

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 539.1.08

ТРИГГЕР ДЕТЕКТОРА КЕДР

© 2011 г. С. Е. Бару, А. А. Талышев, В. И. Тельнов, Ю. Г. Украинцев,
Ю. В. Усов, Л. И. Шаманаева, А. Г. Шамов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

E-mail: A.A.Talyshev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 08.11.2010 г.

Рассмотрены первичный и вторичный триггеры детектора КЕДР, работающего на ускорителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН с 2000 г. Описаны системы детектора, являющиеся источниками сигналов, устройство триггеров, временные характеристики их работы и связь с системой сбора данных. Средние частоты срабатывания первичного и вторичного триггеров составили 3.5 кГц и 50 Гц соответственно, общий к.п.д. системы сбора данных и триггеров – 91.45%, а эффективность отбора полезных событий – 98%. С использованием детектора КЕДР к настоящему времени получен целый ряд результатов мирового уровня, в том числе выполнены эксперименты по прецизионному измерению масс элементарных частиц J/ψ -, ψ' -, $\psi(3770)$ -мезонов и τ -лептона с точностью лучше текущих мировых значений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых элементов установок, используемых в экспериментах по физике высоких энергий, является система отбора событий и запуска системы сбора данных – триггер. Он отбирает из всей массы событий только те, которые соответствуют изучаемым процессам. Все остальные события являются фоновыми и должны быть отброшены. При этом эффективность к полезным событиям должна быть как можно выше, а примесь фоновых событий – как можно меньше, чтобы загрузка на выходе триггера была приемлемой для обработки потока данных на компьютерах и последующей записи их на диск.

Триггер может состоять из нескольких уровней – первичного, вторичного, третичного и т.д. Уровни триггера могут быть аппаратными или программными. Аппаратный триггер собирается из специализированных блоков электроники. Системы отбора полезных событий, работающие на компьютерах, называют программным триггером.

Первичный триггер (п.т.) работает с событиями, поступающими с высокой интенсивностью от детектора. Следовательно, время принятия решения у него должно быть малым, чтобы потери событий были как можно меньше. Поэтому алгоритм п.т. учитывает только самые простые характеристики события, такие как совпадения срабатываний различных подсистем детектора, количество сработавших каналов и т.п. Первичный триггер получает сигналы не от всех подсистем детектора, а только от самых быстрых. Отбирая полезные события из всей массы поступающей от детектора информации, п.т. снижает интенсивность потока дан-

ных, уменьшает частоту событий для вторичного триггера (в.т.). Это дает возможность в.т. затрачивать больше времени на обработку события, рассматривая его более детально и применяя более сложные алгоритмы. Возможно построение и подсчет количества треков, определение кластеров сработавших ячеек детекторов и др. На этом этапе используются все подсистемы детектора.

Количество уровней триггера может быть различным для каждого конкретного детектора и зависит от многих факторов, таких как интенсивность поступления событий, время появления сигналов, размер события и требуемая скорость записи событий на диск. Первая и вторая ступени триггера, как правило, являются аппаратными. Третичный триггер, чаще всего, является программным. На данном этапе событие оценивается уже целиком, учитывается информация от всех систем детектора, происходит сшивка треков от разных подсистем.

2. ДЕТЕКТОР КЕДР НА ВЭПП-4М

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4М [1] со встречными e^+e^- -пучками Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН предназначен для проведения широкого спектра экспериментов по физике элементарных частиц, фотоядерных исследований и экспериментов с синхротронным излучением. ВЭПП-4М состоит из двух полуколец, экспериментального промежутка, где находится детектор КЕДР, и прямолинейного технического промежутка, где расположены ускоряющая и инжекционная системы. Общий периметр равен 366 м. Энергия пучков может изме-

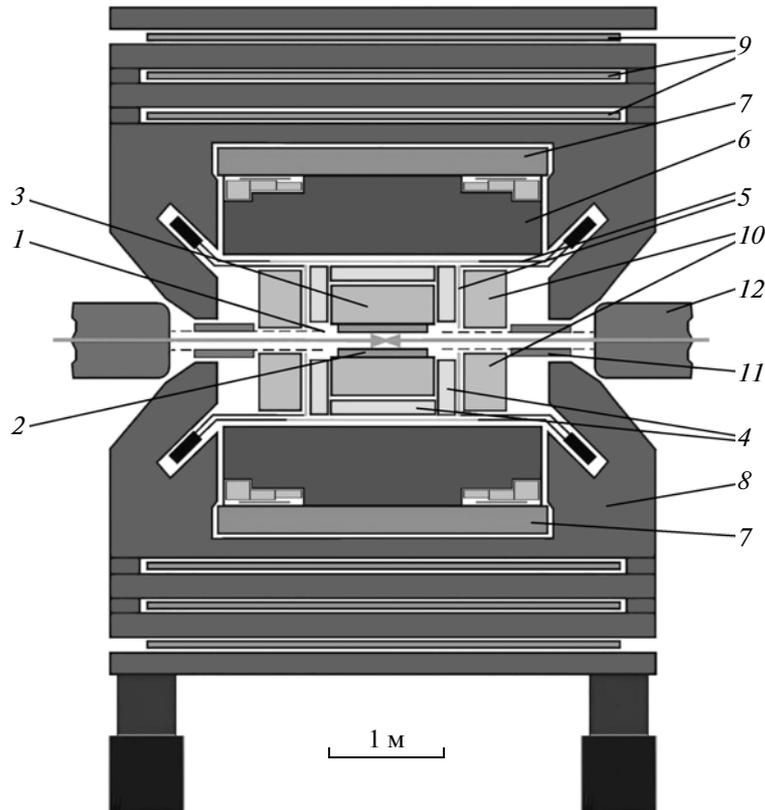


Рис. 1. Детектор КЕДР (сечение в вертикальной плоскости вдоль пучка). 1 – вакуумная камера; 2 – вершинный детектор; 3 – дрейфовая камера; 4 – аэрогелевые черенковские счетчики; 5 – сцинтилляционные счетчики; 6 – калориметр на основе LKг; 7 – сверхпроводящий магнит; 8 – ярмо; 9 – торцевые CsI-калориметры; 10 – компенсирующий соленоид ускорителя; 12 – квадрупольные линзы финального фокуса.

няться в диапазоне от 1 до 6 ГэВ. Светимость в районе J/ψ -резонанса достигает $L = 2.5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Период обращения пучков 1240 нс. В режиме работы с четырьмя сгустками частиц (два электронных и два позитронных) время между столкновениями пучков составляет 620 нс.

Детектор КЕДР [2] является универсальным магнитным детектором, созданным для проведения экспериментов на коллайдере ВЭПП-4М, и состоит из следующих основных систем (рис. 1): вершинного детектора 2, дрейфовой камеры 3, аэрогелевых черенковских счетчиков 4, сцинтилляционных счетчиков 5, цилиндрического калориметра на основе жидкого криптона 6, торцевого CsI-калориметра 10 и мюонной системы 9. На рисунке также изображены вакуумная камера 1, сверхпроводящий магнит 7, ярмо 8, компенсирующий соленоид ускорителя 11 и квадрупольные линзы финального фокуса 12.

Физическая программа детектора КЕДР весьма обширна и включает в себя следующие основные эксперименты.

- Прецизионное измерение масс элементарных частиц;
- в области низкой энергии ($E = 1.5\text{--}3.0$ ГэВ):

- J/ψ -, ψ' -, $\psi(3770)$ -мезоны [3],
- D^0 -, D^\pm -мезоны [4],
- τ -лептон [5];
- $\Upsilon(1s)$ -, $\Upsilon(2s)$ -, $\Upsilon(3s)$ -, $\Upsilon(4s)$ -мезоны в области высокой энергии ($E = 4.5\text{--}5.0$ ГэВ).
- Измерение R (отношение сечений $e^+e^- \rightarrow$ адроны и $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$) в области энергий $2E = 2\text{--}12$ ГэВ.
- Измерение сечения $\Upsilon\Upsilon \rightarrow$ адроны и исследование двухфотонных процессов.
- Измерение вероятностей радиационных переходов в системе $c\bar{c}$ - и $b\bar{b}$ -кварков.

Детектор регистрирует большое количество событий, основную часть которых составляет фон от пучков и космические частицы. Доля полезных событий очень мала. Для их обнаружения в режиме on-line необходимо использовать быструю систему отбора.

В табл. 1 приведены загрузки детектора от процессов с наибольшими сечениями и упругого рассеяния при минимальном угле регистрации 13° .

Загрузка детектора от космических частиц равна ~ 1.5 кГц. На энергии J/ψ -резонанса $2E = 3.1$ ГэВ суммарные токи пучков составляют в среднем 4 мА. При этом средний пучковый фон равен

Таблица 1. Загрузка детектора КЕДР от различных процессов

Энергия пучков (суммарная) $2E + \sigma_w$, ГэВ	Физические процессы с наибольшим сечением	Число событий, нб ⁻¹	Частота событий при светимости $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (Гц)
$3.1 + 0.7 \cdot 10^{-3}$	$e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow$ адроны	3800	3.8
	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	2100	2.1
	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon \rightarrow$ адроны	25	0.025
$3.8 + 1.0 \cdot 10^{-3}$	$e^+e^- \rightarrow \psi'' \rightarrow$ адроны	730	0.73
	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	1500	1.5
	$e^+e^- \rightarrow \Upsilon \rightarrow$ адроны	20	0.02

~30 кГц. Для энергии $2E = 3.8$ ГэВ и суммарных токов 8 мА средний пучковый фон равен ~50 кГц. Суммарная загрузка полезных событий, как видно из табл. 1, составляет ~6 Гц для энергии 3.1 ГэВ и ~2.3 Гц для энергии 3.8 ГэВ. Таким образом, фоновая загрузка превышает загрузку от полезных событий в 500 и в 2000 раз соответственно. Это дает представление, насколько серьезные проблемы необходимо решить, чтобы уменьшить нагрузку на систему сбора данных, сократить объем записываемой информации и повысить эффективность детектора в целом.

3. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА КЕДР

Система сбора данных (ССД) детектора КЕДР построена на основе разработанного в ИЯФ стандарта “Клюква” [6]. Он представляет собой специализированные крейты с быстрой шиной данных и набором блоков электроники. Блоки ССД “Клюква” бывают нескольких типов. Информационные платы (ИП) принимают сигналы от ячеек детекторов и измеряют амплитуду, время появления и форму входных импульсов. Существует несколько видов ИП, используемых для разных систем детектора. Процессор вывода (ПВ) осуществляет чтение данных из ИП по записанной в него компьютером программе и сохраняет их в одном из двух своих блоков памяти. Интерфейс первичного триггера (ИПТ) получает сигналы о срабатывании дискриминаторов в ИП, передающиеся по линиям быстрого ИЛИ (FOR). Интерфейс вторичного триггера (ИВТ) принимает из ИП информацию о сработавших каналах, передаваемую по шине данных “Клюква” при помощи специальных команд ПВ. Интерфейсы первичного и вторичного триггеров транслируют полученные данные в п.т. и в.т. соответственно. Размножитель служебных сигналов (РСС) передает тактовую частоту, необходимую для работы ИП, импульс общего стопа для измерителей времени, сигналы управления работой ПВ. Один крейт “Клюква” содержит по одному блоку ИПТ, ИВТ, ПВ, РСС и 16 блоков ИП.

Связь крейтов “Клюква” с компьютером осуществляется при помощи набора служебных блоков, расположенных в крейтах КАМАК [7]. Блок центральной системы управления (ЦСУ) генерирует тактовую частоту 250 МГц, единую для всех ИП, принимает сигналы от триггеров и выдает управляющие сигналы в крейты “Клюква”. Распределение этих сигналов осуществляется блоками размножителей служебных сигналов, выполненных в стандарте КАМАК (РСК). Передача данных из ПВ и запись туда программы чтения происходит через блоки обмена (БО).

Основной особенностью построения ССД с единым центром управления является то, что тактовые частоты и управляющие сигналы приходят во все ИП одновременно, обеспечивая синхронность работы всех измерителей времени [8].

В ПВ есть память на два события. Еще одно может храниться в ИП. Таким образом, в ССД детектора КЕДР есть разравнитель на три события. Его задача – выравнить поток поступающих данных, время появления которых произвольно, и поток чтения, скорость которого постоянна.

4. СИСТЕМА ОТБОРА СОБЫТИЙ ДЕТЕКТОРА КЕДР

Аппаратный триггер детектора КЕДР имеет двухуровневую структуру. Он включает в себя первичный и вторичный триггеры. Третичный триггер является программным.

Первичный триггер детектора КЕДР принимает решение за 450 нс. Поскольку это время меньше интервала между столкновениями пучков в ускорителе ВЭПП-4М (620 нс), то п.т. не имеет мертвого времени и может обрабатывать каждое возникающее пучковое событие.

Такое малое время работы накладывает жесткие ограничения на детекторы, сигналы от которых используются в п.т. Только сцинтилляционные счетчики, торцевой и цилиндрический калориметры являются источниками сигналов для первичного триггера.

Первичный триггер детектора КЕДР вырабатывает только один сигнал – “Решение ПТ” или про-



Рис. 2. Временная диаграмма связи работы триггера и системы сбора данных детектора КЕДР.

сто “ПТ”. Сигнал появляется, если текущее событие соответствует требованиям отбора. В противном случае сигнал “ПТ” не появляется, и такое событие просто игнорируется.

Импульс “ПТ” синхронизован с в.ч.-сигналом “Фаза” ускорителя, и поэтому является временной отметкой, относительно которой измеряются времена прихода сигналов от различных каналов детекторов. Он выполняет функцию сигнала “Блокировка” для ССД, т.е. по этому сигналу в ИП запоминаются номера сработавших ячеек детекторов и начинаются измерения времен и амплитуд.

Сигнал “ПТ” инициирует начало работы в.т., который имеет гораздо больше времени на принятие решения и использует информацию от всех трековых подсистем детектора КЕДР и калориметров. Время полной работы в.т. составляет 18 мкс, из которых 7 мкс тратится на ожидание сигналов от дрейфовой камеры, имеющей большое время дрейфа. Вторичный триггер детектора КЕДР имеет два решения: “BT+” и “BT-” (рис. 2). Если в.т. не находит в событии требуемых признаков, то через 18 мкс после прихода импульса “ПТ” он выдает сигнал “BT-”. В ответ на это в ССД вырабатывается импульс “Сброс”, по которому сбрасываются данные во всех информационных платах, п.т. и сам в.т. Начавшиеся измерения времен и амплитуд прерываются, и ССД вместе с триггерами вновь готова к приему и обработке нового события. Если в.т. классифицирует данное событие как полезное, то он выдает сигнал “BT+”, но не сразу, а задерживает его на 300 мкс, чтобы дать время оцифровывающим блокам электроники закончить измерения времен и амплитуд. По сигналу “BT+” запускается процесс чтения ИП в память ПВ. После того как данные из всех ИП про-

читаны, ЦСУ вырабатывает сигнал “Сброс”, и система готовится к принятию нового события от детекторов.

5. ПЕРВИЧНЫЙ ТРИГГЕР

Первичный триггер детектора КЕДР размещен возле самого детектора рядом с электроникой, формирующей сигналы для него. Это оптимально с точки зрения времени получения сигнала “Решение ПТ”.

Блоки электроники п.т. детектора КЕДР выполнены в стандарте КАМАК и занимают 2.5 крейта. Шина КАМАК используется для программирования блоков, задания их параметров и режимов работы, что выполняется однократно перед началом набора статистики. Все быстрые сигналы передаются через кабели, подключенные к передним панелям модулей. В этом случае скорость работы шины КАМАК не влияет на быстрдействие п.т.

Источниками сигналов для п.т. являются три подсистемы детектора КЕДР: сцинтилляционные счетчики (СЦ), торцевой калориметр на основе кристаллов йодистого цезия (CsI) и цилиндрический калориметр, заполненный жидким криптоном (LKr).

5.1. Сцинтилляционные счетчики в п.т.

Сцинтилляционные счетчики [2] изготовлены на основе органического сцинтиллятора и являются самыми быстрыми детекторами в составе детектора КЕДР, что позволяет использовать их в качестве времяпролетной системы (time-of-flight, TOF) при калибровках от космических частиц. Система состоит из трех частей: цилиндрической

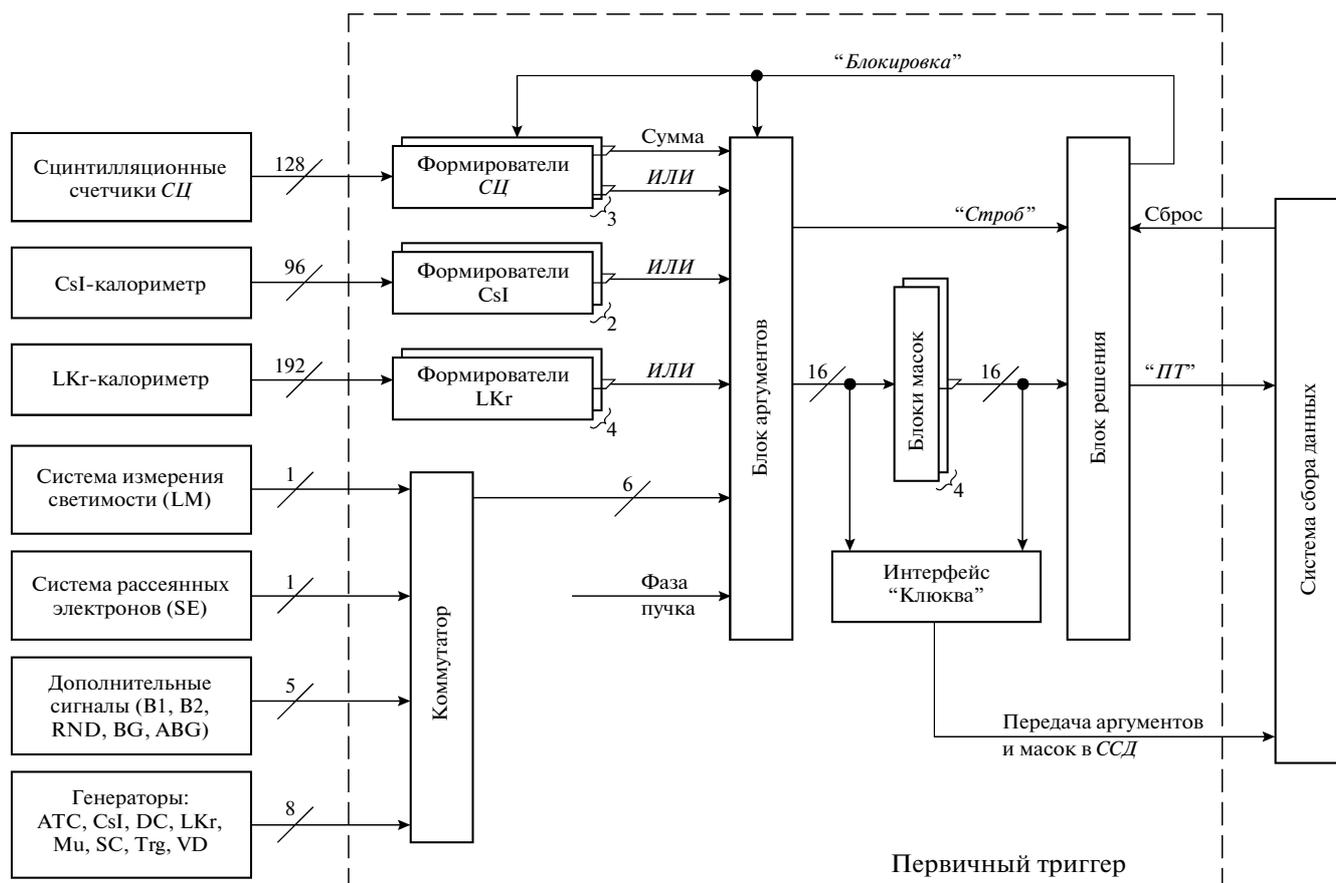


Рис. 3. Блок-схема первичного триггера.

(также называемой баррельной) и двух торцевых, каждая из которых содержит по 32 счетчика. Каждый *СЦ* цилиндрической части из-за своего довольно большого размера имеет два фотоэлектронных умножителя (*ФЭУ*) – “левый” и “правый”, расположенные на двух торцах счетчика. Таким образом, общее количество сигналов от этой системы, приходящих в п.т., равно 128. Триггеру нет необходимости различать левый и правый *ФЭУ* счетчиков цилиндрической части, поэтому сигналы от них объединяются по *ИЛИ*. В результате п.т. работает с 96 каналами *СЦ*, сигналы от которых поступают на три блока формирователей-сумматоров (*ФС*) счетчиков: один – для цилиндрической части и два – для торцевых счетчиков (рис. 3). По фронту импульса *ИЛИ* всех каналов формируется временной интервал длительностью 470 нс, и на выходе появляется соответствующий импульс, который используется в блоке аргументов. В течение этого времени блоком регистрируются и запоминаются срабатывания всех *СЦ*, и на выходе сумматора появляется код, соответствующий количеству сработавших *СЦ*. Причем если *ФС* для цилиндрической части считает просто сумму всех входов, на которых появился сигнал, то *ФС* для торцевых счетчиков вы-

числяют сумму несмежных сработавших каналов, т.е. сумму кластеров. Это связано с малым геометрическим размером торцевых *СЦ* вблизи пучка и, как следствие, повышенной вероятностью срабатывания двух соседних счетчиков от одной пролетевшей заряженной частицы. Поэтому сумма кластеров более точно описывает количество частиц, зарегистрированных торцевыми *СЦ*. Если в течение временного интервала длительностью 470 нс не появилось решения триггера, то по его окончании содержимое запоминающих ячеек входных каналов сбрасывается и сумма обнуляется. Если же п.т. сработал, то на вход “Block” из блока решения поступает сигнал блокировки, который запрещает сброс и изменение входных ячеек, в результате чего фиксируется потенциал и код на выходе формирователей. В таком состоянии *ФС* находится до снятия блокировки, после чего цикл повторяется. *ФС* имеет регистры масок входных каналов, позволяющие разрешать или запрещать прохождение сигналов от любого из 32 входов.

5.2. Торцевой CsI-калориметр в п.т.

Торцевые калориметры детектора КЕДР построены на основе сцинтилляционных кристал-

лов CsI(Na) [9]. Общее количество кристаллов равно 1232 [10]. Размер триггерного канала в калориметре должен соответствовать размеру ливня частиц, развивающегося в детекторе. Поэтому отдельные кристаллы CsI объединены в группы, которые называются супербашнями (*СБ*). Каждая *СБ* содержит от 24 до 28 кристаллов CsI. Всего имеется 48 *СБ* – по 24 в каждом торце. Аналоговые импульсы от отдельных кристаллов суммируются, чтобы сформировать сигнал от *СБ*, после чего он разветвляется на два сигнала. Один из них используется в в.т., а другой подается на дискриминатор с регулируемым порогом для п.т. Фоновая загрузка кристаллов CsI сильно зависит от расстояния до оси пучка. Поэтому все *СБ* разделены на три группы в виде колец, отличающихся радиусами, и на каждое кольцо подается свой порог для дискриминаторов п.т.

Постоянная времени формирования сигналов CsI для п.т. такова, что они могут появляться с разбросом по времени ~350 нс относительно момента пролета частиц. Это зависит от амплитуды аналогового сигнала: если она большая, то дискриминатор сработает раньше, если амплитуда мала, то срабатывание дискриминатора произойдет позже.

В блоке формирователей CsI 48 входов, на которые подаются сигналы с дискриминаторов торцевого калориметра. Блок аналогичен формирователю *СЦ*, но сумматор отсутствует, есть только формирование импульса *ИЛИ* длительностью 470 нс на выходе *OUT*. Блок также имеет регистры масок входных каналов, позволяющие разрешать или запрещать прохождение сигналов от любого из 48 входов.

Первичный триггер использует два таких блока, чтобы иметь возможность сформировать два аргумента CsI – отдельно для левого и правого торцов.

5.3. Цилиндрический LKr-калориметр в п.т.

Цилиндрический электромагнитный LKr-калориметр [11] представляет собой набор ионизационных камер, заполненных жидким криптоном. Он состоит из трех слоев чувствительных ячеек, называемых башнями. LKr-калориметр содержит 2304 канала для измерения энергии. Башни первых двух слоев LKr объединены в супербашни (*СБ*) для использования в триггере. Всего имеется 192 *СБ*, каждая из которых состоит из 8 башен LKr – $2 \cdot 2 \cdot 2$ по всем трем координатам (r, φ, z). Сигналы от них с временем формирования 1 мкс поступают на дискриминаторы с регулируемым порогом. Такое большое время формирования выбрано для уменьшения уровня шумов дискриминаторов. Однако поскольку это время больше, чем время регистрации сигналов в п.т. (350 нс), то сигналы с малой амплитудой от *СБ* LKr не попадают в п.т. Поэто-

му порог LKr в п.т. определяется не порогом дискриминаторов, а временем и равен ~300 МэВ.

Блок формирователей LKr отличается от предыдущего только типом входных сигналов (парафазные сигналы ЭСЛ-уровня вместо NIM) и типом разъемов. Логика работы блока точно такая же: 48 входных сигналов собираются по *ИЛИ* и формируется сигнал длительностью 470 нс. Если в течение этого времени приходит сигнал блокировки от блока “*Решение ПТ*”, то состояние входов запоминается. Если п.т. не выработал положительного решения, то через 470 нс выходной сигнал сбрасывается.

В п.т. установлено четыре таких блока для обработки всех 192 сигналов от супербашен LKr-калориметра.

5.4. Аргументы п.т.

Всего в п.т. поступает 128 сигналов от *СЦ*, 48 от CsI-калориметра, 192 от LKr-калориметра, 7 сигналов от прочих систем детектора и 8 от генераторов. Все эти сигналы используются для формирования признаков события, называемых аргументами, по которым происходит отбор полезных событий.

Импульсы с формирователей входных сигналов (*ИЛИ* длительностью 470 нс и суммы *СЦ*) поступают на блок аргументов. Задача этого блока состоит в выработке признаков события – аргументов – из информации, предоставляемой формирователями-сумматорами, и внешних сигналов. Предусмотренные в п.т. аргументы приведены в табл. 2.

Для получения аргументов 7–10 (см. табл. 2) используется сумма сработавших *СЦ*. В результате суммирования в *ФС* получаются три числа: *SCEL_num*, *SCER_num* и *SCB_num* – числа сработавших каналов в левом, правом торцах и в цилиндрической (баррельной) части соответственно. Из них при помощи мажоритарной схемы, построенной на сумматорах и логических элементах, формируются следующие признаки события: из суммы двух первых чисел вырабатывается аргумент *SCE2*, а из суммы всех трех чисел формируются аргументы 8–10.

В детекторе КЕДР есть внешние системы, такие как система регистрации рассеянных электронов и система измерения светимости ускорителя, которые тоже считываются при помощи *ССД* и участвуют в формировании аргументов п.т. Электроника п.т. может работать одновременно только с 16-ю аргументами. Поэтому первые десять описанных аргументов постоянно присутствуют в триггере, и есть еще ряд аргументов, которые являются коммутируемыми, – из них в триггере одновременно могут использоваться только 6. Соответствующие аргументы перечислены в табл. 2, позиции 11–17.

Таблица 2

№	Аргумент	Расшифровка аргументов
Собственно детекторные аргументы, используемые п.т. при выработке решения		
1	CsI1	Логическое <i>ИЛИ</i> сигналов супербашен левого торца CsI-калориметра
2	CsI2	То же самое для правого торца CsI
3	LKr	Логическое <i>ИЛИ</i> сигналов супербашен цилиндрического LKr-калориметра
4	SC1	<i>ИЛИ</i> сигналов сцинтилляционных счетчиков (<i>СЦ</i>)
5	SCB1	<i>ИЛИ</i> сигналов <i>СЦ</i> – барреле
6	SCE1	То же самое, но для торцевых <i>СЦ</i>
7	SCE2	Вырабатывается при наличии, по меньшей мере, двух сработавших <i>СЦ</i> , расположенных как в одном торце, так и в разных
8	SC2	Появляется, если сработало ≥ 2 <i>СЦ</i> во всем детекторе
9	SC3	Появляется, если сработало ≥ 3 <i>СЦ</i> во всем детекторе
10	SC4	Появляется, если сработало ≥ 4 <i>СЦ</i> во всем детекторе
Аргументы от внешних систем, определяющих условия работы ускорителя		
11	LM	Признак срабатывания системы измерения светимости ускорителя
12	SE	Признак срабатывания системы рассеянных электронов
13	ABG	Anti background – отсутствие срабатывания ближайших к пучку <i>СБ</i> CsI (по 4 слева и справа)
14	BG	Инверсия ABG сигнала – используется для проверки
15	B1	Признак первого сгустка частиц
16	B2	Признак второго сгустка частиц
17	RND	Случайный аргумент
Генераторные аргументы для чтения данных при помощи <i>ССД</i>		
18	Gen_ATC	Признак срабатывания генератора системы аэрогелевых черенковских счетчиков
19	Gen_CsI	Генератор CsI-калориметра
20	Gen_DC	Генератор дрейфовой камеры
21	Gen_LKr	Генератор LKr-калориметра
22	Gen_MU	Генератор мюонной системы
23	Gen_SC	Генератор сцинтилляционных счетчиков
24	Gen_VD	Генератор вершинного детектора
25	Gen_TRG	Генератор самого триггера

Заметим, что для получения признака LM от системы светимости сигнал от нее делится в 200001 раз (число должно быть нечетным, чтобы можно было запускаться как от первого, так и от второго сгустка частиц).

Аргумент ABG был добавлен для уменьшения количества фоновых событий и снижения загрузки п.т. от супербашен CsI, расположенных близко к пучку.

Признаки сгустков B1 и B2 используются только в произведении одного на другой. Это не добавляет никакой загрузки триггеру, но позволяет по записанным данным определить, от какого сгустка частиц произошел запуск триггера.

Случайный аргумент RND представляет собой поделенную в 500001 раз фазу пучка. Частота срабатывания ~ 3 Гц. Коэффициент деления должен быть нечетным, с тем чтобы триггер мог запус-

каться как от первого, так и от второго сгустка частиц. Этот аргумент используется для “случайного” запуска, который применяется для изучения фонов.

При проверке работы трактов электроники от предусилителей до *АЦП* системы детектора КЕДР используют генераторы. Чтобы иметь возможность читать данные при помощи *ССД*, необходимо выработать положительное решение п.т. Для этого в триггере существуют генераторные аргументы (см. табл. 2, позиции 18–25).

Аргументы п.т. поступают на внешнюю шину аргументов, состоящую из 16 витых пар в виде дифференциальных ЭСЛ-сигналов, сформированных с длительностью 470 нс. Эта длительность определяется формирователями-сумматорами, и при наличии сигнала блокировки аргументы фиксируются на шине. Сигнал блокировки про-

ходит через все блоки формирователей (SCB, SCE, CsI, LKr) и нагружается на 50 Ом в блоке аргументов, как показано на рис. 3.

Шина аргументов передает информацию во все блоки масок, интерфейс “Клюква” и блок решения.

Для вторичного триггера блок аргументов передает четыре сигнала: SC2, SC3, SC4 и Gen. Последний из них является логическим *ИЛИ* сигналов генераторов.

5.5. Маски п.т.

После формирования аргументы сравниваются с заранее установленными масками. Маска – это слово, состоящее из 0 и 1, в котором каждый бит соответствует одному из аргументов. Для срабатывания маски необходимо наличие всех аргументов, которым в маске соответствует 1. Таким образом, маска – это, по сути, логическое произведение аргументов. Наличие лишних, не входящих в маску аргументов допустимо. Маска может иметь вид $SC2 \cdot CS11 \cdot ABG$. Это означает, что триггер будет отбирать только те события, в которых одновременно сработали два *СИ* (SC2), хотя бы одна супербашня в левой части CsI-калориметра (CS11) и при этом не было срабатываний, ближайших к пучку кристаллов CsI (ABG).

Результаты сравнения аргументов с масками объединяются по *ИЛИ*, т.е. можно сказать, что маски образуют логическую сумму. Эта сумма называется формулой п.т. В настоящий момент при наборе статистики от пучков используется формула:

$$B1 \cdot B2 + SC2 + CS11 \cdot SC1 \cdot ABG + \\ + CS12 \cdot SC1 \cdot ABG + CS11 \cdot CS12 + \\ + LKR + RND + LM + SE \cdot CS11 + \\ + SE \cdot CS12 + SE \cdot SC1.$$

Для выработки положительного решения п.т. необходимо срабатывание хотя бы одного произведения (одной маски) в формуле.

Максимальное количество масок в п.т. равно 16. Они записываются в четыре блока масок (см. рис. 3), каждый из которых содержит четыре 16-разрядные схемы *И*. Входными являются сигналы с шины аргументов, выходными – 4 сигнала срабатывания масок. Задача блока – сравнить сработавшие аргументы п.т. с записанными масками. Сами маски записываются компьютером через интерфейс КАМАК и представляют собой 16-разрядное двоичное число, каждый бит которого соответствует определенному аргументу. Выходной сигнал появляется, если для каждого бита маски, равного 1, присутствует соответствующий аргумент на входе. Выходные сигналы передаются в блок решения.

5.6. Решение п.т.

Блок решения – финальный блок п.т., который принимает окончательное решение о выдаче сигнала “*ПТ*”. Он формируется, если в момент прихода строба есть хотя бы одна сработавшая маска из числа входящих в формулу п.т. Информация о срабатывании масок поступает через 4 входа, к которым подключаются кабели от блоков масок. Блок решения содержит регистр, который определяет, какие из масок участвуют в выработке решения п.т. Это позволяет формировать условие на п.т. с числом слагаемых от 0 до 16. При генерации решения по переднему фронту строба выдается импульс на выход “*Trigger*” и появляется постоянный сигнал на выходе “*Block*”, блокирующий входные каналы формирователей *СИ*, CsI, LKR и фиксирующий тем самым аргументы и сработавшие маски. В таком состоянии п.т. будет находиться до прихода сигнала сброса от *ССД* на вход “*Reset*” или до программного сброса через КАМАК.

Информация о срабатывании аргументов и масок п.т. передается в *ССД* “Клюква”, чтобы иметь возможность считывать эти данные вместе с информацией о событии. Эти данные передаются по кабелю из 32 витых пар (16 аргументов + 16 масок) и запоминаются в специальной *ИП*, которая называется “*Да/Нет*”-плата.

5.7. Стробирование п.т.

Временная привязка сигнала “*Trigger*” к моменту пролета частиц осуществляется с помощью стробирующего импульса, подаваемого на вход “*Strobe*” блока решения. Этот импульс должен появляться в момент уверенного присутствия аргументов (рис. 4). При работе с ВЭПП-4М стробирование п.т. осуществляется сигналом “*Фаза*” пучка, при работе с космическими частицами используется сигнал от *СИ*, а при проверках электронных трактов систем детектора – сигналы от генераторов. Сигнал “*Фаза*” пучка пропускается через блок регулируемой задержки, находящийся в аппаратном зале, что позволяет настраивать момент появления строба.

Начиная с 2004 г. ускоритель ВЭПП-4М может работать с двумя сгустками частиц. Поэтому частота столкновений пучков увеличилась в два раза, до 1.6 МГц. Однако сигнал “*Фаза*”, приходящий от ускорителя, имеет частоту, соответствующую одиночному пучку, т.е. ~800 кГц. Для работы с новым режимом ВЭПП-4М была разработана и изготовлена схема удвоения фазы. Для уменьшения джиттера сигнала “*Фаза*” п.т. дополнительно стробируется высокочастотным сигналом от системы управления ускорителем (182 МГц).

Стробирующий сигнал из аппаратного зала поступает на вход “*Phase*” блока аргументов,

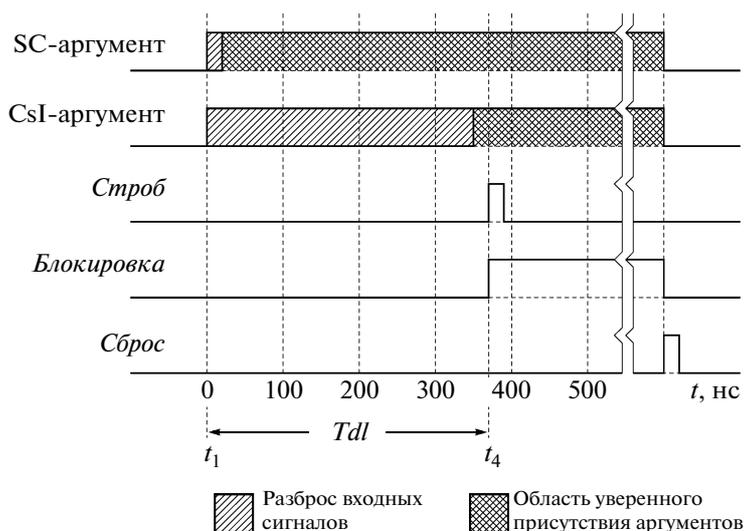


Рис. 4. Стробирование п.т.

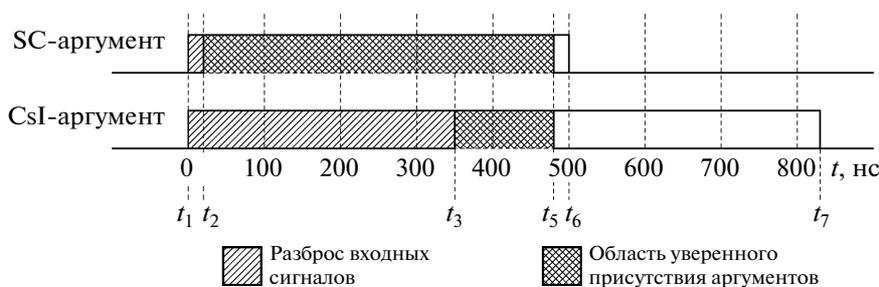


Рис. 5. Разброс входных сигналов п.т. и время появления аргументов.

внутри которого находится переключатель режима стробирования. При работе на космике для стробирования используются сигналы с формирователей *СЦ*. В качестве стробирующих можно выбирать сигналы *SCB*, *SCEL*, *SCER* по отдельности или любое их объединение по *ИЛИ*. При этом стробирующий импульс задерживается на 370 нс, что необходимо для того, чтобы дождаться формирования аргумента *CsI*, который может появиться в интервале 0–350 нс относительно *СЦ*. При работе с ВЭПП-4М строб проходит через регулируемую линию задержки 0–20 нс с дискретностью 1.2 нс (16 делений), которая используется для точной подстройки.

5.8. Временная диаграмма работы п.т.

За начало отсчета времени принимается момент прихода первых сигналов от *СЦ* в п.т. Из сигналов с дискриминаторов *СЦ*, *CsI* и *LKг* формируются аргументы п.т. (рис. 5). Области с одинарной штриховкой соответствуют разбросу фронтов сигналов по времени. Для *СЦ* этот разброс небольшой, ~20 нс ($t_2 - t_1$), для *CsI* — сравнительно

велик, ~350 нс ($t_3 - t_1$). Принятие решения происходит в момент t_4 , когда все аргументы, отвечающие данному событию, заведомо присутствуют и заданные маски сработали. Область уверенного присутствия аргументов показана двойной штриховкой. Стробирование при работе с ВЭПП-4М производится сигналом фазы пучка, задержанным на необходимое время, а при работе с космикой — сигналом от *СЦ*, задержанным на время Tdl (рис. 4). Если условия для решения п.т. выполнены, то по стробу выдается импульс “*ПТ*”, запускающий в.т., оцифровку амплитуд и времен в *ИП ССД* “*Клюква*”. Одновременно вырабатывается сигнал “*Блокировка*” п.т. В таком состоянии п.т. находится до прихода импульса “*Сброс*” от *ССД*. Если условия на срабатывание п.т. не выполняются, то аргументы сбрасываются через 470 нс с момента их появления (t_5, t_6, t_7).

6. ВТОРИЧНЫЙ ТРИГГЕР

Вторичный триггер располагается в аппаратном зале *КЕДР*, где сосредоточена вся оцифровывающая электроника детектора. Он занимает пять

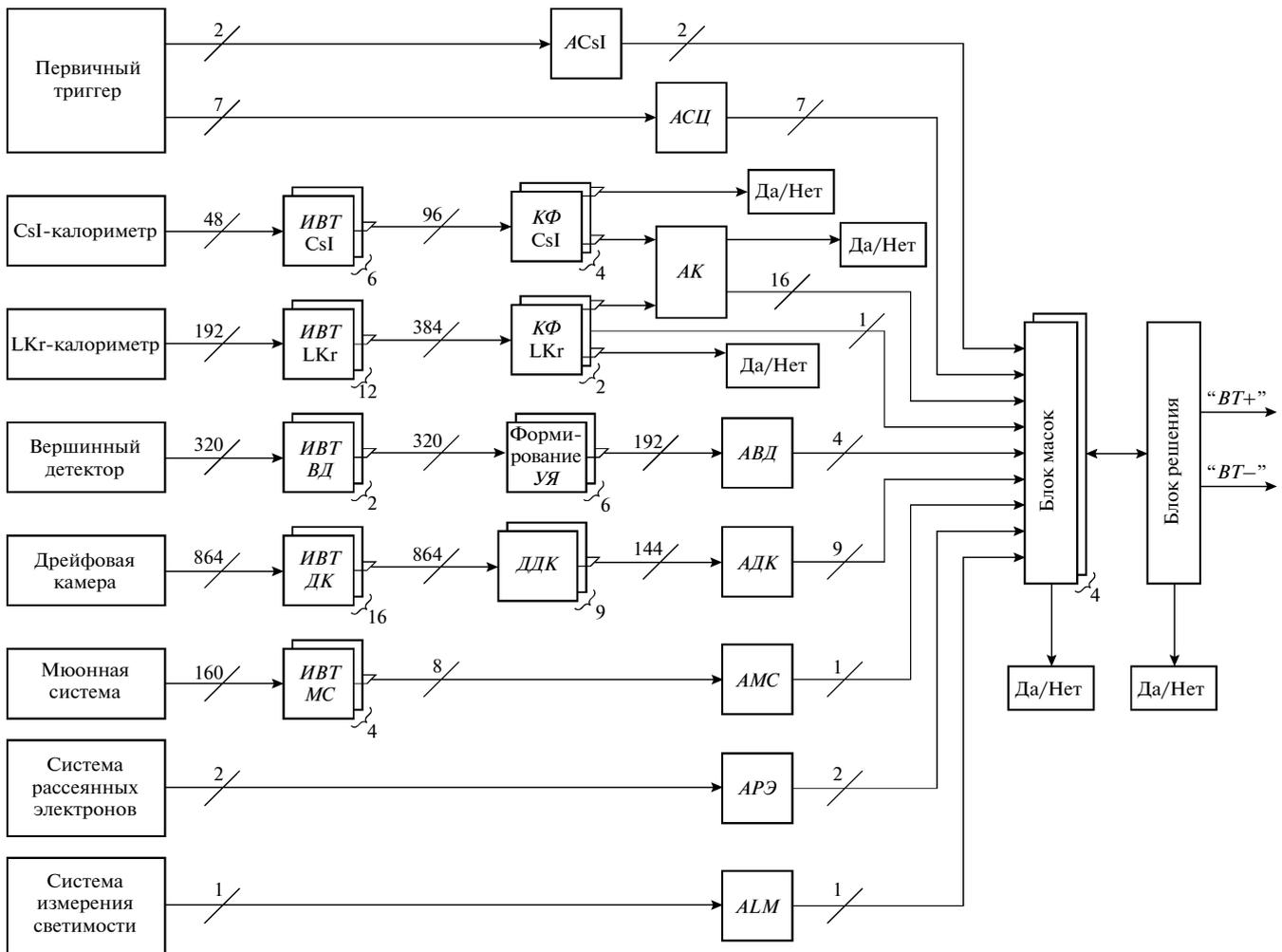


Рис. 6. Блок-схема вторичного триггера.

крейтов КАМАК, и еще несколько десятков интерфейсных блоков распределены по крейтам “Клюква”. Вторичный триггер получает сигналы от всех подсистем КЕДР, за исключением аэрогелевых черенковских счетчиков. Блок-схема в.т. изображена на рис. 6.

6.1. Вершинный детектор в в.т.

Вершинный детектор (ВД) состоит из 312 дрейфовых трубок [12]. Они образуют 6 слоев, окружающих место встречи. Из них для в.т. формируются 192 универсальные ячейки (УЯ), собранные в 3 суперслоя.

Оцифровывающая электроника ВД занимает два крейта “Клюква”, в каждом из которых находится по 10 ИП. Интерфейсы в.т. (ИВТ) для ВД (далее ИВД) получают по 16 бит данных от каждой ИП. Таким образом, каждый ИВД сохраняет и передает в в.т. 160 бит информации.

Эти 320 сигналов ЭСЛ-уровня поступают на устройство, которое группирует сигналы от дрейфовых трубок и формирует УЯ. Далее эти сигналы подаются на блок аргументов вершинного детектора (АВД), который определяет количество несмежных УЯ в каждом суперслое ВД. Затем вычисляется полная сумма, и при помощи мажоритарной логики вырабатываются аргументы VD2, VD3, VD4 и VD5, которые означают, что в ВД сработало не менее 2-х, 3-х, 4-х или 5-ти УЯ соответственно.

6.2. Дрейфовая камера в в.т.

Дрейфовая камера (ДК) [13] окружает ВД и состоит из 7 слоев дрейфовых ячеек. Каждая дрейфовая ячейка содержит 6 сигнальных проводочек [14]. Оцифровывающая электроника ДК занимает 23 крейта “Клюква”. В 16-ти из них установлены ИВТ для ДК (далее ИДК), чтобы передавать позиционный код о сработавших проводочках в триггер. Эти крейты относятся к первому, треть-

му, пятому и седьмому слоям *ДК*. В данный момент в.т. использует только три первых (1, 3, 5) слоя.

Для в.т. минимальным элементом *ДК* является ячейка, а не отдельная сигнальная проволочка. Считается, что ячейка сработала, если в ней сработали не менее двух проволочек. Девять блоков дискриминаторов дрейфовой камеры (*ДДК*) принимают 864 бита информации. Они считают количество сработавших проволочек в каждой ячейке *ДК* и сравнивают его с установленным порогом. На выход блоки *ДДК* выдают 144 сигнала о срабатывании ячеек *ДК*. Сигналы поступают на вход блока аргументов дрейфовой камеры (*АДК*), который определяет количество сработавших несмежных ячеек в каждом слое *ДК*. Несмежными считаются ячейки, если между ними есть хотя бы одна несработавшая. Далее мажоритарная логика вырабатывает аргументы DC11, DC12, DC13, DC21, DC22, DC23, DC31, DC32, DC33. Первая цифра в обозначении соответствует номеру слоя, а вторая — минимальному гарантированному числу сработавших несмежных ячеек. Например, аргумент DC22 означает, что во втором слое сработало не менее двух несмежных ячеек.

6.3. Сцинтилляционные счетчики в в.т.

Аргументы сцинтилляционных счетчиков в в.т. формирует блок аргументов *СЦ* (*АСЦ*). Всего предусмотрено 6 признаков события для этой системы. Сигналы для триггера от сцинтилляционных счетчиков формируются в блоках электроники, расположенных возле детектора. Для формирования аргументов используются промежуточные сигналы из п.т. Во-первых, это признаки числа сработавших каналов *СЦ*: SC2, SC3 и SC4, используемые как в самом первичном триггере, так и во вторичном. Формируются они в блоке аргументов в п.т. и передаются в в.т. в виде парафазных сигналов по кабелю, состоящему из витых пар. Вместе с этими сигналами передается также *ИЛИ* аргументов генераторов OrGEN, чтобы иметь возможность запускать от генераторов вторичный триггер.

Также в в.т. из п.т. передаются сигналы *ИЛИ* из блоков формирователей-сумматоров. Таких сигналов тоже три: *ИЛИ* левого (OrSCEL) и правого (OrSCER) торцов и *ИЛИ* счетчиков цилиндрической (баррельной) части (OrSCB). Они представляют собой импульсы длительностью ~20 нс.

Из сигналов *ИЛИ* сцинтилляторов формируются следующие аргументы в.т.:

— ASCB — признак того, что в течение 500 нс после момента встречи *не* сработал ни один сцинтилляционный счетчик в цилиндрической (баррельной) части, аргумент необходим для антисовпадения при срабатывании сигнала GEOM в цилиндрическом калориметре;

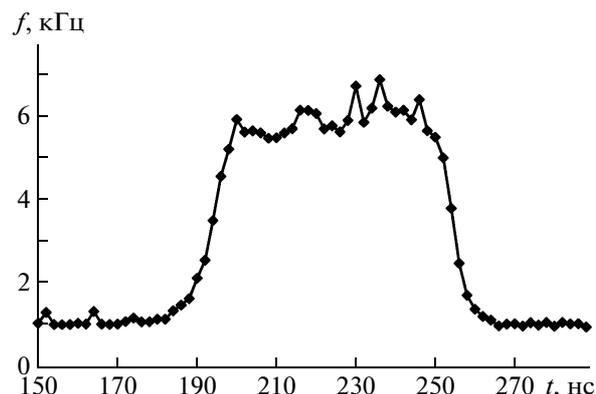


Рис. 7. Зависимость частоты срабатывания аргумента SC1F от задержки.

— ASCE — то же самое для торцевых счетчиков, признак того, что в течение 500 нс после момента встречи *не* сработал ни один сцинтилляционный счетчик в торце, аргумент необходим для антисовпадений при срабатывании торцевого калориметра;

— SC1F — признак совпадения сигналов *СЦ* с фазой пучка с разрешающим временем 60 нс; так как период между столкновениями пучков составляет 620 нс, то использование этого аргумента позволяет подавить космику более чем в 10 раз.

Для формирования аргумента SC1F импульсы OrSCEL, OrSCER и OrSCB объединяются по *ИЛИ* и образуют сигнал OrSC, который подается на схему совпадения, где сравнивается с сигналом “Фаза” пучка. Длительности импульсов OrSC и “Фаза” составляют ~35 нс, что с учетом необходимости перекрытия дает разрешающее время схемы совпадения 60 нс. В блоке *АСЦ* установлена программно управляемая линия задержки в цепи сигнала “Фаза” для подстраивания взаимного положения импульсов OrSC и “Фаза”. Регулировка осуществляется путем записи через КАМАК восьмимбитного числа. Диапазон изменения задержки сигнала “Фаза” составляет 512 нс, шаг подстройки — 2 нс.

Для проверки правильности настройки задержки написана программа с одноименным с аргументом названием SC1F. Компьютер записывает в блок *АСЦ* все возможные значения задержки по очереди и в течение заданного оператором времени считает количество срабатываний аргумента SC1F. Измеренные значения загрузки записываются в файл. По этим данным строится кривая задержанных совпадений (рис. 7). Искомым значением является середина пика на кривой. В данном случае значение задержки для аргумента SC1F равно 224 нс или 112 в отсчетах линии задержки. Это значение заносится в программу управления в.т. Такая процедура выполняется каждый раз после подстройки фазы триггера.

6.4. Торцевой CsI-калориметр в в.т.

Как описывалось выше, в торцевом калориметре отдельные кристаллы CsI объединены в супербашни (СБ). Всего имеется 48 СБ, по 24 в каждом торце. Электроника предварительных усилителей CsI-калориметра, расположенная возле детектора, выполнена в стандарте “Клюква”. Используются только конструкция и шина “Клюквы”, но не логика ее работы. Блоки дискриминаторов в.т. располагаются во второй позиции крейтов. Они называются ИВТ CsI, хотя не являются таковыми в полном смысле, так как получают не логическую, а аналоговую информацию, для чего были доработаны шины крейтов. В блок приходит от 4-х до 12-ти аналоговых сигналов (в зависимости от крейта). Каждый входной сигнал сравнивается с двумя порогами $П1$ и $П2$ ($П1 < П2$), которые задаются компьютером. При превышении порогов вырабатываются логические сигналы. Также в ИВТ CsI формируется аналоговая сумма сигналов, превышающих порог $П1$.

Частицы, появившиеся в результате столкновения пучков, порождают ливни частиц, от которых может срабатывать не одна, а несколько расположенных рядом СБ, которые называются кластерами. Подсчет количества кластеров гораздо точнее описывает событие, нежели просто количество сработавших СБ. Устройство, которое определяет количество кластеров на двумерной проекции детектора, называется кластерфайндером (КФ). От дискриминаторов ИВТ обоих торцов CsI-калориметра поступает по 48 логических сигналов при превышении порогов $П1$ и $П2$ на 4 блока КФ.

Кластерфайндер использует оригинальный алгоритм подсчета кластеров. Тестовый сигнал опрашивает поочередно все СБ. Если проверяемая ячейка является сработавшей, то счетчик количества кластеров инкрементируется, а СБ сбрасывается сама и отправляет сигнал сброса всем своим соседям. Если соседняя ячейка была сработавшей, то, получив сброс, она обнуляется сама и также раздает сигнал сброса всем своим соседям. Таким образом, если тестовый сигнал находит кластер сработавших СБ, то он инициирует волну сбросов, которые стирают его. При этом в счетчике количества кластеров добавится всего одна единица. Этот метод довольно медленный, так как тестировать следующую ячейку можно только после того, как гарантированно закончится волна сбросов. Поэтому скорость опроса не может быть очень высокой. Зато этот алгоритм дает абсолютно точный результат при подсчете количества кластеров. Время работы КФ CsI составляет 3.7 мкс. В результате работы четырех КФ получаются 4 числа, которые передаются в блок аргументов калориметров (АК).

6.5. Цилиндрический LKr-калориметр в в.т.

Во вторичный триггер, так же как и в первичный, от LKr-калориметра поступает 192 сигнала от СБ. Но, в отличие от импульсов для п.т., эти сигналы аналоговые и с большим временем формирования. Эти аналоговые сигналы передаются по кабелям в аппаратный зал КЕДР и поступают на платы Ф-32, содержащие RC-2CR-фильтры. Точно такие же формирователи используются для обработки сигналов в электронике LKr-калориметра [15]. Далее импульсы подаются на дискриминаторы с порогами $П1$ и $П2$ ($П1 < П2$), которые задаются компьютером. Результаты работы дискриминаторов передаются в КФ LKr. Также формируется аналоговая сумма сигналов, превышающих порог $П1$.

В в.т. есть два КФ LKr для порогов $П1$ и $П2$. Каждый из них получает 192 бита логической информации. Эти данные описывают срабатывание ячеек в цилиндре размером 8 ячеек в длину и 24 по окружности (рис. 8). Задача КФ состоит в подсчете количества кластеров в этом цилиндре. Используется тот же самый алгоритм, что и для КФ CsI. Для сокращения времени работы цилиндр разбивается на две части по ϕ , и два одинаковых устройства ведут подсчет числа пятен, каждый в своей половине. Сигналы сбросов соседних ячеек проходят из одной половины цилиндра в другую. После опроса всех ячеек суммы кластеров из разных полуцилиндров складываются, и результат подается на выход. Время работы КФ LKr составляет 4.3 мкс. Результаты от двух КФ передаются в АК.

Для проверки правильности работы КФ LKr было промоделировано несколько десятков миллионов событий в калориметре. Для них вычислили на компьютере количество кластеров и сравнили с тем, что выдает КФ. Ошибки оказались на уровне 10^{-7} , и в основном это проявлялось на кластерах, состоящих из длинных цепочек сработавших СБ, которые топологически являются одной группой, но КФ посчитал их как два. Это происходит из-за того, что на длинных цепочках СБ определенной формы (в виде подковы) волна сбросов не успевает пробежать по всем ячейкам, и КФ считает кластер дважды. Если рассматривать эти группы с физической точки зрения, то КФ дает более правильный ответ, так как такие цепочки образуются из-за слияния близких ливней.

Также в КФ вычисляется аргумент GEOM. Цилиндр 8×24 ячеек при помощи 8-входовых элементов ИЛИ преобразуется в кольцо с 24-мя ячейками. Если в любом угле 240° по ϕ есть хотя бы одна сработавшая ячейка, то аргумент GEOM становится равным 1.

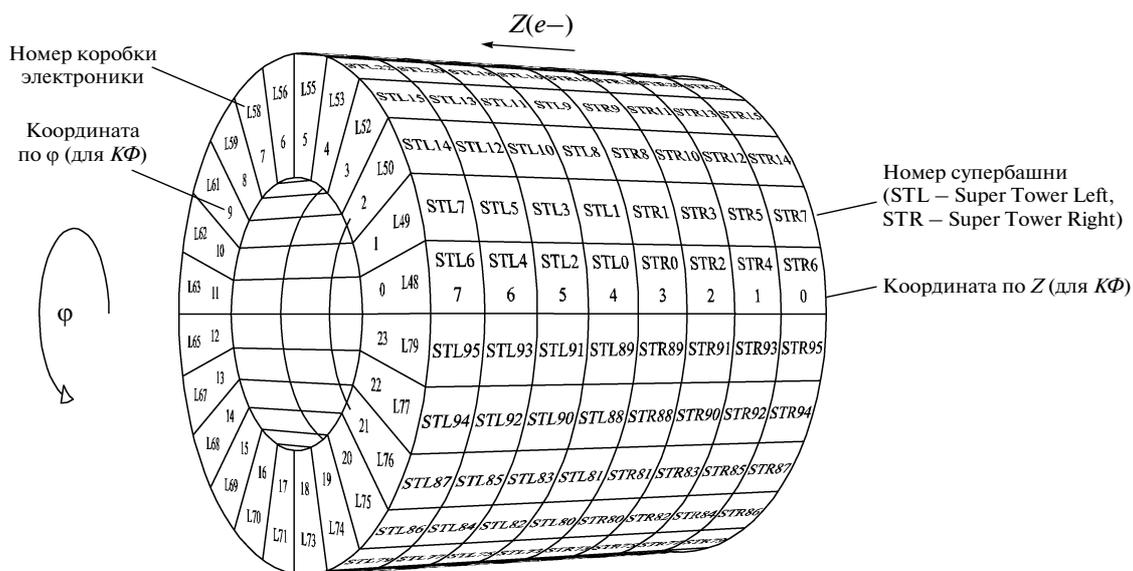


Рис. 8. Супербашни LKr-калориметра в триггере.

6.6. Аргументы калориметров

Шесть чисел, которые являются суммами пяти от четырех $K\Phi$ CsI и двух $K\Phi$ LKr, поступают в АК. Здесь из них получают суммы количества кластеров отдельно в торцевом калориметре и в обоих калориметрах вместе для каждого из порогов. Далее из полученной информации формируются аргументы: ST11, ST12, ST13, ST14, SE11, SE12, SB11, SB12, ST21, SE21, SB21, ST22, SB22. Вторая буква в названии этих аргументов указывает на систему: Т – весь калориметр, Е – только торцевой, В – только цилиндрический. Первая цифра – это порог $П1$ или $П2$, вторая – количество кластеров. Еще один аргумент STEE появляется, если в обоих торцах есть $СБ$ с порогом $П2$.

6.7. Мюонная система в в.т.

Мюонная система (МС) детектора КЕДР [16] состоит из трех слоев стриммерных трубок, окружающих ярмо сверхпроводящего магнита. Между слоями установлен поглотитель из железа. Вся мюонная система разбита на 8 октантов [17]. Для в.т. используются данные только от первого слоя. При помощи четырех ИВТ для МС (далее ИМС) данные о срабатывании октантов первого слоя передаются в блок аргументов МС (АМС). Здесь есть возможность при помощи цифровой маски управлять октантами, которые будут формировать аргумент МС. Сам аргумент – это логическое ИЛИ разрешенных октантов.

6.8. Система регистрации рассеянных электронов в в.т.

Система регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) [18] состоит из двух одинаковых подсистем и расположена вне детектора КЕДР, с обеих сторон от места встречи [19]. Во вторичном триггере используется два аргумента от СРРЭ – SE1 и SE2. Первый появляется, если сработал хотя бы один сцинтилляционный счетчик с любой стороны, а второй – если сработали счетчики с обеих сторон.

6.9. Система измерения светимости в в.т.

Система измерения светимости [2] передает в в.т. только один аргумент – LM. Это логическое ИЛИ сигналов сцинтилляционных счетчиков от левой и правой частей монитора светимости.

6.10. Сравнение аргументов и масок

Вторичный триггер имеет 64 аргумента, которые формируются соответствующими блоками. В настоящий момент из них используется 43, остальные зарезервированы для будущего использования. Количество масок, заложенных в электронику в.т., равно 48, но в данный момент для сокращения времени работы проверяется только 39 из них. Маски записываются при помощи компьютера в четыре блока масок (БМ), каждый из которых обрабатывает 16 аргументов. Маски сравниваются с аргументами последовательно по команде от главного блока в.т. – блока решения (БР). БР передает в БМ номер проверяемой в данный момент маски и в ответ получает 4 бита результата сравнения. Время одного цикла проверки состав-

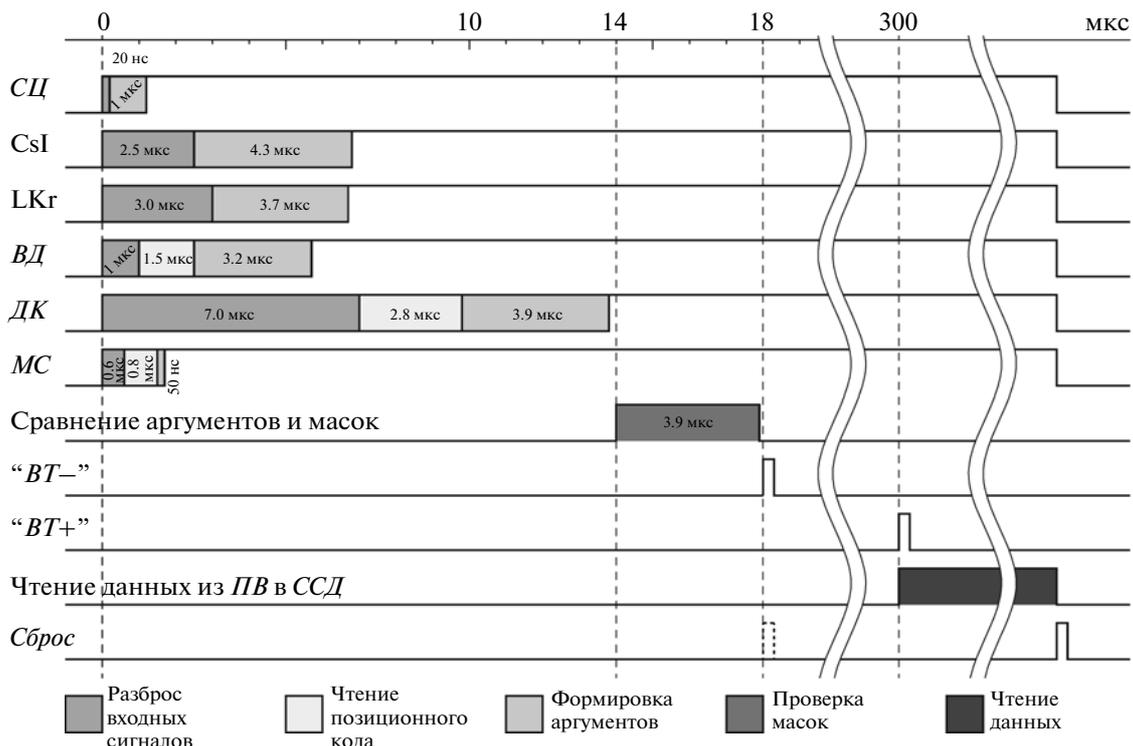


Рис. 9. Временная диаграмма вторичного триггера.

ляет 100 нс и полное время соответственно – 3.9 мкс. Если хотя бы одна маска совпала с аргументами, то БР формирует сигнал “BT+” и передает его в ЦСУ. По сигналу “BT+” ССД начинает чтение ИП. Для того чтобы все ИП успели закончить измерение времен и амплитуд, положительное решение в.т. задерживается на 300 мкс (рис. 9). Если же по окончании цикла сравнения масок и аргументов БР не находит ни одного совпадения, то он выдает решение “BT–”, по которому ЦСУ генерирует сигнал “Сброс”. Время работы в.т. до появления сигнала “BT–” составляет 18 мкс и является его мертвым временем. Именно оно определяет просчеты в.т., которые оцениваются как произведение частоты срабатывания п.т. на мертвое время в.т. При нагрузке п.т. 3 кГц просчеты в.т. равны 5.4%, что является приемлемым для эксперимента.

6.11. Передача битовой информации в ССД

В процессе работы в.т. формирует большое количество промежуточной информации, которую необходимо считывать вместе с событием. Эти данные нужны для проверки работы самого триггера, электроники детекторов, поставляющей сигналы, и для измерения частоты срабатывания каналов. Для этого в ССД “Клюква” существует два вида ИП, которые называются “Да/Нет”-платы. Они получают логическую информацию и запо-

минают ее в регистрах, чтобы потом передать ее в процессор вывода ПВ. Никакой обработки поступающих данных “Да/Нет”-платы не производят. Первый вид “Да/Нет”-плат получает 32 бита данных параллельно в ЭСЛ-уровнях через разъем на передней панели и запоминает их по сигналу “Блокировка” с шины “Клюква”. Второй вид плат оборудован двумя каналами последовательной передачи данных и принимает 256 бит информации. Передача ведется по экранированной витой паре парафазными сигналами LVDS-уровня на частоте 1 МГц. Время передачи пакета занимает 173 мкс с учетом стартовых, стоповых битов и битов четности для каждого байта. Это время с запасом укладывается во время оцифровки в ИП, и поэтому не задерживает ССД. В в.т. битовую информацию в ССД “Клюква” передают несколько блоков:

- БМ – 64 аргумента (две “Да/Нет”-платы первого вида);
- БР – 48 масок (две платы первого вида);
- АК – суммы пятен из шести КФ (одна плата первого вида);
- КФ LKг – 384 бита о срабатывании СБ с порогами П1 и П2 (две платы второго вида);
- КФ CsI – 96 бит о срабатывании СБ с порогами П1 и П2 (две платы второго вида).

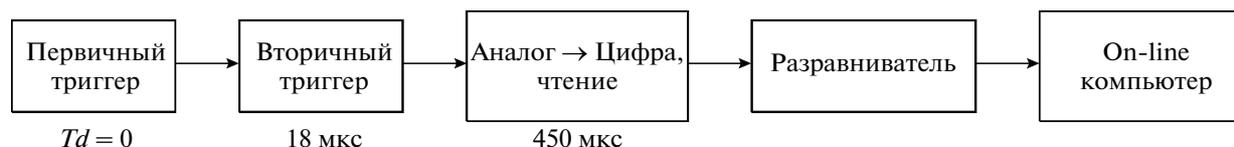


Рис. 10. Мертвые времена триггера и ССД.

7. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТБОРА СОБЫТИЙ

На рис. 10 показаны мертвые времена триггеров и ССД “Клюква”. Время работы п.т. детектора КЕДР меньше периода столкновения пучков, поэтому он обрабатывает каждое пучковое событие и не имеет мертвого времени. Его вклад в потери событий, возникающие из-за мертвого времени (так называемые просчеты), равен нулю.

Величина просчетов ССД детектора КЕДР вычисляется по формуле:

$$L_{\text{оссы}} = \tau_{\text{вт}} \cdot F_{\text{пт}} + \tau_{\text{АЦП}} \cdot F_{\text{вт}},$$

где $F_{\text{пт}}$ и $F_{\text{вт}}$ — частоты срабатывания п.т. и в.т. соответственно, $\tau_{\text{вт}}$ — мертвое время в.т., а $\tau_{\text{АЦП}}$ — мертвое время ИП, в которое входит время оцифровки и чтения информации в ПВ. Загрузки п.т. и в.т. при фиксированных формулах зависят от энергии, токов пучков и фоновой ситуации на ускорителе. В ходе сканирования ψ' - и ψ'' -загрузка детектора от фоновых событий равнялась 50 кГц. При этом средние частоты срабатывания п.т. и в.т. составляли 3.5 кГц и 50 Гц соответственно. Это означает, что две ступени триггеров подавляли фон в 1000 раз. При этом просчеты в.т. равны 6.3%, просчеты ССД “Клюква” — 2.25%. Таким образом, общие потери ССД равны 8.55%, а к.п.д. — 91.45%.

Эффективность выделения полезных событий триггером зависит от типа события. Для изучаемых на детекторе КЕДР физических процессов она составила 98–99%.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первичный и вторичный триггеры работают в составе системы сбора данных детектора КЕДР начиная с 2000 г. В ходе экспериментов триггер детектора КЕДР показал высокую надежность. При средних фоновых загрузках просчеты составляли 6%. При этом обеспечено подавление фоновых загрузок на три порядка при к.п.д. работы системы сбора данных более 90%. Эффективность отбора полезных событий составила 98–99% в зависимости от типа события.

С детектором КЕДР к настоящему времени получен целый ряд результатов мирового уровня. В частности, с высокой точностью были измерены массы ряда элементарных частиц с помощью метода резонансной деполяризации для абсолютной калибровки энергии пучков. Относительная точность измерения достигла $4 \cdot 10^{-6}$ для J/ψ и $7 \cdot 10^{-6}$

для ψ'' , что примерно в 3 раза превосходит точность лучших предшествующих экспериментов. Точность измерения массы для $\psi(3770)$ -мезона примерно в 2 раза лучше среднемирового значения. Проведен эксперимент по измерению массы τ -лептона. Полученные результаты находятся в хорошем согласии со среднемировым значением и имеют лучшую точность. Эксперименты по измерению масс D^0 -мезона дали результаты, сравнимые по точности с лучшим мировым значением, а для D^+ -мезона получена лучшая точность.

В настоящее время с детектором КЕДР ведутся эксперименты по измерению полного сечения $e^+e^- \rightarrow$ адроны в диапазоне энергий $2E = 2-5$ ГэВ, а также исследования двухфотонных процессов.

Автор выражает благодарности Ю.А. Тихонову и Д.Н. Григорьеву за обсуждение и конструктивные советы в процессе подготовки статьи, Е.М. Балдину за вычисление параметров событий, а также всем участникам эксперимента КЕДР, которые помогали совершенствовать структуру триггера и улучшать его работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anashin V.V., Anchugov O.V., Bondar A.E. et al. // Proc. of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC 98). Stockholm, Sweden. 22–26 June. 1998. V. 1. P. 400.
2. Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baibusinov B.O. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A478. P. 420.
3. Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M. et al. // Nucl. Physics B (Proc. Suppl.). 2008. V. 181–182. P. 353.
4. Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M. et al. // Phys. Letters B. 2010. V. 686. P. 84.
5. Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M. et al. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2007. V. 169. P. 125.
6. Aulchenko V.M., Baru S.E., Savinov G.A. // Proc. of the intern. symp. on coordinate detectors for high energy physics. Dubna: JINR, 1988. P. 371.
7. Бару С.Е., Кириченко В.С., Савинов Г.А. и др. Препринт ИЯФ 88-26. Новосибирск, 1988.
8. Aulchenko V.M., Baibusinov B.O., Baru S.E. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A409. P. 639.
9. Aulchenko V.M., Baibusinov B.O., Baldin E.M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A379. P. 502.
10. Шварц Б.А. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЯФ СОРАН, 2004.

11. *Aulchenko V.M., Barladyan A.K., Bondar A.E. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A379. P. 475.
12. *Aulchenko V.M., Chilingarov A.G., Kolachev G.M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1989. V. A283. P. 528.
13. *Baru S.E., Blinov V.E., Groshev V.R. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A409. P. 23.
14. *Baru S.E., Blinov V.E., Groshev V.R. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A494. P. 251.
15. *Аульченко В.М., Кузнецов С.Г., Усов Ю.В.* Препринт ИЯФ 98-13. Новосибирск, 1998.
16. *Aulchenko V.M., Baibusinov B.O., Chilingarov A.G. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1988. V. A265. P. 137.
17. *Аульченко В.М., Бондарев Д.В., Бондарь А.Е. и др.* Препринт ИЯФ 2000-48. Новосибирск, 2000.
18. *Aulchenko V.M., Baibusinov B.O., Baru S.E. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A379. P. 360.
19. *Аульченко В.М., Baibusinov B.O., Baru S.E. и др.* Препринт ИЯФ 91-49. Новосибирск, 1991.