

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И.Будкера СО РАН

Г.Н.Абрамов, В.М.Аульченко, М.Н.Ачасов,  
К.И.Белобородов, А.В.Бердюгин, А.Г.Богданчиков,  
А.В.Боженок, А.А.Ботов, Д.А.Букин, М.А.Букин,  
А.Р.Бузыкаев, А.В.Васильев, В.М.Весенев,  
В.Б.Голубев, Т.В.Димова, В.П.Дружинин,  
А.А.Жуков, А.С.Ким, А.А.Король, С.В.Кошуба,  
Е.А.Кравченко, А.Ю.Кульпин, А.Е.Образовский,  
А.П.Онучин, Е.В.Пахтусова, В.М.Попов,  
Е.Э.Пята, С.И.Середняков, В.А.Сидоров,  
З.К.Силагадзе, А.А.Сироткин, А.И.Текутьев,  
Ю.В.Усов, П.В.Филатов, В.В.Шарый,  
Ю.М.Шатунов, Д.А.Штоль, А.В.Язьков

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА СНД  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ВЭПП-2000

ИЯФ 2003-45

НОВОСИБИРСК  
2003

## Модернизация детектора СНД для экспериментов на ВЭПП-2000

*Г.Н.Абрамов, В.М.Аульченко, М.Н.Ачасов, К.И.Белобородов,  
А.В.Бердюгин, А.Г.Богданчиков, А.В.Боженок, А.А.Ботов, Д.А.Букин,  
М.А.Букин, А.Р.Бузыкаев, А.В.Васильев, В.М.Весенев, В.Б.Голубев,  
Т.В.Димова, В.П.Дружинин, А.А.Жуков, А.С.Ким, А.А.Король,  
С.В.Кошуба, Е.А.Кравченко, А.Ю.Кульпин, А.Е.Образовский,  
А.П.Онучин, Е.В.Пахтусова, В.М.Попов, Е.Э.Пята, С.И.Середняков,  
В.А.Сидоров, З.К.Силагадзе, А.А.Сироткин, А.И.Текутьев, Ю.В.Усов,  
П.В.Филатов, В.В.Шарый, Ю.М.Шатунов, Д.А.Штоль, А.В.Язьков*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

### Аннотация

Описан проект модернизации детектора СНД для экспериментов на новом  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2000 в области энергии  $\sqrt{s}$  до 2 GeV. Модернизации подлежат calorimeter, трековая система, электроника детектора, система сбора и обработки данных. Ведется создание системы идентификации частиц на основе аэрогелевых счетчиков.

### Upgrade of the Spherical Neutral Detector for VEPP-2000

*G.N.Abramov, V.M.Aulchenko, M.N.Achasov, K.I.Beloborodov,  
A.V.Berdyugin, A.G.Bogdanchikov, A.V.Bozhenok, A.A.Botov, D.A.Bukin,  
M.A.Bukin, A.R.Buzykaev, A.V.Vasiljev, V.M.Vesenev, V.B.Golubev,  
T.V.Dimova, V.P.Druzhinin, A.A.Zhukov, A.S.Kim, A.A.Korol,  
S.V.Koshuba, E.A.Kravchenko, A.Yu.Kulpin, A.E.Obrazovsky,  
A.P.Onuchin, E.V.Pakhtusova, V.M.Popov, E.E.Pyata, S.I.Serednyakov,  
V.A.Sidorov, Z.K.Silagadze, A.A.Sirotkin, A.I.Tekutiev, Yu.V.Usov,  
P.V.Filatov, V.V.Shary, Yu.M.Shatunov, D.A.Shtol, A.V.Yazkov*  
Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia

### Abstract

The program of upgrade of the Spherical Neutral Detector for future experiments at a new VEPP-2000  $e^+e^-$  collider is presented. Modernization includes upgrades of electromagnetic calorimeter, tracking system, detector electronics, data acquisition system, and offline software. SND is also equipped the detector with particle identification system based on aerogel Čerenkov counters.

---

# 1 Введение

В 1999 году в ИЯФ было принято решение о модернизации  $e^+e^-$  коллайдера ВЭПП-2М [1] в ВЭПП-2000 [2], которая заключается в расширении области энергии в системе центра масс  $e^+e^-$  пучков до 2 ГэВ и повышении светимости до  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Физическая программа экспериментов на ВЭПП-2000 включает в себя:

1. измерение сечений  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны:  
 $e^+e^- \rightarrow 2\pi, \rho\pi, \omega\pi, KK, 4\pi, KK\pi$  и др.;
2. изучение параметров векторных резонансов – радиальных и орбитальных возбуждений  $\rho, \omega, \phi$ -мезонов в области масс  $\sim 1 \div 2$  ГэВ и динамики их распадов;
3. измерение нуклонных формфакторов на пороге в процессах  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$ ;
4. изучение двухфотонных процессов:  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \pi^0, \eta, \eta', 2\pi^0$  и др.

В период с 1995 по 2000 гг. на коллайдере ВЭПП-2М была выполнена серия экспериментов со Сферическим нейтральным детектором (СНД) [3]. Модернизация накопителя потребовала модернизации большинства систем СНД (рис.1, 2), кроме калориметра и мюонной системы:

- замены трековой системы;
- создания системы идентификации частиц;
- модернизации первичного триггера и оцифровывающей электроники детектора;
- создания новых систем сбора и обработки данных;

В препринте описано устройство систем СНД и состояние дел по их подготовке к будущим экспериментам на ВЭПП-2000. Обсуждаются экспериментальные возможности для изучения процессов рождения пар нуклон-антинуклон на ВЭПП-2000.

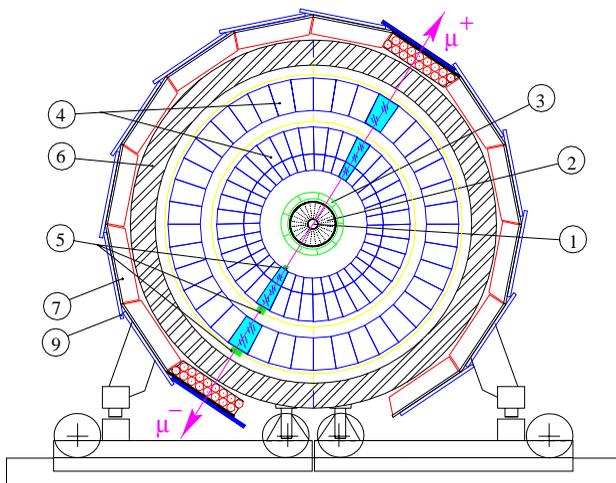


Рис. 1. Детектор СНД – сечение поперек оси пучков; 1 – вакуумная камера, 2 – трековая система, 3 – аэрогелевые черенковские счетчики, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – вакуумные фототриоды, 6 – поглотитель, 7 – стримерные трубки, 9 – сцинтилляционные счетчики.

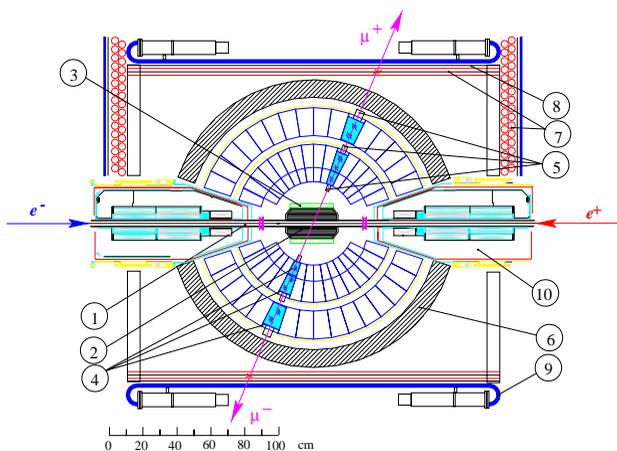


Рис. 2. Детектор СНД – сечение вдоль оси пучков; 1 – вакуумная камера, 2 – трековая система, 3 – аэрогелевые черенковские счетчики, 4 – кристаллы NaI(Tl), 5 – вакуумные фототриоды, 6 – поглотитель, 7 – стримерные трубки, 8 – железный фильтр, 9 – сцинтилляционные счетчики, 10 – фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000.

## 2 Калориметр

Электромагнитный калориметр [3] является основной частью СНД и состоит из трех слоев сцинтилляционных счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl) (рис. 1, 2). Толщина калориметра для частиц, летящих из центра детектора, составляет 13.4 радиационных длин. Полное число счетчиков в калориметре – 1632, число кристаллов в слое – от 520 до 560. В качестве фотоприемников используются компактные вакуумные фототриоды [4] с диаметром фотокатода 17 мм на кристаллах первого и второго слоев калориметра и 42 мм на третьем слое. Средний квантовый выход фототриодов в спектре излучения NaI(Tl) составляет  $\sim 15\%$ , коэффициент усиления  $\sim 10$ . Энергетическое и пространственное разрешение калориметра для фотонов с энергией 50 – 700 МэВ описывается зависимостями:  $\sigma_E/E(\%) = 4,2\%/\sqrt[4]{E(\text{ГэВ})}$  и  $\sigma_\varphi = 0,82^\circ/\sqrt{E(\text{ГэВ})} \oplus 0,63^\circ$ .

Калориметр проработал на ВЭПП-2М с декабря 1994 года по июнь 2000 года и показал достаточную надежность и стабильность. Наиболее существенной проблемой была, обнаруженная в ходе эксперимента, медленная деградация фототриодов наружного слоя калориметра. Явление имело место только при включенном высоком напряжении на фототриодах, причем, независимо от режима работы ВЭПП-2М. Падение чувствительности фототриодов составила в среднем около 3% в месяц. Наиболее вероятной причиной этого являлась бомбардировка фотокатода ионами остаточного газа. Фототриоды диаметром 17 мм, установленные в первом и втором слоях калориметра, оказались более стабильными при длительной работе. Падения их средней чувствительности за весь период проведения экспериментов не наблюдалось.

Для подготовки калориметра к работе на ВЭПП-2000 необходимо заменить все фототриоды третьего слоя и некоторое количество вышедших из строя фототриодов в первом и втором слоях. Всего подлежат замене около 600 приборов. Одна треть от необходимого количества фототриодов диаметром 42 мм уже приобретена на заводе “ЭКРАН” (г. Новосибирск). Производство таких приборов разворачивается в ИЯФ: изготовлены опытные образцы с удовлетворительными параметрами. Для массового производства создано программное обеспечение управления активировкой фотокатодов, которое позволит одновременно изготавливать до 6 приборов. В настоящее время ведется наладка оборудования и отработка технологии изготовления фототриодов.

В качестве фотоприемников для третьего слоя можно использовать сборки из четырех параллельно соединенных фототриодов диаметром 17 мм. Около 600 таких приборов сняты с торцевого калориметра детек-

тора КМД-2 [7] и переданы для использования на СНД. Из них можно изготовить около 150 сборных фотоприемников. Несколько таких сборок уже сделано, ведется изучение их свойств и параметров.

Рассматривается возможность полной замены фотоприемников второго слоя калориметра на приборы с диаметром 30 мм (около 600 штук), которые могут быть произведены в ИЯФ. Уже изготовлены опытные образцы с удовлетворительными параметрами. Такая замена позволит приблизительно в два раза увеличить коэффициент светосбора и, таким образом, заметно улучшить соотношение сигнал/шум в калориметре.

### 3 Трековая система

В рамках модернизации детектора СНД изготавливается новая трековая система [8, 9]. Основной причиной замены старой координатной системы является ее несовместимость с конструкцией места встречи коллайдера ВЭПП-2000. Новая система состоит из дрейфовой камеры с ячейкой струйного типа и пропорциональной камеры, расположенных в едином газовом объеме (рис.3,4). Основные параметры системы приведены в табл.1.

Таблица 1. Параметры трековой системы СНД.

длина чувствительной области	230 ÷ 280 мм
внутренний диаметр	40 мм
внешний диаметр	200 мм
телесный угол (по четырем слоям)	94 % от $4\pi$
количество вещества	3,8 % $X_0$
дрейфовых количество ячеек	24
количество сигнальных проволочек	216
количество катодных полосок	280
координатное разрешение	
по времени дрейфа $\sigma_{R-\phi}$	150 мкм
координатное разрешение $\sigma_Z$ (по проволочкам)	1,5 мм
координатное разрешение $\sigma_Z$ (по полоскам)	0,3 ÷ 0,6 мм
угловое разрешение для трека $\sigma_\phi$	0,18°
угловое разрешение для трека $\sigma_\theta$	0,3°
разрешение по вершине трека $\sigma_R$	0,2 мм
разрешение по $dE/dx$ , $\sigma_{dE/dx}$	25 %
$\pi/K$ разделение (по $dE/dx$ в ДК)	до $p \leq 300$ МэВ/с

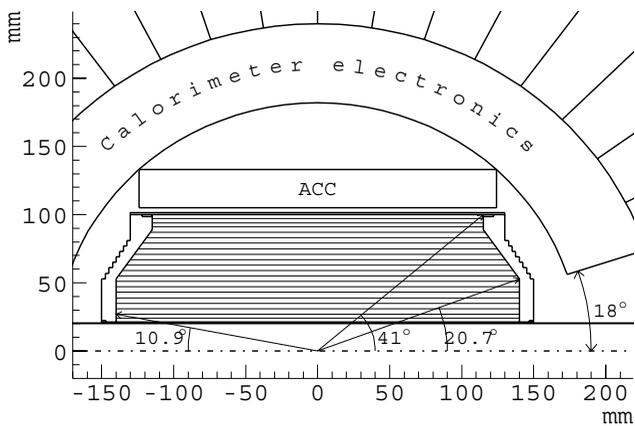


Рис. 3. Центральная часть СНД – сечение вдоль оси пучков.

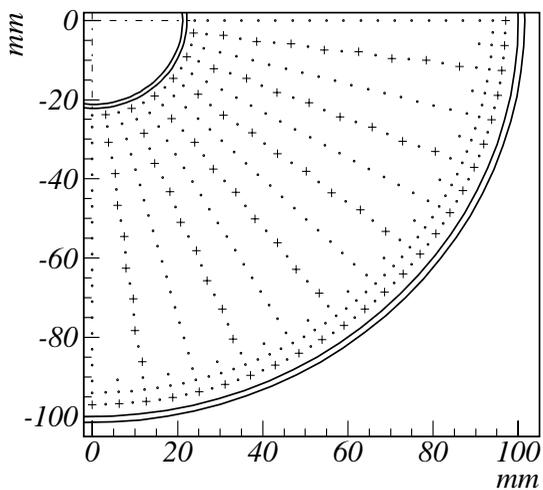


Рис. 4. Трековая система – сечение поперек оси пучков. Крестики – анодные, точки – полевые и экранирующие проволочки. Размеры указаны в миллиметрах.

Газовый объем трековой системы ограничен фланцами и цилиндрическими обечайками. Фланцы трековой системы изготовлены из стеклотекстолита и для оптимального использования пространства внутри детектора имеют форму усеченного конуса. Толщина фланца около 10 мм ( $\approx 0,05 X_0$ ). В каждом фланце сделано 1296 прецизионных отверстий диаметром 1,6 мм. В отверстиях установлены медные пины, служащие для крепления проволочек. Обечайки изготовлены из фольгированного стеклотекстолита и стеклотенты, склеенных эпоксидной смолой. Внешняя обечайка имеет толщину около 3 мм ( $\approx 0,02 X_0$ ) и является несущей, обеспечивая натяжение всех проволок трековой системы с общим усилием  $\sim 150$  кгс. Толщина внутренней обечайки около 1 мм ( $\approx 0,01 X_0$ ). На обращенной внутрь газового объема поверхности фольгированного стеклотекстолита нанесены полосы, служащие катодом камеры, сигналы с которого используются для измерений  $z$ -координат треков. Для вывода сигналов с катодных полосок на второй поверхности стеклотекстолита имеются специальные дорожки.

Дрейфовая камера используется для измерения точки вылета, азимутального  $\varphi$  и полярного  $\theta$  углов и ионизационных потерь заряженных частиц. Камера состоит из двадцати четырех дрейфовых ячеек струйного типа. Каждая ячейка содержит 9 анодных (сигнальных) проволок, которые во всех слоях, кроме первого (ближайшего к оси пучков), смещены в азимутальном направлении на  $\pm 300$  мкм относительно оси ячейки для разрешения лево-правой неоднозначности при восстановлении трека. Радиальный размер первого слоя дрейфовой ячейки составляет 6 мм, остальных слоев — 8 мм. Радиальная координата сигнальных проволок первого слоя — 24 мм, девятого слоя — 87 мм. Максимальная длина дрейфа ионизации в азимутальном направлении меняется от 3 мм в первом слое до 11 мм в девятом. Анодные проволочки изготовлены из позолоченного вольфрама диаметром 15 мкм (в первом слое — 20 мкм) и натянуты с усилием 0,04 кгс. Полевые и экранирующие проволочки изготовлены из позолоченного титана диаметром 100 мкм, усилие их натяжения — 0,15 кгс.

Вблизи внешней обечайки трековой системы расположена пропорциональная камера, используемая для измерения  $z$ -координаты треков заряженных частиц. Катодные проволочки натянуты вдоль оси цилиндра на радиусе 94 мм с шагом 3 мм. На радиусе 97 мм с таким же шагом поочередно натянуты анодные и полевые проволочки. Вторым, сигнальным катодом пропорциональной камеры служат медные полосы на внутренней поверхности обечайки. Размер каждой из полосок в направлении вдоль оси пучков — 6 мм, угловой размер полоски в азимутальном

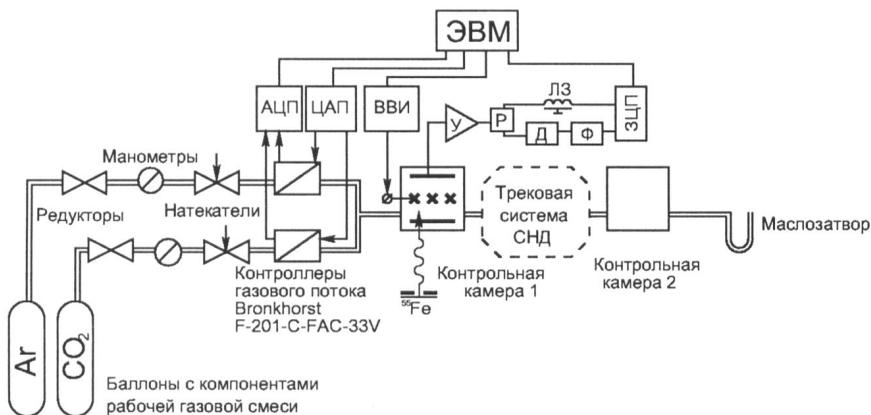


Рис. 5. Схема газовой системы. У – усилитель сигнала с пропорциональной камеры, Р и ЛЗ – разветвитель сигнала и линия задержки. Д и Ф – дискриминатор и формирователь сигнала.

направлении —  $90^\circ$ .

Между пропорциональной камерой и внешним слоем дрейфовой камеры на радиусе 91 мм натянут экранирующий слой проволоки. С учетом этого слоя полное количество полевых и экранирующих проволок в пропорциональной камере составляет 480 штук, анодных — 96.

Центральная область внутренней обечайки тоже сегментирована на полоски размером 6 мм (вдоль оси пучков) и угловым размером  $90^\circ$ . Полное количество полосок на внутренней обечайке — 128. Суммарное количество сигнальных полосок в трековой системе — 280.

Для проверки выбранного варианта конструкции трековой системы и измерения ее характеристик изготовлен полноразмерный прототип. Проволочная структура прототипа составляет четверть объема камеры и полностью соответствует структуре трековой системы. В настоящее время завершается подготовка стенда для испытаний прототипа с космическими частицами.

В рамках подготовки к тестированию прототипа трековой системы разработаны процедуры и написаны программы генераторной калибровки электроники сигнальных проволочек и катодных полосок.

В трековой системе используется газовая смесь  $\text{Ar}+10\% \text{CO}_2$ , которая позволяет получить режим насыщения скорости дрейфа электронов при напряженности электрического поля  $E \sim 1 \text{ кВ/см}$ . Для приготовления рабочей газовой смеси, снабжения ею трековой системы и отслеживания параметров газа разработана газовая система (рис.5).

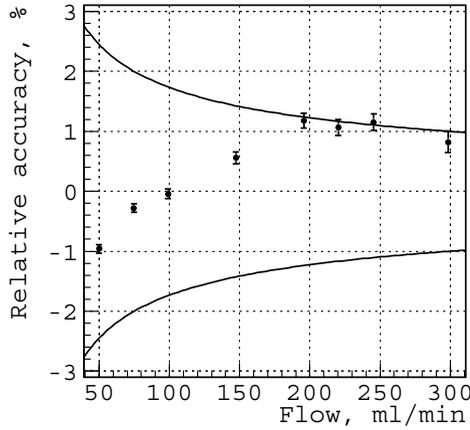


Рис. 6. Относительная точность газового потока, обеспечиваемая контроллером F-201-C-FAC-33V. Область, ограниченная кривыми, соответствует классу точности контроллера, точки с ошибками — результат измерения.

Стабильность газового потока, обеспечивается контроллером Bronkhorst модели F-201-C-FAC-33V. Возможности контроллера по обеспечению стабильности концентрации компонент газа в рабочей смеси были проверены на опыте. В процессе измерения установленный при помощи контроллера поток газа направлялся в герметичный объем с прецизионным электронным датчиком давления. Истинный поток газа определялся по скорости роста давления в герметичном объеме.

Измерения проводились при значениях потока аргона от  $50 \text{ см}^3/\text{мин}$  до  $300 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Во всех измерениях отличие истинного потока от заданного не превышает 1–2% (рис. 6), что соответствует классу точности контроллера. Использование в газовой системе таких контроллеров позволит обеспечить стабильность концентрации углекислоты в рабочей газовой смеси не хуже трех относительных процентов для полного потока газовой смеси  $1\text{--}5 \text{ см}^3/\text{с}$ .

Моделирование трековой системы реализуется на основе пакета Geant4. К настоящему времени завершено описание геометрии трековой системы, начата разработка пакета программ по моделированию отклика камеры и регистрирующей электроники.

## 4 Система аэрогелевых черенковских счетчиков

Система аэрогелевых черенковских счетчиков (АЧС) детектора СНД [10] предназначена для  $\pi/K$  разделения в области до максимальной энергии ВЭПП-2000. Необходимость системы АЧС обусловлена тем, что область надежной идентификации частиц по  $dE/dx$  в дрейфовой камере ограничена импульсами до 300 МэВ/с, тогда как максимальный импульс  $K$ -мезонов при энергии 2 ГэВ в с.ц.м составляет около 870 МэВ/с.

Основным параметром АЧС является показатель преломления аэрогеля. Его величина ограничена сверху требованием: АЧС должны обеспечить надежное  $\pi/K$  разделение в области энергии до 2 ГэВ. Нижняя граница определяется требованием перекрытия областей идентификации по АЧС и по  $dE/dx$ . Исходя из этого был выбран показатель преломления равный  $n = 1,13$ . На рис.7 показаны зависимости порогового импульса  $\pi$ - и  $K$ -мезонов от показателя преломления аэрогеля. Там же приведен график для импульса  $\pi$ -мезона, при котором интенсивность черенковского излучения составляет половину от максимальной. Вертикальной линией показан максимальный импульс  $K$ -мезона при энергии 2 ГэВ в с.ц.м. Горизонтальной линией показано выбранное значение показателя преломления аэрогеля.

Пороговые импульсы  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$  для показателя преломления аэрогеля  $n = 1,13$  представлены в таблице 2.

Таблица 2. Пороговые импульсы  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$  для аэрогеля с  $n = 1,13$

частица	$P_{thr}, \text{МэВ/с}$
$e$	0,971
$\mu$	186
$\pi$	246
$K$	938

На рис.8 показаны области  $\pi/K$  разделения для ДК по  $dE/dx$  (до  $\sim 350$  МэВ/с) и системы АЧС (от  $\sim 300$  до  $\sim 940$  МэВ/с). Хорошо видно, что система черенковских счетчиков с показателем преломления аэрогеля  $n = 1,13$  удовлетворяет описанным выше требованиям. Хотя аэрогели с показателем преломления превышающим  $n = 1,13$  также удовлетворяют этим требованиям, их изготовление сопряжено с большими трудностями.

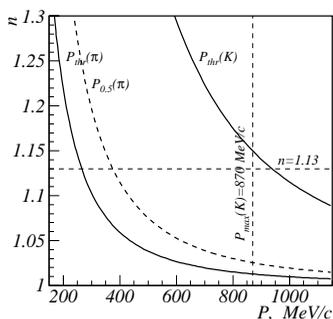


Рис. 7. Сплошные линии – пороговый импульс для  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, пунктир – импульс  $\pi$ -мезона для случая, когда интенсивность черенковского излучения равняется половине от максимальной.

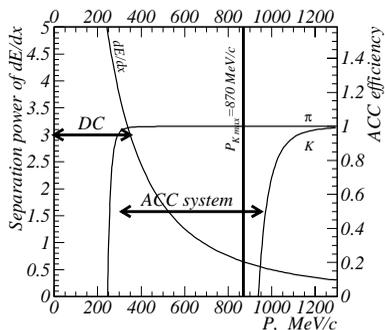


Рис. 8. Области  $\pi/K$  идентификации для ДК по  $dE/dx$  и системы АЧС.

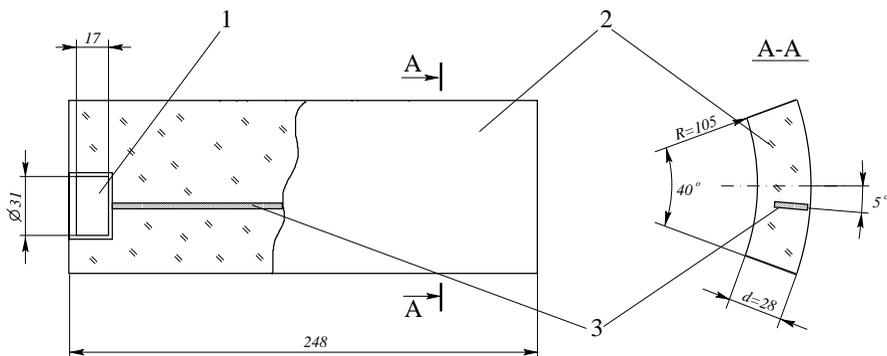


Рис. 9. Аэрогелевый счетчик детектора СНД. Вид сверху и сечение. 1 – ФЭУ МКП, 2 – аэрогель, 3 – спектросместитель.

Система АЧС располагается вокруг трековой системы (рис.3) и состоит из 9 одинаковых счетчиков толщиной 28 мм, образующих цилиндр с телесным углом около 60% от  $4\pi$ .

На рис.9 показан вид сверху одного счетчика и его поперечное сече-

Таблица 3. Толщина материала в системе АЧС

материал	$X_0$ , см	$\%X_0$
аэрогель ( $n = 1, 13$ )	44,0	5,5
ПТФЭ	16,4	1,0
алюминий	8,9	1,8
спектростемитель	34,4	0,2
Сумма		8,5

ние. Счетчик имеет форму сектора полого цилиндра с углом  $\Delta\varphi = 40^\circ$ , внутренним радиусом 105 мм, толщиной 28 мм и длиной 248 мм. Аэрогелевый радиатор счетчика обернут отражателем из трех слоев пленки ПТФЭ толщиной 0,22 мм и упакован в алюминиевый корпус с толщиной стенок 1 мм. Светосбор осуществляется с помощью спектросмещающей пластины из полиметилметакрилата с добавлением ВВQ, расположенной со сдвигом относительно центра счетчика на угол  $\sim 5^\circ$  (рис.9). Размеры пластины —  $220 \times 3 \times 17,5$  мм<sup>3</sup>. Свет из спектростемителя регистрируется фотоумножителем с микроканальными пластинами (ФЭУ МКП) [11] с диаметром фотокатода 18 мм.

Выбранная грануляция системы АЧС вполне достаточна при малой множественности заряженных частиц в событиях в области энергии  $\sqrt{s} < 2$  ГэВ. Нечетного число счетчиков и сдвиг спектростемителя относительно оси счетчика позволяет избежать одновременного попадания частиц в “мертвые” зоны счетчиков в коллинеарных событиях  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-, K^+K^-$ . Моделирование и опыт использования аналогичных счетчиков [10, 12] показывают, что при выбранной толщине счетчика  $\sim 28$  мм величина сигнала от мюонов с минимальной ионизацией составит  $\sim 10$  фотоэлектронов, что обеспечит надежное  $\pi/K$  разделение.

Появление дополнительного вещества перед калориметром может привести к ухудшению его энергетического разрешения. Для уменьшения этого нежелательного эффекта необходимо по возможности минимизировать толщину АЧС. Толщины материалов вдоль трека частицы для предлагаемой конструкции АЧС представлены в таблице 3 (угол  $90^\circ$ , без учета вклада от ФЭУ МКП).

В настоящее время ведется работа с прототипом счетчика. Создан стенд для тестирования прототипа АЧС по космическим частицам, разработана методика калибровки прототипа. Проведены измерения неоднородности светосбора прототипа счетчика.

## 5 Электроника детектора

Электроника детектора СНД базируется на стандарте КЛЮКВА, разработанном в ИЯФ [13] для экспериментов на ВЭПП-2М и ВЭПП-4 и модернизированном для экспериментов на ВЭПП-2000 [14]. Каждый крейт КЛЮКВА вмещает до 16 информационных плат (ИП), осуществляющих оцифровку сигналов с детектора и две служебные платы: интерфейс первичного триггера (ИПТ) и процессор ввода-вывода (ПВВ). Данные из ИП считываются по магистрали КЛЮКВА в ПВВ с циклом 100 нс и передаются в компьютер через локальную сеть Ethernet. С помощью ПВВ производится также запись в ИП порогов и пьедесталов, которые используются для сжатия информации за счет подавления несработавших каналов. Кроме оцифровки информации с детектора ИП осуществляют формирование быстрых логических и аналоговых сигналов, которые по магистрали КЛЮКВА передаются в ИПТ для дальнейшего использования в системе первичного триггера (ПТ). Оцифровывающая электроника СНД занимает 15 крейтов. Список основных модулей КЛЮКВА, применяемых в системе сбора данных, приведен в таблице 4.

Таблица 4. Наименование и количество модулей КЛЮКВА, применяемых в системе сбора данных СНД.

ПВВ	Т2АМ	ПА24	А24М	ТП	ИПТ ДС, проволочки	ИПТ калориметра	ИПТ ДС, полоски
16	54	12	70	12	7	10	2

Электронный тракт анодных проволочек дрейфовой камеры состоит из двух предусилителей, присоединенных к концам проволочки, и канала платы Т2АМ. В Т2АМ два входных сигнала усиливаются и поступают на 10-разрядные АЦП, работающие с тактовой частотой 40 МГц. Результаты последних 64 измерений запоминаются и считываются по сигналу ПТ. Для временных измерений используется аналоговая сумма сигналов с концов проволочек, которая подается на вход дискриминатора. Временной интервал между сигналом с дискриминатора и сигналом ПТ измеряется с помощью ВЦП на два хита, состоящего из счетчика, считающего импульсы тактовой частоты 40 МГц и интерполятора. Разрешение ВЦП равно 1 нс. Каждая плата Т2АМ содержит 4 канала. Сигналы с дискриминаторов Т2АМ передаются в ИПТ для использования в системе первичного триггера.

Таблица 5. Количество каналов электроники по подсистемам детектора СНД, ожидаемое число сработавших каналов, количество информации, считываемое из подсистем, суммарные времена оцифровки и считывания информационных плат.

подсистема	всего каналов	сработавших каналов	длина, байт	время оцифровки и считывания, мкс
проволочки	216	30	2640	5+35
полоски	280	30	1200	5+37
калориметр	1640	40	160	25+3
другие	170	10	200	20
всего			~ 4200	25 + 37 = 62

Электронный тракт катодных полосок состоит из ЗЧУ, формирователя с временем формирования около 300 нс и канала платы ПА24. В ПА24 входной сигнал поступает на 10-разрядный АЦП, работающий с тактовой частотой 40 МГц. В плате содержится 24 канала. ПА24 передает в ИПТ 3 логических сигнала, каждый из которых представляет собой ИЛИ срабатываний 8 полосок.

Электронный тракт калориметра состоит из зарядо-чувствительного предусилителя, формирователя и канала платы А24М. А24М содержит 24 канала и состоит из 24 устройств выборки и хранения с пиковыми детекторами и 12-разрядного АЦП. Время оцифровки всех 24 каналов составляет 25 мкс. Блок формирователей калориметра (Ф12) обслуживает 12 кристаллов калориметра (3 слоя по 4 кристалла), образующих так называемую башню. Для первичного триггера в Ф12 формируется сигнал полного энерговыделения башни. 160 сигналов энерговыделений башен поступают на 10 ИПТ калориметра.

Максимальная скорость считывания информации из крейтов КЛЮК-ВА определяется мертвым временем КЛЮКВЫ, равным сумме времен оцифровки сигналов и считывания информации из плат в ПВВ.

Расчетные мертвые времена для различных подсистем детектора приведены в таблице 5. Там же приводятся данные об ожидаемой длине события. При расчете длины события считалось, что считываются только сработавшие каналы. Для канала платы Т2АМ информационная запись состоит из адреса, количества слов данных и собственно данных, содержащих 30 измерений амплитуды с каждой стороны проволочки и 2 измерения времени: грубое и точное. Для определения сработавших каналов

ПВВ использует информацию о количестве данных. Информационная запись от сработавшего канала ПА24 состоит из адреса, длины, 25 измерений амплитуды и времени. Десятиразрядные слова из амплитудных каналов упаковываются по 3 слова в 4 байта. С платы А24М будет читаться число сработавших каналов, т.е. каналов, амплитуда в которых превысила пьедестал, битовая маска сработавших каналов (2 слова) и собственно амплитудные коды. При расчете длины информационной записи от калориметра предполагалось, что 40 сработавших каналов находятся в 20 платах. Расчет времени считывания проводился в предположении, что платы Т2АМ рассредоточены в 6 крейтах КЛЮКВА, платы ПА24 — в трех, платы А24М — в пяти. Электроника аэрогелевых и сцинтилляционных счетчиков, стримерных трубок, обслуживаемая платами ТП, а также платы ДА-НЕТ будут находиться еще в двух крейтах. При чтении плат Т2АМ, ПА24 и А24М на опрос пустого субадреса предполагается затрачивать 100 нс, для сработавших каналов данные будут считываться со скоростью одно слово за 100 нс. Мертвое время всей системы сбора данных определяется самой медленной подсистемой и составляет около 60 мкс.

Система первичного триггера состоит из блоков выработки аргументов, информация для которых поступает из ИПТ, и блоков масок ПТ, которые представляют из себя 48-входовые схемы совпадений, работающие с аргументами ПТ. Сигналом запуска детектора является ИЛИ 10 выходов блоков масок. Список аргументов ПТ приведен в Таблице 6.

Аргументы трековой системы формируются модулями логики слоев (ЛС), логики треков (ЛТ) и логики полосок (ЛП). Логика слоев формирует 5 выходных сигналов, являющихся логическими комбинациями 10 сигналов ИЛИ слоев трековой системы. Логика треков на основе информации о срабатываниях проволочек 5 внутренних слоев дрейфовой камеры производит поиск треков и определяет их положение. Треком считается группа последовательно сработавших проволочек, находящихся не более чем в двух соседних секторах. Для учета неэффективности камеры требуется срабатывание 4 из 5 слоев. По найденным трекам логика слоев вырабатывает аргументы, характеризующие число треков в камере: 1 и более треков, 2 и более треков и т.д., и их взаимное расположение: наличие несоседних треков, коллинеарные треки и т.д. Логика полосок работает с 16 сигналами ИЛИ полосок внутреннего катода. В зависимости от записанного в логику управляющего кода на выходе формируется сигнал, соответствующий срабатыванию полоски в области, ограниченной  $\pm z$  ( $z = 12, 24, \dots, 84, 140$  мм).

Первичный триггер калориметра работает со 160 сигналами энерго-

Таблица 6. Список аргументов Первичного триггера. БВА – блоки выработки аргументов, ЛТ – Логика треков, ЛС – Логика слоев, ЛК – Логика калориметра, БПЭ – Блок порогов на энерговыделения, ЛПП – логика полосок.

№	название	БВА	функциональное описание
1	ST	ЛС	строб калориметра
2	STF	ЛС	ST с привязкой к фазе
3	STR	ЛС	строб калориметра по полному энерговыделению
4	STRF	ЛС	STR с привязкой к фазе
5	ACT1	ЛС	совпадение трубок и наружных счетчиков
6	act1	ЛС	анти ACT1
7	CC	ЛС	ИЛИ черенковских счетчиков
8–12	DCC1–DCC5	ЛС	логические комбинации слоев трековой системы
13	dcc1	ЛС	анти DCC1
14	TSLA	ЛК	башня на большой угол
15	TDLA	ЛК	несоседние башни на большой угол
16–23	ARG1–ARG8	ЛК	программируемые аргументы калориметра
24	arg3	ЛК	анти ARG3
25	tsla	ЛК	анти TSLA
26–31	ET1–ET6	БПЭ	пороги на полное энерговыделение в калориметре
32,33	ELA1,ELA2	БПЭ	пороги на полное энерговыделение на большие углы
34–37	TR1–TR4	ЛТ	число треков в длинной камере
38–40	TRD1–TRD3	ЛТ	максимальное расстояние между треками (в секторах)
41	tr1	ЛТ	анти TR1
42,43	INS1–2	ЛПП	ИЛИ полосок внутреннего катода
45–48			запас

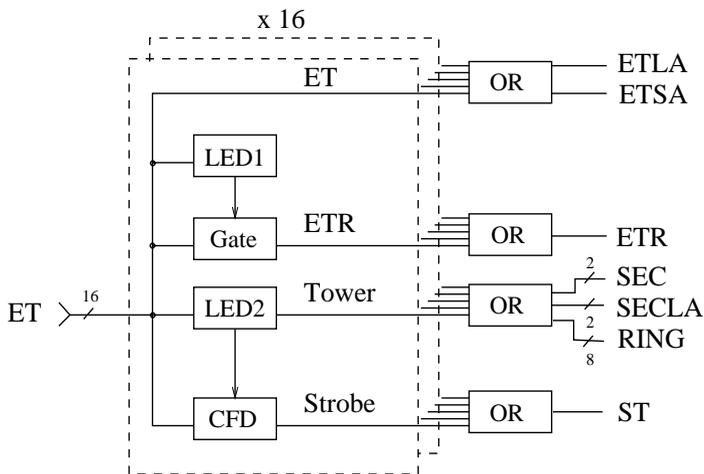


Рис. 10. Структурная схема ИПТ калориметра.

выделений в башнях. На рис.10 показана структурная схема ИПТ калориметра. На каждый из 10 ИПТ поступает 16 сигналов энерговыделений. Дискриминаторы LED2 с эффективным порогом 25 МэВ формируют 160 логических сигналов “Tower”, которые затем объединяются, частично в ИПТ, частично в последующих логических сумматорах, в 20 сигналов секторов (разбиение калориметра по азимутальному углу) и 8 сигналов колец (разбиение по полярному углу). Угловой размер и сектора и кольца составляет  $18^\circ$ . Формируется два типа сигналов секторов: полные, SEC, объединяющие по 8 башен, и SECLA, в которые входят по 6 башен, с полярными углами в диапазоне  $36^\circ - 144^\circ$ . Сигналы секторов и колец используются в логике калориметра [17] для выработки аргументов TSLA, TDLA, ARG1–ARG8 (Таблица 6). Аргументы ARG1–ARG8 являются программируемыми. В частности, предполагается реализовать аргументы: коллинеарные башни, наличие двух башен с азимутальным углом между ними более заданного предела, наличие трех несоседних башен и другие. Для временной привязки срабатывания калориметра к моменту столкновения пучков используется сигнал ST, являющийся логической суммой 160 сигналов “Strobe”, вырабатываемых дискриминаторами со следящим порогом CFD. Временное разрешение ST равно 5.5 нс. Кроме логических сигналов в ИПТ калориметра и последующих сумматорах вырабатываются три аналоговых сигнала: ET, ETLA, ETR. Сигнал полного энерговыделения ET представляет собой аналоговую сумму сигналов энерговыделений со всех 160 башен. В сигнал ETLA суммируются 120 башен с полярными углами в диапазоне  $36^\circ - 144^\circ$ . В сигнал ETR суммируются только те башни, энерговыделение в которых превысило порог дискриминатора LED1 (около 5 МэВ). Сигналы ET и ETLA поступают на Блок порогов на энерговыделения, где на них накладываются пороги и формируются аргументы ПТ. Сигнал ETR дает смещенное значение полного энерговыделения, но имеет более чем в два раза, по сравнению с ET, меньший шум. Он поступает на дискриминатор со следящим порогом, находящийся в Логике слоев (эффективный порог около 100 МэВ). Как показывает моделирование работы ПТ, полученный логический сигнал STR имеет временное разрешение лучше 5 нс и может быть использован как альтернатива сигналу ST для временной привязки. Ожидается, что фоновая загрузка в STR будет существенно меньше, чем в ST.

Две другие подсистемы детектора: черенковский счетчик и мюонная система, вырабатывают еще два аргумента ПТ: СС — ИЛИ срабатываний черенковских счетчиков, АСТ1 — ИЛИ совпадений сигналов стримерных трубок и сцинтилляционных счетчиков.

Время выработки решения первичного триггера составляет 800 нс. Блоки выработки аргументов ПТ устроены по конвейерному типу, т.е. разбиты на логически независимые модули, время работы каждого из которых не превышает 81 нс, периода столкновения пучков. Вместе с использованием для сигналов срабатываний элементов детектора формирования с продлеванием это гарантирует отсутствие в системе ПТ дополнительного мертвого времени. При планируемой максимальной скорости запусков первичного триггера 1 кГц мертвое время системы сбора данных определяется суммой временем оцифровки в ИП и считывания информации в ПВВ и составляет 6 – 7%.

## 6 Система сбора данных

Система сбора данных (ССД) должна обладать высокой производительностью и надежностью. В будущих экспериментах на ВЭПП-2000 предполагается достичь скорости считывания событий 1 кГц при потерях не более 5%. Это позволит использовать простой и эффективный аппаратный отбор событий (первичный триггер). Сохранять все считанные данные на устройствах длительного хранения не имеет смысла, так как скорость счета полезных событий составит около 30 Гц. Для подавления фона, события перед записью преобразуются в формат, приемлемый для обработки, полностью реконструируются, а затем пропускаются через программный (третичный) триггер. Ожидаемая выходная частота записи событий оценивается в 100 Гц.

Ожидаемый средний размер считанного события составит около 4 кбайт. После упаковки и извлечения информации размер события уменьшится до 1 кбайт. Таким образом, от системы сбора данных требуется обработка входного потока в 4 Мбайт/с, извлечение и упаковка результатов измерений систем СНД и сохранение потока 100 кбайт/с. Как уже упоминалось в разделе 5, события из КЛЮКВЫ будут вычитываться через локальную сеть Ethernet.

Окончательная запись событий, включая упаковку, реконструкцию и отбор, — основной потребитель процессорного времени. На основе модельного эксперимента время записи одного события на компьютере с 1 ГГц процессором Athlon оценивается в 2,5 мс. Естественным представляется решение выделить под процесс чтения электроники отдельный компьютер, отделив его от окончательной записи, а окончательную запись распараллелить по отдельным процессам и компьютерам. Такой подход позволит линейно масштабировать скорость упаковки и отбора

простым добавлением компьютеров. Это также повысит устойчивость системы к сбоям, так как разделит ее на две относительно независимые части. События предполагается передавать через буферы размером несколько Гбайт на разделяемых дисках.

При разработке ССД также требуется:

- совместимость и переносимость программ,
- распределенность процессов в сети компьютеров связанных по TCP/IP,
- модульность, что подразумевает
  - разбиение исходного кода на слабовзависимые пакеты,
  - возможность независимой работы различных компонент ССД,
- удобный и понятный пользовательский интерфейс,
- наличие документации,
- среда разработки GNU/Linux, язык C++ для основных сервисов ССД, PHP для разработки пользовательского интерфейса.

Общая архитектура ССД представлена на рис.11. На компьютере, обозначенном на схеме Readout Computer, сосредоточены все процессы, работающие с электроникой, а именно — чтение и запись в буфер событий из КЛЮКВЫ, считывание состояния систем СНД и ВЭПП-2000, контроль и управление аппаратурой (загрузка триггера, управление высоковольтными источниками и т. д.), генераторные калибровки электронных каналов систем СНД.

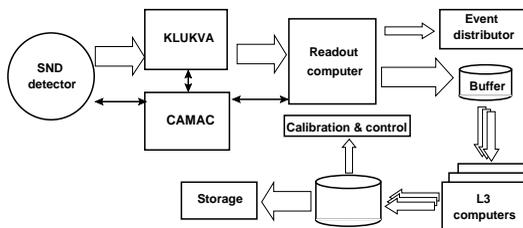


Рис. 11. Архитектура системы сбора данных.

На компьютерах, обозначенных как L3, работают процессы, не требующие непосредственного доступа к аппаратуре. Это, прежде всего, третичный триггер, который считывает события из буфера, приводит к формату обработки, проводит реконструкцию и отбирает события.

Далее события записываются в два потока — физический и калибровочный. Физический поток сохраняется в архиве для дальнейшей обработки. Калибровочный передается процессам калибровки и контроля детектора, а после использования удаляется.

Предполагается использовать компьютеры архитектуры IA32 (Pentium) с операционной системой GNU/Linux. Для передачи событий через буфер могут быть использованы сетевые протоколы, либо разделяемый SCSI. При времени записи 2,5 мс/событие (см. выше) потребуется 2-3 компьютера.

Был проверен вариант буферизации на разделяемом SCSI-диске, и получен приемлемый результат скорости обмена для SSD составленной из двух компьютеров: 6 Мбайт/с — запись, 10 Мбайт/с — суммарная скорость одновременного чтения для пяти процессов.

Основные компоненты системы сбора данных уже реализованы. Текущее состояние системы поддерживается сервисом состояний (OnlState), который реализован в виде специально организованной базы данных с использованием СУБД MySQL. Специальный процесс, “распределитель доменов”, отводит каждому процессу эксклюзивную область (домен) в состоянии системы. Кроме того, этот процесс обеспечивает восстановление контекста при сбоях системы. Запуск и останов процессов по описанию в базе данных производит специальный сервис “Starter”.

Полностью реализован тракт передачи данных между Readout и третичным триггером. Третичный триггер написан в рамках системы СУМО (см. раздел 8). Специальная программа “L3 Shell” выбирает доступный для обработки буфер и запускает процесс третичного триггера (рис.12).

Интерфейс оператора реализован в виде web-страницы (рис.13). Используя кнопки интерфейса (панель слева) можно запустить (1), остановить (2), временно приостановить (3) заход, полностью остановить систему сбора данных (4). Дополнительно предоставляются функции перезагрузки журнала оператора (5), выключения sireны (6), просмотра условий запуска захода (7), списка сконфигурированных процессов (8), состояние распределителя доменов (9). Кнопка (10) позволяет просмотреть полный журнал оператора в отдельном окне, кнопка (11) — изменить настройки просмотра, кнопка (12) — просмотреть список операторов, наконец кнопка (13) запускает электронную конференцию. Внизу

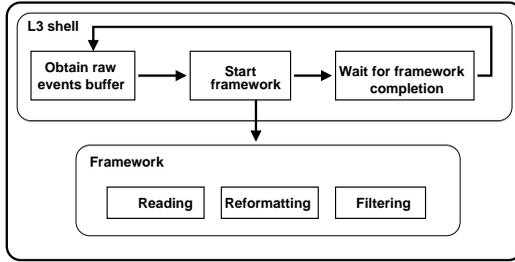


Рис. 12. Запуск третичного триггера

левой панели (14) выводится информация о текущем состоянии системы сбора данных. В поле справа отображаются последние сообщения журнала оператора (15).

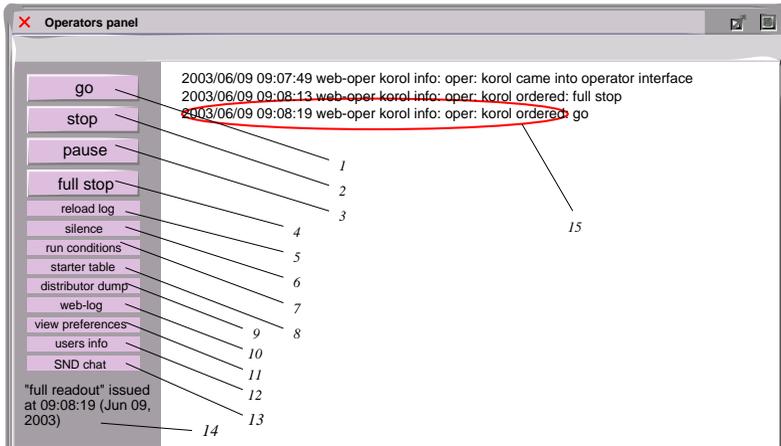


Рис. 13. Интерфейс оператора.

Процессы ССД могут выдавать сообщения как на локальный терминал, так и в журнал оператора, который хранится в SQL-базе данных. Каждое сообщение, кроме самого текста, имеет ряд атрибутов, как например, атрибут важности ("fatal", "error", "warning", "info", "debug", "trace"), атрибут sireны ("вкл", "выкл"), атрибут темы ("запуск", "электроника", и пр.). В личных настройках пользователь может подписаться на сообщения, указав интересующие значения этих атрибутов. Процесс

“Informer” — оповещатель о приходящих сообщениях в журнал оператора, при приходе нового сообщения выбирает пользователей, которые подписаны на это сообщение и отправляет им его по электронной почте. Если сообщение содержит атрибут сирены, то informer включает сирену.

К настоящему моменту создан прототип системы сбора данных. В ближайшее время он будет использован для работ с прототипом дрейфовой камеры.

## 7 Хранение данных

Оценки, приведенные далее, исходят из продолжительности эксперимента в 5 лет, частоты записи событий 100 Гц, объема упакованного события 1 кбайт.

Данные можно разделить на следующие типы:

1. Описания условий запуска заходов — параметризация заходов, описания первичного триггера, другая информация, необходимая для запуска захода. Общий объем несколько Мбайт, доступ по типу и имени.
2. Сырые события — пишутся процессом чтения КЛЮКВЫ (Readout) во временный буфер. Скорость до 4 Мбайт/с, удаляются сразу после чтения третичным триггером. Общий объем буфера  $40 \div 80$  Гбайт.
3. Упакованные калибровочные события — пишутся третичным триггером, используются для калибровок и контроля. Содержат реконструированные коллинеарные события ( $e^+e^-$ ,  $\gamma\gamma$ , и т.п.), сразу после использования удаляются. Максимальный объем на диске  $5 \div 10$  Гбайт.
4. Упакованные физические события — пишутся третичным триггером. Содержат события, отобранные для последующей реконструкции и обработки. Скорость записи около 100 кбайт/с. Общий объем за время эксперимента (включая резервное копирование)  $3 \div 4$  Тбайт.
5. Полностью реконструированные физические события — пишутся при обработке данных. Общий объем за время эксперимента  $1 \div 2$  Тбайт.

6. Общая информация о каждом заходе — условия запуска, средние загрузки, светимость и другие данные необходимые для обработки. Быстрый доступ по номеру захода. Объем порядка 300 ÷ 500 Мбайт.
7. Текущее состояние системы
  - а) Мгновенное состояние — информация с ВЭПП-2000 и СНД. Быстрый доступ по имени и типу. Объем до 1 Мбайт.
  - б) История состояния захода — каждые 15 секунд записывается информация о состоянии накопителя и детектора (см. а). Общий объем за время эксперимента 10 ÷ 20 Гбайт.
  - в) История состояний электроники — каждый час пишутся данные из пункта а), необходимое для последующего разбирательства с возможными проблемами (напряжения, температуры и т. д.). Общий объем за время эксперимента 100 ÷ 200 Мбайт.
8. Журнал оператора. Общий объем за время эксперимента 100 ÷ 200 Мбайт.
9. Калибровки — массивы калибровочных констант. Периодичность примерно 10 массивов в день на подсистему. Индексируются интервалом номеров заходов, для которых применима данная калибровка. Быстрый доступ по номеру захода. Общий объем за время эксперимента 100 ÷ 200 Мбайт.
10. Моделированные события. Общий объем несколько десятков Гбайт.

Таким образом, за время эксперимента ожидается до 6 Тбайт данных с последовательным доступом (4,5,7б,7в,8,10) и первичным методом хранения на лентах (или другом носителе с низким отношением цена/объем) и до 1 Гбайт данных с быстрым индексированным доступом (база данных) и периодическим сохранением на ленты (1,6,9).

Для временного хранения событий во время набора и реконструкции необходимо дисковое пространство в несколько десятков Гбайт. Последующая обработка будет существенно ускорена, если все реконструированные и моделированные события будут постоянно доступны на дисках (несколько сотен Гбайт).

Для хранения данных на лентах предполагается использовать специальный сервис (архив), который предоставляет доступ к файлам по именам независимо от положения на ленте, быстрый доступ к информации о файлах, автоматическое распределение лент, автоматическое резервное копирование.

Сейчас преждевременным делать выбор аппаратной базы для длительного хранения данных из-за большой динамики в ее развитии. Пока оптимальными по цене носителя, надежности, скорости записи представляются устройства хранения на магнитных лентах с линейной записью (DLT, LTO) – объем до 100 Гбайт/ленту, скорость записи до 10 Мбайт/с. С учетом быстрого падения удельной стоимости дискового пространства, возможно, будет целесообразно держать весь объем реконструированных и отобранных файлов на дисках, а сменные носители использовать только для резервного копирования.

Калибровочные данные, информацию о состоянии аппаратуры во время проведения эксперимента, данные о конфигурации эксперимента и заходов будут храниться в базах данных. На данный момент разработана база данных конфигурации и заходов. Данные хранятся с использованием СУБД MySQL. Интерфейс к базе данных реализован в виде препроцессора, обрабатывающего подмножество языка SQL. В результате работы препроцессора генерируются заголовочные файлы, содержащие объявления интерфейсов к объектам, соответствующим таблицам, и файлы с реализацией доступа к СУБД. Такой подход позволяет отслеживать корректность использования схемы данных на этапе компиляции.

## 8 Обработка данных

Основной частью системы обработки данных является “Схема управления модулями обработки” (СУМО), задача которой — организация последовательности алгоритмов, порядка вычислений и взаимодействия между алгоритмами. Единицей управления в системе является модуль, содержащий один или несколько физических алгоритмов. Модули в системе слабо связаны, зависимость между модулями определяется только данными, которыми модули обмениваются. Поскольку модули практически не связаны друг с другом, система обладает большой гибкостью, позволяющей менять конфигурацию системы или набор используемых алгоритмов. Порядок выполнения алгоритмов в системе определяется данными, которые потребляются и производятся каждым из алгоритмов. Динамическое поведение системы позволяет контролировать правильность конфигурации, избегая возможных ошибок.

Основные алгоритмы третичного триггера и реконструкции событий в калориметре СНД предполагается оставить практически без изменений, изменив только их организацию с использованием модулей. Планируется заново разработать алгоритм восстановления треков в координат-

ной системе детектора. Процедура физического анализа, по-видимому, останется также без существенных изменений. Будет осуществлено разделение анализа на программу отбора и интерактивного анализа с использованием программы RAW или аналогичных ей.

Существенные изменения предполагаются в моделировании. В качестве основного средства предложено использовать пакет Geant4. Привлекательность этого пакета заключается в более точном, по сравнению с существующими программами, описании ядерных взаимодействий  $\pi$  и  $K$  мезонов. Как первичное моделирование, так и моделирование отклика детектора, организовано в виде отдельных модулей в рамках той же системы.

В настоящее время создана основная часть (СУМО) системы обработки данных. Созданы модули, выполняющие следующие операции:

- ввод/вывод данных в виде файлов последовательного доступа;
- управление последовательностью псевдослучайных чисел для обеспечения повторяемости результатов;
- встраивание в СУМО первичных генераторов моделирования СНД;
- встраивание в СУМО моделирования проведения частиц через детектор с помощью пакета Geant4;
- отбор событий по заданным условиям и сохранение параметров события в файлы формате в HBOOK;
- создание описания геометрии детектора (пока только дрейфовая камера и калориметр), как основного, так и специализированного для Geant4;
- реконструкция треков в дрейфовой камере и кластеров в калориметре;

## 9 Возможности для изучения процессов рождения пар нуклонов на ВЭПП-2000

В экспериментах на ВЭПП-2000 становится возможным изучение процессов  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $n\bar{n}$ , что позволит получить данные о формфакторах протона и нейтрона во времени-подобной области передач импульса на пороге рождения нуклонов. Для пар мезонов  $\pi^+\pi^-$  и  $K\bar{K}$  времени-подобные формфакторы измерены с высокой точностью, и в них наблюдаются мощные резонансы, такие как  $\rho(770)$  и  $\phi(1020)$ .

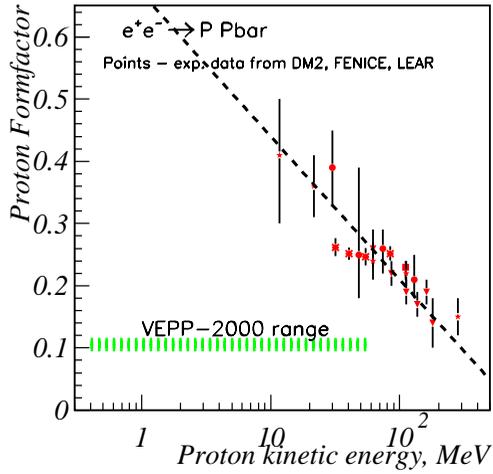


Рис. 14. Экспериментальные данные по формфактору протона на пороге.

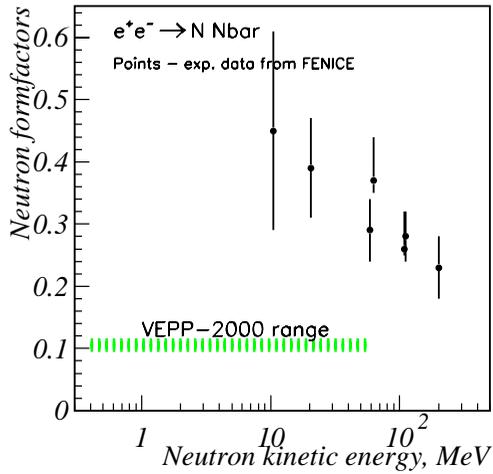


Рис. 15. Экспериментальные данные по формфактору нейтрона на пороге.

Для пар нуклонов ситуация несколько иная. В пороговой области  $\sqrt{s} < 2$  ГэВ имеющиеся данные очень скудны, а при кинетической энергии  $T < 10$  МэВ вовсе отсутствуют. Процесс  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  изучался в единственном эксперименте (FENICE, ADONE) [18]. Измеренные значения формфакторов показаны на рис.14 и 15. Экспериментальные значения сечений и формфакторов при  $\sqrt{s} \simeq 2$  ГэВ примерно равны:  $\sigma_{p\bar{p}} \simeq \sigma_{n\bar{n}} \simeq 1$  нб,  $|G^p| \simeq |G^n| \simeq 0,4$ . Выше по энергии нейтронный формфактор превышает протонный. Различные теоретические модели нуклонных формфакторов (pQCD(perturbative QCD), EVDM (extended VDM), Skyrme model) предсказывают широкий диапазон величины отношения сечений  $\sigma(e^+e^- \rightarrow n\bar{n})/\sigma(e^+e^- \rightarrow p\bar{p}) = 1/4 \div 100$ . Причем предсказания модели pQCD заметно отключаются от экспериментальных данных.

Вопросы и задачи связанные с изучением реакций  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$  и  $n\bar{n}$  в экспериментах на ВЭПП-2000 нам представляются следующим образом: отношение протонного и нейтронного формфакторов, поведение формфакторов вблизи порога, отдельное измерение электрического и магнитного формфакторов, поиск связанных  $N\bar{N}$  состояний вблизи порога.

В пользу существования связанных  $N\bar{N}$  состояний говорят, в частности, данные DM2 [19] по процессу  $e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-$ , (рис.16), которые указывают на структуру как раз вблизи порога рождения нуклонов. Если связанное состояние  $N\bar{N}$  надпороговое, оно может явно наблюдаться в процессах  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$  как нерегулярность в пороговом сечении.

Вблизи порога образования пар протонов возможно рождение очень узкого  $\Gamma \sim 10^{-2}$  эВ кулоноподобного связанного состояния  $p\bar{p}$  с энергией связи около 12,5 КэВ. К сожалению, из-за энергетического разброса сечение рождения этого резонанса падает на много порядков до уровня, составляющего  $\sim 1\%$  от сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow$  адроны. Тем не менее, при высокой статистической точности, есть шанс наблюдать это явление в том случае, если сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow$  адроны имеет гладкий вид вблизи порога рождения протонов.

Исходя из оценки сечения  $\sigma_{p\bar{p}} \simeq \sigma_{n\bar{n}} \simeq 0,1$  нб на пороге при  $T_{kin} \sim 1$  МэВ (энергетический разброс  $\sigma_E \simeq 0,7$  МэВ), интегральной светимости  $\Delta L \sim 1$  фб $^{-1}$  и эффективности регистрации  $\epsilon \sim 0,1$ , для числа событий нуклон-антинуклонных пар можно получить оценку  $N_{p\bar{p}} \sim N_{n\bar{n}} \sim 10^4$  событий. Это более чем на 2 порядка больше имеющейся в предыдущих экспериментах статистики таких событий. Поэтому можно надеяться, что на ВЭПП-2000 будут получены ответы на многие из вышеперечисленных вопросов.

Сечение рождения пар протонов на пороге имеет характерный вид

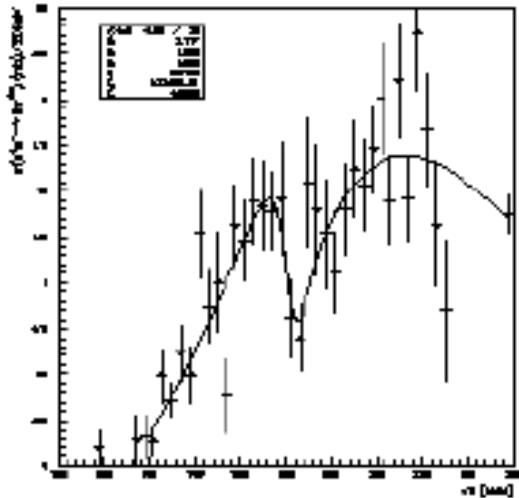


Рис. 16. Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-$  вблизи порога рождения нуклонов.

“ступеньки” с энергией  $2E = 2M_p$ , что позволяет проводить калибровку энергетической шкалы коллайдера. Оценка показывает, что за время измерений  $\sim 1$  сутки можно откалибровать энергию с точностью  $\Delta E \simeq 0.1$  МэВ, что примерно на порядок меньше энергетического разброса  $\sigma_E \simeq 0.7$  МэВ.

Пары  $p\bar{p}$  на пороге рождения имеют очень малый ионизационный пробег в веществе, поэтому они поглощаются в веществе перед дрейфовой камерой СНД. Вследствие этого протон будет "невидимым" в СНД, а антипротон даст аннигиляционную звезду, состоящую из нескольких  $\leq 10$  треков заряженных частиц и фотонов с общим энерговыделением  $E \simeq 2M_p \simeq 1.9$  ГэВ. Так как протон невидим, а область вылета антипротона довольно протяженная  $\simeq 5$  см, в событии  $p\bar{p}$  измеряется лишь  $z$ -координата точки аннигиляции антипротона. Полярный угол  $\theta$ , необходимый для раздельного определения формфакторов (электрического и магнитного), будет измеряться с большой ошибкой, что делает конфигурацию внутренней части СНД неблагоприятной для изучения процесса  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ . В настоящее время рассматриваются возможности изменения детектора для улучшения регистрации этого процесса.

События  $n\bar{n}$  не менее трудны в реконструкции. Обе частицы - нейтрон и антинейтрон проникают на значительную глубину в калориметр. В интервале энергии ВЭПП-2000 нейтроны практически не выделяются. Антинейтроны аннигилируют внутри калориметра и дают "звезду". Такие события могут выглядеть как космический или пучковый фон. Часть событий может выглядеть как события физических процессов с рождением  $K_L$ -мезона, например,  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L \pi^0$ .

Общим для процессов  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}, p\bar{p}$  является тот факт, что конечные частицы являются нерелятивистскими, поэтому даже несмотря на малые пролетные расстояния  $\sim 10$  см, время пролета оказывается заметным  $\sim 5$  нс. Поэтому применение время-пролетной методики выглядит перспективным как для выделения событий, так и для подавления фона.

В настоящее время проведено моделирование процесса  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$  и ряда фоновых процессов, которое показало, что физический фон может быть подавлен. На очереди — моделирование обоих процессов  $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}, p\bar{p}$  с учетом возможных модификаций СНД включающих, например, время-пролетную систему.

## 10 Заключение

Модернизации СНД включает в себя три основные части:

1. ремонт детектора, включая замену вышедших из строя и исчерпавших свой ресурс элементов.
2. замена компьютерных систем обработки информации и сбора данных и модернизация электроники детектора;
3. замена трековой системы СНД, а также оснащение детектора азрогелевым черенковским счетчиком для улучшения идентификации частиц.

В настоящее время ведется работа по подготовке к ремонту калориметра СНД, начаты тесты с прототипами трековой системы и азрогелевых черенковских счетчиков, создан и тестируется прототип системы сбора данных, для обработки данных разработана программа реконструкции треков в дрейфовой камере и кластеров в калориметре, для моделирования создано описание геометрии основных частей детектора.

Работа частично поддержана грантами Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1335.2003.2, РФФИ 02-02-16348-а, Лаврентьевского конкурса молодежных проектов СО РАН 2002 г "Разработка и создание трековой системы для экспериментов с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000" и Фонда содействия отечественной науке.

## Список литературы

- [1] A.N. Skrinsky, in Proc. of Workshop on physics and detectors for DAΦNE, Frascati, Italy, April 4-7, 1995, p.3
- [2] Yu.M.Shatunov et al., in Proc. of the 2000 European Particle Acc. Conf., Vienna (2000), p.439
- [3] M.N.Achasov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A449 (2000) 125.
- [4] P.M.Beschastnov et al., Nucl. Instr. and Meth. A342 (1994) 477.
- [5] M.N.Achasov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A401 (1997) 179.
- [6] M.N.Achasov, et al. Nucl. Instr. and Meth. A411 (1998) 337.
- [7] R.R.Akhmetshin, et al., Proc. of Six Int. Conf. on Instrumentation for Experiments at  $e^+e^-$  Colliders, Nucl. Instr. and Meth. A379 (1996) 509.
- [8] Г.Н.Абрамов, и др., Препринт ИЯФ 2001-29, Новосибирск, 2001.
- [9] V. M. Aulchenko, et al., in Proc. of 8th Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR02), Novosibirsk, Russia, 28 Feb - 6 Mar 2002, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 246.
- [10] K.I.Beloborodov, et al., in Proc. of 8th Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR02), Novosibirsk, Russia, 28 Feb - 6 Mar 2002, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) pp 487-490.
- [11] V.V.Anashin, et al, Nucl. Instr. and Meth. A357 (1995) 103.
- [12] M.Yu.Barnyakov, et al, Nucl. Instr. and Meth. A419 (1998) 584.
- [13] V.M.Aulchenko et al, Nucl. Instr. and Meth. A409 (1998) 639.
- [14] Yu.V.Usov et al, Nucl. Instr. and Meth. A494 (2002) 555.
- [15] В.М.Аульченко, Б.О.Байбусинов, В.М.Титов, Препринт ИЯФ 88-22, Новосибирск, 1988.
- [16] В.М.Аульченко, Л.А.Леонтьев, Ю.В.Усов, Препринт ИЯФ 88-30, Новосибирск, 1988.
- [17] Д.А.Букин и др, Препринт ИЯФ 98-29, Новосибирск, 1998.
- [18] A.Antonelli et al., Nucl.Phys., B517, 1998, 3
- [19] A.B.Clegg, A.Donnache, Z.Phys. C34, 1987, 257

*Г.Н.Абрамов, В.М.Аульченко, М.Н.Ачасов, К.И.Белобородов,  
А.В.Бердюгин, А.Г.Богданчиков, А.В.Боженок, А.А.Ботов,  
Д.А.Букин, М.А.Букин, А.Р.Бузыкаев, А.В.Васильев, В.М.Весенев,  
В.Б.Голубев, Т.В.Димова, В.П.Дружинин, А.А.Жуков, А.С.Ким,  
А.А.Король, С.В.Кошуба, Е.А.Кравченко, А.Ю.Кульпин,  
А.Е.Образовский, А.П.Онучин, Е.В.Пахтусова, В.М.Попов, Е.Э.Пята,  
С.И.Середняков, В.А.Сидоров, З.К.Силагадзе, А.А.Сироткин,  
А.И.Текутьев, Ю.В.Усов, П.В.Филатов, В.В.Шарый, Ю.М.Шатунов,  
Д.А.Штоль, А.В.Язьков*

**Модернизация детектора СНД  
для экспериментов на ВЭПП-2000**

*G.N.Abramov, V.M.Aulchenko, M.N.Achasov, K.I.Beloborodov,  
A.V.Berdyugin, A.G.Bogdanchikov, A.V.Bozhenok, A.A.Botov, D.A.Bukin,  
M.A.Bukin, A.R.Buzykaev, A.V.Vasiljev, V.M.Vesenev, V.B.Golubev,  
T.V.Dimova, V.P.Druzhinin, A.A.Zhukov, A.S.Kim, A.A.Korol,  
S.V.Koshuba, E.A.Kravchenko, A.Yu.Kulpin, A.E.Obrazovsky,  
A.P.Onuchin, E.V.Pakhtusova, V.M.Popov, E.E.Pyata, S.I.Serednyakov,  
V.A.Sidorov, Z.K.Silagadze, A.A.Sirotkin, A.I.Tekutiev, Yu.V.Usov,  
P.V.Filatov, V.V.Shary, Yu.M.Shatunov, D.A.Shtol, A.V.Yazkov*

**Upgrade of the Spherical Neutral Detector for VEPP-2000**

ИЯФ 2003-45

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 25.06.2003 г.

---

Сдано в набор 4.07.2003 г.

Подписано в печать 7.07.2003 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.9 печ.л., 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 125 экз. Бесплатно. Заказ № 45

---

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на  
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.