЖЕКТОР ИЛУ

ИЛУ служит инжектором электронного синхротрона Б-3М. Основные параметры ускорителя: кинетическая энергия электронов $E_{кин} \approx 3$ Мэв; ток в импульсе длительностью ≈ 40 нсек до 50а при энергетическом разбросе $\frac{\Delta E}{E} \approx 5\%$. Эмиттанс пучка $\sim 1,5 \cdot 10^2$ см.рад. Частота повторения импульсов инжекции - до 2 ги, ограничена охлаждением.

2. ПОЗИТРОННАЯ ПРОГРАММА С ДВУМЯ ИЛУ

Схема получения позитронного пучка в этом варианте выглядит следующим образом: пучок электронов с $E = 3$ Мэв, ускоренный в ИЛУ-1, попадает в ИЛУ-2, противофазный с первым, где ускоряются до $E = 6$ Мэв. В насадке ИЛУ-2 установлен вольфрамовый конвертер толщиной $\sim 0,7$ мм. Полученные позитроны ускоряются во втором зазоре ИЛУ-2 до $E \approx 3$ Мэв, инжектируются в Б-3М и после ускорения инжектируются в накопитель ВЭПП-2. При токе пучки $I_e \approx 300$ а можно надеяться иметь скорость накопления позитронов в ВЭПП-2 до 20 ма/мин. (по сравнению с $\frac{dI}{dt} \approx 1 \frac{MA}{M.C.T.}$ достигнутой в 1969-70гг.).

В настоящее время ведутся эксперименты по получению предельного тока позитронов и измерению их фазового объема.

3. ЭЛЕКТРОННЫЙ СИНХРОТРОН Б-3М.

Синхротрон Б-3М служит инжектором для комплекса ВЭПП-2. Инжекция в синхротрон однооборотная, на энергии 3Мэв, адмитанс по Z : 10^{-1} рад.см, по X : $0,5 \cdot 10^{-1}$ рад.см, энергетический разброс при инжекции $\frac{\Delta E}{E} = \pm 1,5\%$. Максимальная энергия выпущенного пучка $E = 300$ Мэв; выпущенный (за один оборот) ток $\sim 0,5$ а; размер пучка на выходе $\Delta Y \times \Delta X \approx 1,5 \times 0,5$ см. Система питания ограничивает частоту повторения циклов ускорения величиной 3ги. Обычно ускоритель работает на частоте 0,5 - 1ги. При энергии выпущенного пучка $E_{вып} = 120$ Мэв выпущенный ток равен $\approx 0,1-0,2$ а.

Во время реконструкции комплекса ВЭПП-2 в 1970-71 гг. на синхротроне были сделаны следующие изменения:

1) сделана вертикальная инжекция со спектральным разложением электронов по энергии с помощью магнитов канала ИЛУ-Б-3М;

2) изменена конструкция дефлектора так, что он не выступает в апертуру ускорителя, вследствие чего полезная радиальная апертура увеличилась на 30%;

3) сделана новая система питания магнита синхротрона на тиристорах;

4) вакуумная откачка ИЛУ и Б-3М ведется магниторазрядными насосами с заливаемыми азотными ловушками.

Ведутся работы по увеличению выпущенного из Б-3М тока и улучшению надежности работы ускорителя.

4. КАНАЛ Б3М-ВЭПП-2

Используется прямой канал старой конструкции; для проводки электронного или позитронного пучка изменяется режим работы элементов накала. Проектная энергия пучка, которую пропускает канал, $E=340$ Мэв (верхний магнит - 200 Мэв). Фактически канал длительное время (1965-1970) работал в режиме инжекции позитронов при энергии $E^- = 250$ Мэв, $E^+ = 125$ Мэв; по-видимому, тот же режим будет сохранен и в дальнейшем, а инжекция электронов будет производиться при энергии $E^- = 125$ Мэв, без пластины-конвертера. Расчетный коэффициент конверсии позитронов ($\frac{dE}{E} = \pm 0,5\%$) $= 2 \cdot 10^{-4}$, коэффициент конверсии при работе с комплексом в 1968-70 гг. составлял $\approx 0,5 \cdot 10^{-4}$. Это соответствует скорости накопления позитронов в ВЭПП-2 $\frac{dN}{dt} = 1 \frac{\text{ма}}{\text{мин}}$ (при выпущенном токе $\approx 0,5$ а и частоте повторения импульсов инжекции 0,75 гц.

Во время реконструкции установлены коммутаторы для изменения полярности всех элементов канала (для проводки по одному каналу пучков обоих знаков). Генератор верхнего магнита ВЭПП-2 (выпускного) работает в настоящее время также и на выпускной магнит (через коммутатор). Подготавливается отдельный генератор для выпускного магнита. Заново проведена юстировка канала.

В настоящее время идет работа с электронным пучком ($E = 125$ Мэв). Для получения позитронов прежним способом необходим ремонт генераторов X -линз и установка на место самих X -линз. Возможности увеличения скорости накопления позитронов (позитронная программа с двумя ИЛУ и др.) изучаются.

5. НАКОПИТЕЛЬ ВЭПП-2

Накопительное кольцо ВЭПП-2 должно служить для накопления пучка позитронов (или электронов) и последующего выпуска сформированного (за счет радиационного затухания) сгустка частиц для инъекции в накопительное кольцо ВЭПП-2М. Кроме того, на накопителе ВЭПП-2 предполагается проводить эксперименты по радиационной поляризации частиц и по электровозбуждению ядер. Для выполнения этих новых задач были внесены некоторые изменения в конструкцию накопителя. В промежутке №1 установлен выпускной импульсный безжелезный магнит с окном 4×12 мм, рассчитанный на выпуск пучка с энергией до 700 Мэв. В промежутке №3 установлен магнит с железным ярмом, обеспечивающий подведение пучка к носу выпускного магнита перед выпуском, а также петля-деполяризатор для экспериментов по поляризации пучка. Импульсным дефектором служат бывшие пластины разведения во втором квадранте, экороченные на вакуумную камеру в промежутке №2. Промежуток №4 изготовлен заново и приспособлен для проведения экспериментов по электровозбуждению ядер.

Введена в действие новая система стабилизации тока с подавлением пульсаций частоты 6гц, управляемая потенциометром или цифро-аналоговым преобразователем, связанным с системой управления питанием магнитных элементов ВЭПП-2. Готовится система шунтировки квадрантов накопителя для управления положением орбиты в радиальном направлении. Сделана система дистанционно управляемых выпрямителей для коррекции бетатронных частот и вертикального положения орбиты.

При работе комплекса в 1969-70гг. были достигнуты следующие предельные результаты: максимальная энергия пучка в накопителе $E = 670$ Мэв; максимальный ток электронов 4а (на энергии 200 Мэв); максимальный накопленный ток позитронов 60ма (на энергии 125 Мэв).

6. КАНАЛ ВЭПП-2 - ВЭПП-2М

Канал предназначен на проводки сформированных в накопителе ВЭПП-2 пучков электронов и позитронов с энергией до 700 МэВ. Канал должен обеспечить пропускание практически без потерь пучков с фазовым объемом по $z - \xi_z = \frac{V_z \Delta z}{c} \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ см; по $\Delta z = 2,0 \cdot 10^{-6}$ см, с энергетическим разбросом $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$,

а также согласование фазовых объемов инжектируемых пучков с акцептансом накопителя ВЭПП-2М. Требуется высокая стабильность магнитного поля в поворотных магнитах канала: $\sim 3 \cdot 10^{-4}$. Существующая система стабилизации генераторов импульсных магнитов (выпускного из ВЭПП-2 и впускных в ВЭПП-2М) не удовлетворяет этому требованию, поэтому рассматривается вопрос о модернизации системы стабилизации и контроля поля импульсных магнитов. Перевод пучка в прямой или "поворотный" канал (для инжекции в ВЭПП-2М против или по часовой стрелке) осуществляется забрасывающим магнитом. Заранее не установлено, в каком направлении должны двигаться в ВЭПП-2М электроны и в каком - позитроны; смена направления движения частиц данного знака производится изменением полярности питающего напряжения на элементах канала и накопителя. Первоначально трассировка канала и накопителя в обоих направлениях будет проводиться электронным пучком.

Для контроля за движением пучка в канале установлено 13 пробников с люминофорами и телекамерами и 8 пар сцинтилляторов с ФЭУ, которые ограничивают апертуру канала по z или по Δz таким образом, что при отклонении пучка от нормальной траектории он попадает в сцинтиллятор, давая сигнал об ошибке в настройке канала или в системе выпуска из ВЭПП-2. Кроме того, в канале установлен пролетный пикап (трансформатор тока, нагруженный на резонансный контур с частотой 130 мГц). Изготавливается цилиндр Фарадея для измерения величины выпущенного тока.

Вакуумная камера канала изготовлена из нержавеющей стали. Соединения частично сварные, частично на металлических уплотнениях. В местах соединения канала с вакуумной камерой накопителя ВЭПП-2М установлены два электромагнитных клапана, которые в закрытом состоянии обеспечивают малое перетекание из канала в накопитель и должны открываться на короткое время (~ 1 сек) в момент инжекции пучка. Такой же клапан, отсекающий канал от втуточной вакуумной камеры ВЭПП-2, должен быть установлен в бу-

дущем. Канал откачивается 5-ю МРН типа НОРД-10 со скоростью откачки 5 ± 8 л/сек каждый.

В настоящее время канал соединен с обоими накопителями и откачан до вакуума $\sim 10^{-7}$ торр.

7. НАКОПИТЕЛЬ ВЭПП-2М

а) Общие данные

Накопитель с сильной фокусировкой ВЭПП-2М предназначен для проведения экспериментов со встречными пучками электронов и позитронов с максимальной энергией 2×670 Мэв. Структурно накопитель состоит из 8 секций магнитной системы, четырех коротких и четырех длинных промежутков. В коротких промежутках расположены вспомогательные квадрупольные линзы (по одной в каждом промежутке), вакуумные магниты, пластины инфлекторов и электростатических квадрупольей. В одном из длинных промежутков (первом) расположен резонатор, при остальных предназначены для проведения экспериментов. Временно в них установлены пробники-люминофоры для наблюдения за инжекцией пучка. Частота обращения частиц в накопителе $f_c = 16,77$ мГц (составляет $2/3$ от частоты обращения в ВЭПП-2), средний радиус орбиты $\bar{r} = 2,84$ м, частота бетатронных колебаний $\nu_z \approx \bar{\nu}_z \approx 3,05$; коэффициент пространственного уплотнения орбит $\alpha = 0,18$; β -функции в месте встречи: $\beta_z = 5 \pm 10$ см; $\beta_z = 30 \pm 40$ см. Адмитанс накопителя равен:

$$\mathcal{E}_z = \left(\frac{A_z^2}{\beta_z} \right)_{\min} \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ см}; \quad \mathcal{E}_z = \left(\frac{A_z^2}{\beta_z} \right)_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ см},$$

где A_z, A_z - полуапертуры.

Предполагается, что инжекция в накопитель ВЭПП-2М будет производиться на энергии, на которой проводится эксперимент, небольшими порциями по 5 ± 10 ма поочередно электронами и позитронами.

В настоящее время сборка накопителя закончена, вакуумная камера сварена полностью и откачана. К 30 июня 1972 г. пучок электронов (ток 5 ± 10 ма, энергия 125 Мэв) выпущен из ВЭПП-2 и проведен по прямому каналу на вход накопителя ВЭПП-2М.

В ближайшее время предполагается начать эксперименты по захвату пучка в накопитель и измерению его параметров (орбита, бетатронные частоты и т.д.).

б) МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система ВЭПП-2М состоит из 8 одинаковых секций. Каждая секция содержит один поворотный магнит с однородным полем ($Z = 1220$ мм, $B_{max} = 17,5$ кгс, зазор $h = 30$ мм), две квадрупольные линзы ($(\frac{dB}{dx})_{max} = 0,5 \frac{кгс}{см}$, диаметр вписанной окружности $d = 34$ мм), две секступольные линзы ($(\frac{d^2B}{dx^2})_{max} = 10 \frac{кгс}{см^2}$, $d = 43$ мм), две октупольные линзы ($(\frac{d^3B}{dx^3})_{max} = 2 \cdot 10^3 \frac{кгс}{см^3}$; $d = 43$ мм).

Кроме того, в состав магнитной системы входят четыре квадрупольные линзы ($(\frac{dB}{dx})_{max} = 1,4 \frac{кгс}{см}$, $d = 41$ мм), расположенные в коротких промежутках. В магниты заложены вспомогательные обмотки для коррекции величины поля, а в квадрупольные линзы — обмотки для коррекции градиента и положения оси линзы. Питание основных обмоток магнитов и больших квадрупольных линз, включенных последовательно, осуществляется на первом этапе мотор-генераторами с мощностью 80 квт и током 2,4 ка, что обеспечивает энергию пучка $E = 220$ Мэв. Для достижения максимальной энергии $E = 670$ Мэв создается система питания на выпрямителях с током 8 ка, мощностью 800 квт. Питание корректирующих обмоток и других маломощных магнитных элементов накопителя и канала производится с помощью многоканальной системы стабилизации токов (80 отдельных каналов, функционально объединенных в единую систему). Она включает в себя оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) на 18 18-ти разрядных слов, в котором в виде кодов хранится информация о токе в каждом канале. Запись кода в ОЗУ осуществляется с помощью блока ручного набора кода и адреса, или из ЭЦВМ. Коды, хранящиеся в ОЗУ, поочередно считываются в ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь), который задает опорное напряжение на вход многоканального усилителя сигнала ошибки (МУСО). Синхронно с записью кода в ЦАП на второй вход МУСО подается напряжение с шунта, пропорциональное току в данном канале стабилизации. МУСО сравнивает напряжение с шунтов с опорным напряжением; усиленный

сигнал ошибки коммутируется на вход усилителей мощности, которые поддерживают ток в нагрузке в соответствии с заданным портовым напряжением (кодом в ОЗУ). Проектируемая стабильность тока в магнитном элементе $\frac{\Delta I}{I} \approx 2 \cdot 10^{-4}$. В настоящее время проводится наладка системы, часть каналов уже используется; получена стабильность тока не хуже $1 \cdot 10^{-3}$.

Для управления системой стабилизации предполагается использовать ЭЦВМ "ОЗРА", для которой подготавливается цикл программ, позволяющих заносить коды в ОЗУ, а также заменять их в заданном временном режиме, что даст возможность плавно менять параметры магнитной системы. Управление ЭЦВМ (вызов программ, задание параметров) должно производиться с пульта управления ВЭПП-2 с помощью телетайпа.

Разработана система, позволяющая контролировать токи во всех обмотках магнитных элементов накопителя и кала, и в дальнейшем также токи (или поля) в импульсных магнитах канала и токи пучков в ВЭПП-2 и ВЭПП-2М до и после импульса инжекции. Вывод информации осуществляется на цифровые табло, на цифровое печатающее устройство; а также в ЭЦВМ (пока - в "Минск-22").

Для точного контроля энергии пучка в накопителе предполагается установить еще один магнит, идентичный магнитам накопительного кольца и включенный последовательно с ними, в который можно заложить датчики (ЯМР или Холла) для измерения магнитного поля.

в) ВЧ-СИСТЕМА

ВЧ-система накопителя ВЭПП-2М состоит из резонатора на частоту 200 мгц (12 гармоника частоты обращения), ВЧ-генератора типа "Лен" с мощностью 7,5 квт и системы управления.

Резонатор тороидального типа с одним ускоряющим зазором рассчитан на максимальное напряжение 300 кв, имеет добротность $\sim 2 \cdot 10^4$.

Предполагается, что накопитель должен работать в режиме, когда существуют по одному сгустку электронов и позитронов. Система управления позволяет переводить сгусток частиц из накопителя ВЭПП-2 в любую выбранную сепаратрису ВЧ в накопителе ВЭПП-2М (маркированную задающей частотой 8,4 мгц - 1/2 гармоникой чк-

тоты обращения).

Для этого частоты обращения в двух накопителях синхронизируются таким образом, чтобы их соотношение составляло $= 3/2$, фаза частоты 75 мгц ВЭПП-2, определяющая положение пучка, привязывается к фазе задающей частоты 8,4 мгц (для фиксации нужной сепаратрисы), а также (более точно) к фазе частоты резонатора 200 мгц - для точного попадания пучка в центр сепаратрисы. Таким образом, можно выбрать место встречи в центре любого из длинных промежутков. Поскольку ни генератор ВЧ, ни резонатор еще не готовы, для обеспечения первого этапа запуска накопителя (на энергии до 200 Мэв) будут использованы маломощный генератор (0,5 квт) и резонатор с напряжением до 5 кв, также на частоту 200 мгц. Эта система испытана; получено амплитудное напряжение на резонаторе около 5 кв при мощности генератора 0,3 квт.

Частота фазовых колебаний:

$$f \text{ (кГц)} = 9,85 \sqrt{\frac{V_s \text{ (кВ)}}{E \text{ (рЭв)}}$$

ширина сепаратрисы:

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{мск}} = \pm 0,54 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{V_s \text{ (кВ)}}{E \text{ (рЭв)}}$$

г) СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

Система инжекции для впуска пучка по каждому из направлений содержит импульсный безжелезный магнит, пластину предудара и две пластины инфлектора. Вся система рассчитана на инжекцию пучка с любой энергией в диапазоне от 100 до 700 Мэв. Впуск происходит в вертикальном направлении. Импульсный магнит имеет следующие параметры: радиус кривизны $\mathcal{R} = 600$ мм, угол поворота 18° , максимальное поле $\delta = 40$ кгс (при $E=700$ Мэв), апертюра по \mathcal{Z} - 4 мм, по \mathcal{Z} - 6 мм, длительность импульса - 60 мксек. Существующий магнит испытан с полем 30 кгс, он имеет неоднородное поле с $n \approx 3$. Рассматривается вариант магнита с однород-

ным полем.

Импульсные магниты расположены в коротких промежутках пучок частиц после впуска совершает $3/4$ бетатронного колебания, прежде чем приходит в следующий короткий промежуток, в котором расположены пластины инфлектора. На пластины, нагруженные на волновое сопротивление подаются прямоугольные импульсы напряжения длительностью 40 нсек, с напряжением до 40 кв, величину которого можно менять ступенями с помощью аттенюатора. Для уменьшения амплитуды колебаний накопленного пучка, создаваемых инфлектором, он возбуждается предварительно пластиной предудара, расположенной в коротком прямолинейном промежутке, противоположном инфлекторному промежутку. Импульс на эту пластину подается последовательно с одной из пластин инфлектора.

д) ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная камера накопителя ВЭПП-2М изготовлена из нержавеющей стали. Большинство соединений сварные, часть соединений выполнена на металлических уплотнениях с медными прокладками. Почти все секции вакуумной камеры перед установкой прогревались на стенде до температуры 400° , за исключением промежутков, где расположены впускные магниты, которые прогревались до 200° . Возможен прогрев на месте секций внутри поворотных магнитов - встроенными нагревателями, остальных участков - внешними нагревателями (с частичной разборкой магнитной системы).

Откачка вакуумной камеры производится 8-ю магниторазрядными насосами, присоединенными к камерам в поворотных магнитах, с производительностью 150 л/сек каждый. Короткие впускные промежутки откачиваются каждый двумя МРН типа НОРД-10 (5-6 л/сек). Кроме того, внутри вакуумной камеры в поворотных магнитах встроены распределенные МРН, работающие на основном магнитном поле накопителя, с производительностью 10л/сек.см на поле $=10$ кгс (с общей производительностью 8000 л/сек). Система откачки экспериментальных промежутков должна проектироваться в каждом случае индивидуально, в соответствии с задачами эксперимента. Временно установленные длинные промежутки не откачиваются.

Для уменьшения гашения под действием синхротронного излучения в вакуумной камере внутри магнитов установлены перпендикулярно орбите охлаждаемые водой позолоченные медные стержни (по 4 в каждой из 8-ми камер), которые принимают на себя ос-

новную долю излучения.

В участках вакуумной камеры, проходящей через линзы, проложена для поглощения излучения охлаждаемая водой позолоченная медная трубка.

Проектный вакуум 10^{-8} торр. После сборки вакуумной камеры, без прогрева на месте, получен вакуум $\sim 10^{-8}$ торр. (без включения распределенных насосов).

е) СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПУЧКОМ

Системы контроля за поведением пучка в накопителе основаны в основном на наблюдении синхротронного излучения. В каждой вакуумной камере поворотного магнита сделано два окна диаметром 20 мм для вывода синхротронного излучения, по одному для каждого направления движения частиц (всего 16 окон). На каждом окне устанавливается устройство для измерения радиального и вертикального отклонения орбиты пучка от идеальной с разрешением около $\pm 0,5$ мм. Полупрозрачные зеркала выводят синхротронное излучение также в устройства для наблюдения за другими параметрами пучков: 1) ФЭУ - для измерения тока пучков; 2) диссектора - для наблюдения за поперечными размерами; 3) телекамеры; 4) ФЭУ со щелью - для наблюдения за поперечными когерентными колебаниями; 5) ЭОП - или диссектор с электрической разверткой - для наблюдения за продольными размерами и колебаниями пучка.

В настоящее время оптическая система еще не готова. При первых экспериментах по инжекции наблюдение за пучком будет производиться с помощью ФЭУ и телевизоров, установленных на временных подставках, без полупрозрачных зеркал.

В одном из временных длинных промежутков установлен ипикап-электрод для измерения тока пучка и пластина, на которую может подаваться ВЧ-напряжение - для расщипки пучка по ζ и Z .

ж) ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА, ВРЕМЯ ЖИЗНИ

Времена затухания амплитуды колебаний пучка:

вертикальных τ_z (сек) = $1,64 \cdot 10^{-3} E^{-3} (\text{ГэВ})$;

радиальных: τ_2 (сек.) = $2,74 \cdot 10^{-3} E^{-3} (\text{ГэВ})$;

синхротронных: τ_3 (сек.) = $0,68 \cdot 10^{-3} E^{-3} (\text{ГэВ})$.

При достаточно хорошем вакууме радиальный и продольный размеры пучка определяются квантовыми флуктуациями излучения; вертикальный размер определяется связью с радиальными колебаниями, которая заранее неизвестна (и которой, вообще говоря, можно управлять).

Радиальный размер-бетатронный $\sigma_{r\beta}^{(\text{см})} = 0,107 / f \cdot E (\text{ГэВ})$;

радиально-фазовый: $\sigma_{r\phi}^{(\text{см})} = 0,202 \psi \cdot E (\text{ГэВ})$.

Продольный размер: σ_z (см) = $61,5 \sqrt{\frac{E^3 (\text{ГэВ})}{V_0 (\text{кВ})}}$

Разброс энергий частиц: $\sigma_E/E = 7,05 \cdot 10^{-4} E (\text{ГэВ})$.

Время жизни одиночного пучка в основном должно определяться эффектами взаимодействия с атомами остаточного газа (в скобках приведены цифры для $E=0,5 \text{ ГэВ}$, $V_0 = 150 \text{ кВ}$, $Z=7,5$, $p = 10^{-9} \text{ торр}$):

тормозное излучение: T_f (сек.) = $\frac{3,3 \cdot 10^{-2}}{Z^2 \ln \left(\frac{E}{E_{\text{мин}}} \right) \cdot P(\text{тп})}$ ($\approx 1,3 \cdot 10^5$ сек.);

однократное рассеяние: $T_{\text{одн.}}$ (сек.) $\approx 0,2 \frac{E^2 (\text{ГэВ})}{Z^2 \rho (\text{тп})}$ ($\approx 0,9 \cdot 10^6$ сек.);

выбивание δ -электронов: T_δ (сек.) $\approx 1,8 \frac{(\Delta E/E)_{\text{мин}} \cdot E (\text{ГэВ})}{Z \cdot \rho (\text{тп})}$ ($\approx 1,2 \cdot 10^8$ сек.).

Может оказаться существенным также Ташек-эффект, особенно на малой энергии. Время жизни пучка при условиях, указанных в следующем параграфе ("естественные" размеры пучка по радиусу и длине, $E = 0,5 \text{ ГэВ}$, $V_0 = 150 \text{ км/с}$, $I = 43 \text{ ма}$, $\mathcal{X} = 0,35$):

$$\tau \text{ (сек)} = 4 \cdot 10^3 \cdot \frac{\mathcal{X} V_0^{0,5} (\text{км/с}) \cdot E^{0,5} (\text{ГэВ})}{I (\text{а})} = 4400 \text{ сек.}$$

где $\mathcal{X} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{\sigma_2 |f_2|}{\sigma_1 |f_1|}$ - соотношение фазовых объемов пучка.

При большой светимости установкой преобладающим является однократное тормозное излучение при взаимодействии встречных частиц, эффективное сечение которого $\sigma_y = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ (на энергии 500 МэВ). Скорость потерь частиц пучка равна (при двух местах встречи).

$$\frac{dI}{dt} \left(\frac{\text{ма}}{\text{сек}} \right) = - \frac{\sigma (\text{см}^2) L_1 \left(\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}} \right)}{1,86 \cdot 10^8} = -1,45 \cdot 10^{-33} L_1 \left(\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}} \right),$$

где L_1 - светимость на одно место встречи.

3) СВИТИМОСТЬ. УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРАМИ ПУЧКОВ

Светимость установки со встречными пучками, рассчитанная на одно место встречи, равна:

$$L_1 = \frac{N_1 N_2 f_0}{S_{\text{встр}}}$$

где N_1 и N_2 - числа частиц в пучке, f_0 - частота обращения, $S_{\text{встр}} = 4\pi \sigma_1 \sigma_2$, где σ_1 и σ_2 - размеры пучка в месте встречи, которые предполагаются одинаковыми для обоих пучков.

На величину светимости обычно накладывают ограничение эффекты электромагнитного взаимодействия пучков, общепринятой характеристикой которых является максимальный линейный сдвиг частоты бетатронных колебаний

$$\delta V_{z,z} = \frac{4Nz_e (\beta_{z,z})_{\text{встр}}}{\delta S_{\text{встр}}}$$

Обычно считается, что пороговая величина δV , которая ограничивает светимость, равна $\delta V_0 \approx 0,03$. Но если работать вблизи целого резонанса ($V_{r,2} \approx 3,05$ для ВЭПП-2М), вероятно можно считать, что $\delta V_0 = 0,1$.

При условии: число мест встречи $n = 2$; $\delta V_r = \delta V_x = \delta V$
 $= \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_r} = \beta_2/\beta_r, \beta_{2\text{эф}} = \frac{\beta_2}{1 + \beta_2/\beta_r} \right), N_1 = N_2$
 предельная светимость равна:

$$L_{i \text{ max}} (\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}) = \frac{J \cdot \gamma \cdot \delta V_0}{4z_0 e \beta_{2\text{эф}}} = 1,1 \cdot 10^{29} \gamma \cdot J_a$$

При этом должно выполняться еще соотношение между током и поперечным сечением пучка в месте встречи:

$$S_{\text{эф}} (\text{см}^2) = \frac{4z_0 \beta_{2\text{эф}} \cdot J}{ef_0 \cdot \delta V_0 \cdot \gamma} = \frac{21}{\gamma} J(a)$$

где J - ток пучка (сосредоточенный в одном сгустке), γ - релятивистский фактор.

Численные оценки зависят от того, какой из параметров ограничивает светимость. Оценки будут даны для энергии $E = 510 \text{ МэВ}$ ($\gamma = 10^3$).

1) Радиальный размер пучка "естественный", т.е. определяется квантовыми флуктуациями излучения, вертикальный размер в месте встречи: $\sigma_z = \sigma_r \cdot \beta_2/\beta_r = \frac{1}{8} \sigma_r$. При этом $S_{\text{эф}} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$; $J_{\text{max}} = 43 \text{ ма}$; $L_{i \text{ max}} = 4,7 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.

2) Размеры пучков могут быть увеличены до пределов, ограниченных апертурой: $\sigma_{r \text{ max}} = 0,2 A_r$. В этом случае $S_{\text{эф}} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, $J_{\text{max}} = 0,8 \text{ а}$, $L_{i \text{ max}} = 8,10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ см}^{-1}$.

3) Может оказаться, что ограничена величина тока, который может быть накоплен (например, неустойчивостями).

Если $I_{max} < 43$ ма, то $L_{max} = 4,7 \cdot 10^{30} \cdot \left(\frac{I_{max}}{43}\right)^2$;

Если $I_{max} > 43$ ма, то $L_{max} = 4,7 \cdot 10^{30} \cdot \left(\frac{I_{max}}{43}\right)$.

Управление вертикальным размером пучка (при почти неизменном радиальном) может выполняться с помощью приближения рабочей точки по частоте бетатронных колебаний к резонансу связи $V_z = \nu_z$. Увеличение обоих размеров может быть сделано с помощью раскачки пучка на резонансной частоте с частотой модуляции, или шумовым сигналом. Для независимого управления размерами двух пучков, видимо, необходимо разведение частот бетатронных колебаний с помощью электростатических квадрупольных, расположенных в коротких прямолинейных промежутках. Напряжение возбуждения должно подаваться на пластины, нагруженные на волновое сопротивление, расположенные в большом резонаторе.

П. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-2

На ВЭПП-2 будут проводиться эксперименты по рассеянию электронов на внутренней мишени. Заканчивается подготовка эксперимента по электровозбуждению ядер.

Кроме рассеянного электрона, как обычно в таких экспериментах, будут регистрироваться ядра отдачи, что позволит снизить *90%* от радиационного хвоста упругого пика.

С этой же аппаратурой и при достаточной энергии пучка можно проводить эксперименты по электророждению Π -мезонов, квазиупругому рассеянию и т.д.

Ведется подготовка эксперимента по измерению формфактора протона при малых передачах импульса с регистрацией угла рассеяния электрона (искровая камера) и энергии протона отдачи (полупроводниковый счетчик). В качестве мишеней будут использоваться хорошо сформулированная струя газа давлением $\sim 10^{-3} - 10^{-5}$ тор, осуществляющая режим "сверхтонкой мишени", а также другие "сверхтонкие мишени".

Особый интерес представляют планирующиеся эксперименты с поляризованными газовыми мишенями (водород, дейтерий).

Ш. ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ПЛАНИРУЕМЫЕ НА ВЭПП-2М

1. Лаборатория № 2.

Для работ на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М в лаборатории № 2 проектируется создание двух экспериментальных установок.

Одна из них предназначена для изучения редких мод распадов долгоживущих и короткоживущих нейтральных каонов, возникающих при распаде ϕ -мезона. Установка состоит из системы цилиндрических координатных искровых камер, регистрирующих заряженные частицы распавшихся короткоживущих нейтральных каонов, и системы плоских координатных и ливневых камер, охватывающих большой распадный объем и позволяющих регистрировать заряженные частицы и гамма-кванты. Запуск искровых камер осуществляется от пропорциональных проволочных камер, дискриминирующих фон и космику. При светимости ВЭПП-2М $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ на установке возможно измерение целого ряда параметров распадов короткоживущих и долгоживущих каонов по каналам, соответствующим несохранению комбинированной четности (CP-четности) с точностью, превышающей среднемировую.

Другая установка, использующая магнитное поле для измерения импульсов частиц, будет давать возможность изучать очень широкий круг реакций. Установка состоит из расположенной внутри сверхпроводящего магнита системы цилиндрических оптических координатных и ливневых камер, запускаемых от пропорциональных проволочных камер. Установка позволяет изучать редкие многочастичные процессы и, в частности, редкие распады нейтральных короткоживущих каонов.

В настоящее время ведутся работы по разработке конструкций, макетированию и изготовлению некоторых узлов этих установок. Согласно принятым лабораторией социалистическим обязательствам в этом году должна быть запущена гелиевая ожижительная установка и на ускорителе ВЭПП-2М проведены фоновые измерения с помощью пропорциональных проволочных камер и ядерных фотоэмульсий. Метод ядерных фотоэмульсий предполагается использовать в отдельном эксперименте по точному измерению массы ϕ -мезона.

Этот эксперимент может быть выполнен на ВЭПП-2М, как только светимость установки и фоновые условия в области энергии Φ -мезона достигнут уровня ВЭПП-2, (т.е. светимость $3 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ и вакуум $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ торр).

2. Лаборатория № 3.

В лаб. № 3 ведется подготовка к эксперименту на ВЭПП-2М. Под эксперимент отведен 3-ий прямолинейный промежуток. Проектируемая система регистрации состоит из проволочных координатных и ливневых искровых камер и сцинтилляционных счетчиков. Для подавления фона космических частиц предусмотрена система времени пролета. Всего в системе будет 56 двухкоординатных проволочных камер (около 10 тыс. проволочек) и 36 сцинтилляционных счетчиков. Телесный угол системы около $0.5 \cdot 4\pi$ стерадиан.

Первая серия экспериментов будет проводиться в области энергии Φ -резонанса и выше. Система регистрации позволит регистрировать все основные каналы электрон-позитронной аннигиляции. Скорость счета эффекта при $2E = m_{\Phi}$ и $L = 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, составит

$$n(e^+e^- \rightarrow \text{все}) \sim 20 \text{ тис}$$

Такая светимость позволит провести измерение основных каналов с точностью не хуже 3-5%.

В пультовой регистрации, кроме обычной аппаратуры, будет установлена Мини-ЭВМ "Параметр". Мини-машина будет осуществлять прием всей информации, предварительную обработку и передачу информации в большую машину "Минск-32", оперативный контроль параметров системы регистрации, выдачу отчетов за ход и т.д.

В настоящее время конструкторские работы выполнены примерно на 50%. В цеху изготавливается один блок проволочных камер. Ведется изготовление блоков быстрой электроники и разработка канала связи машин "Параметр" и "Минск-32".

3. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗУЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Первые опыты по поляризации пучка электронов энергии 620-850 Мэв были проведены на накопителе ВЭПП-2 в 1970г. Получены результаты, указывающие на наличие достаточно высокой степени поляризации. Метод измерения основан на зависимости сечения упругого рассеяния частиц внутри сгустка (Тушек - эффект) от поляризации. Условия эксперимента на ВЭПП-2 таковы, что вклад поляризации в Тушек-эффект составляет $\sim 4\%$. Малая величина измеряемого эффекта приводит к необходимости поддерживать высокую стабильность энергии ($\Delta E/E \sim 10^{-4}$), напряжения В.Ч. ($\Delta u/u \sim 10^{-3}$), измерять ток в пучке с точностью $\sim 10^{-3}$ и т.д. Всё это вместе взятое создаёт трудности при проведении эксперимента, которые в прошлом не были полностью преодолены. В настоящее время введена новая система стабилизации магнитного поля ВЭПП-2, стабилизировано питание корректирующих витков, изготовлен более мощный деполаризатор, автоматизирован процесс измерения.

Эксперимент можно будет продолжить осенью 1972г.

На накопителе ВЭПП-2М время поляризации при энергии $E=510$ Мэв будет составлять $\tau_p \approx 1.8$ часа.

(При $E=660$ Мэв $\tau_p \approx 30$ мин). Конструкция магнита ВЭПП-2М позволяет выводить частицы, получившие в результате столкновения в сгустке большое отклонение энергии от равновесной. Для таких частиц вклад поляризации в рассеяние может достигать значительной величины. Так при энергии $E=510$ Мэв и токе электронов $I_e = 60$ ма возможна скорость счета ~ 1 гц и величина эффекта $\approx 40\%$. Для этого необходимо несколько переделать вакуумную камеру в одном из магнитов и изготовить анализирующий магнит (зазор 1 мм) для уменьшения фона.

4. СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Накопитель ВЭПП-2М может быть использован как интенсивный источник поляризованного излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Вывод света может быть осуществлен в любое из 16 окон диаметром 20 мм; наблюдаемая точка траектории находится внутри поворотного магнита, в 600 мм от окна. Кроме того, можно иметь еще 16 окон такого же размера, через которые наблюдается траектория в прямолинейных промежутках (и на краях поворотных магнитов).

В таблице приведено число фотонов на 1а тока пучка в 1 сек, выходящих в окно диаметром 20 мм, в спектральной полосе шириной $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-3}$. Для увеличения интенсивности излучения и сдвига спектра в область более коротких длин волн в длинном прямолинейном промежутке может быть установлена "магнитная гребенка; состоящая из ряда магнитов (сверхпроводящих) с чередующимся по направлению магнитными полями большой напряженности. Интенсивность излучения для 10-ти магнитов с полем 50кгс приведена в четвертой строке таблицы (остальные параметры те же).

| $E(\text{гэВ})$ | $n \left(\frac{\text{фотон}}{\text{сек} \cdot \text{а}} \right)$ | | | | | |
|-------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 1,5 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 0,60 | - | $7,7 \cdot 10^8$ | $1,5 \cdot 10^{12}$ | $1,6 \cdot 10^{13}$ | $4,9 \cdot 10^{13}$ | $9,9 \cdot 10^{13}$ |
| 0,65 | $3,3 \cdot 10^8$ | $1,5 \cdot 10^{10}$ | $6,3 \cdot 10^{12}$ | $4,5 \cdot 10^{13}$ | $1,1 \cdot 10^{14}$ | $1,9 \cdot 10^{14}$ |
| 0,70 | $7,7 \cdot 10^9$ | $1,7 \cdot 10^{11}$ | $2,2 \cdot 10^{13}$ | $1,0 \cdot 10^{14}$ | $2,0 \cdot 10^{14}$ | $3,0 \cdot 10^{14}$ |
| 0,85 (В=50кгс) | $8,4 \cdot 10^{13}$ | $3,1 \cdot 10^{14}$ | $2,2 \cdot 10^{15}$ | $3,8 \cdot 10^{15}$ | $4,9 \cdot 10^{15}$ | $5,6 \cdot 10^{15}$ |

Первые результаты

15 июля 1972 г. пучок электронов из ВЭПП-2 был проведен по каналу и захвачен в кольцо ВЭПП-2М. Энергия инжекции $E=120$ Мэв; ток электронов - несколько мА.

Вариант фокусировки $\beta_z = 15$ см и $\beta_x = 40$ см в месте встречи. Время жизни при вакууме $P=2 \cdot 10^{-8}$ составляло 100 сек и ограничивалось вертикальным размером пучка в районе впускного магнита. После перехода к $\beta_z = 5$ см и $E=165$ Мэв время жизни возросло до 600 сек.

Коэффициент перехвата электронов из ВЭПП-2 в ВЭПП-2М без синхронизации фаз ускоряющего напряжения удовлетворительный (0,3 - 1).

Частоты бетатронных колебаний пучка плавно регулировались и измерялись в диапазоне $\nu_{x,z} = 3,025 - 3,150$ при обоих вариантах фокусировки.