

УДК 539.1.075

DOI 10.25205/2541-9447-2017-12-4-5-13

Л. Б. Эпштейн¹⁻³, Р. Р. Ахметшин^{1,3}, Д. Н. Григорьев¹⁻³, В. Ф. Казанин^{1,3},
А. С. Мельник⁴, Д. В. Шелковый⁴, Ю. В. Юдин^{1,3}

¹ Институт ядерной физики СО РАН
пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Институт физики НАН РБ
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Республика Беларусь

L.B.Epshteyn@inp.nsk.su

АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ЭКСПЕРИМЕНТА СОМЕТ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ *

Описывается алгоритм анализа данных калориметра эксперимента СОМЕТ в режиме реального времени. Для обеспечения стабильной работы системы считывания информации детектора необходимо принять решение о ее запуске на основе информации с калориметра. При этом требуется обеспечить энергетическое разрешение в режиме реального времени не хуже 5 %. На основе результатов моделирования был разработан и оптимизирован алгоритм обработки сигналов для оперативного определения энергии, выделяемой частицами, попадающими в калориметр, на основе оцифровки сигналов и их анализе в программируемой логике в режиме бегущей волны. Предложенный алгоритм проверен моделированием методом Монте-Карло, стендовыми измерениями и экспериментами на пучке электронов. Полученные результаты удовлетворяют требованиям эксперимента.

Ключевые слова: триггерная система, калориметр, эксперимент СОМЕТ.

Эксперимент СОМЕТ

В экспериментах на Большом Адронном Коллайдере открыта последняя недостающая частица Стандартной Модели – бозон Хиггса. В то же время не обнаружено ни одной частицы, выходящей за рамки Стандартной Модели, более того все результаты хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной Модели. Поэтому на передний план

выходят высокоточные эксперименты по поиску новой физики в запрещенных в Стандартной Модели процессах.

Ярким примером таких экспериментов является СОМЕТ. Основной задачей эксперимента СОМЕТ [1–4] является поиск когерентной конверсии мюона в электрон в области ядра без излучения нейтрино, с чувствительностью одного события (SES) $\sim 3 \times 10^{-17}$, которая превосходит результаты

* Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 17-02-01073.

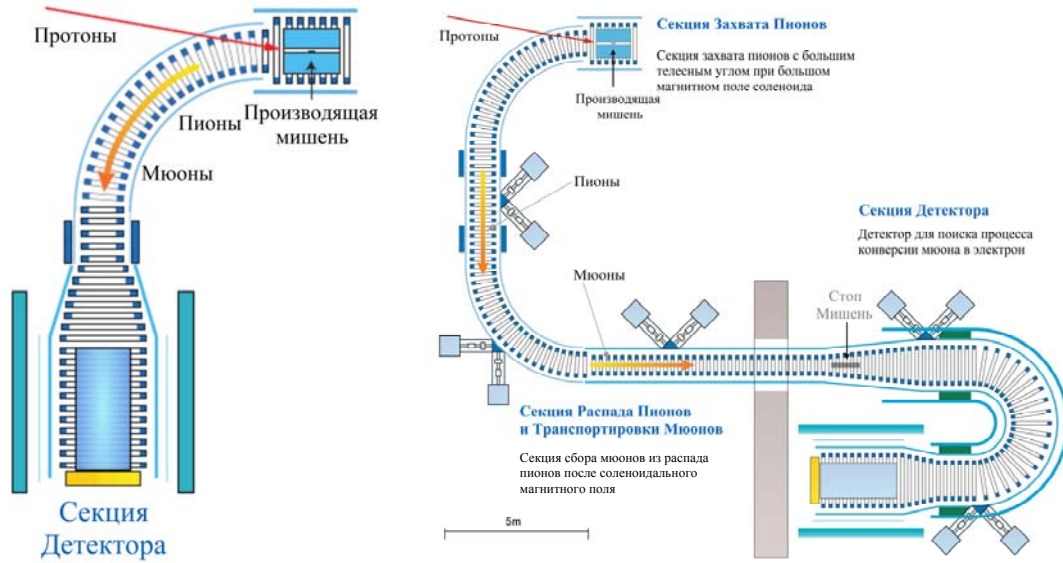


Рис. 1. Этапы эксперимента COMET (слева изображена структура этапа I, справа – структура этапа II)

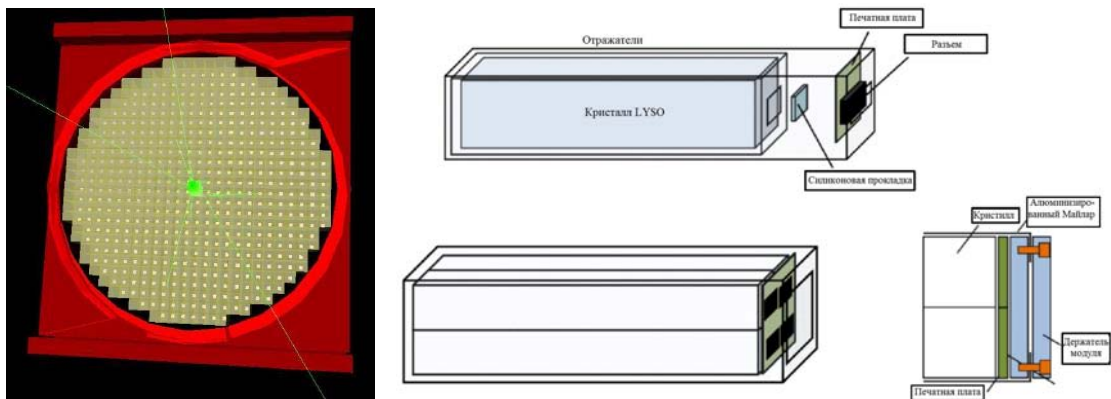


Рис. 2. Схематическое изображение электромагнитного калориметра (слева); один кристалл LYSO с фотодиодом и крепежной платкой (справа сверху), Структура модуля из 2×2 LYSO кристаллов (справа внизу)

лучшего предыдущего эксперимента SIN-DRUM-2 [5] на 4 порядка. В Стандартной Модели этот безнейтринный процесс имеет бесконечно малую величину $O(10^{-50})$. Таким образом, открытие этого процесса является прямым свидетельством обнаружения новой физики. Отрицательный результат приведет к серьезным ограничениям для многих современных теоретических моделей, которые предсказывают на порядки более высокую вероятность данного процесса. Поэтому даже отрицательные результаты экспериментов будут иметь большое значение для развития теоретической физики. А обнаружение искомого процесса получит в миро-

вом физическом сообществе резонанс, сравнимый с удостоенным Нобелевской премии открытием осцилляций нейтрино.

Эксперимент COMET проводится на ускорителе протонов с рекордной интенсивностью в J-PARC в Японии. В связи со сложностью эксперимента принято решение разделить эксперимент на два этапа (рис. 1). На первом этапе будет использоваться только один соленоид с поворотом на 90° . Физическая задача этого этапа – достичь чувствительности 3×10^{-15} с детектором на основе цилиндрической дрейфовой камеры, а также измерение фонов с частью детектора на основе дрейфовых трубок и сцинтилляцион-

ных кристаллов, необходимых для разработки второго этапа, так как эти данные отсутствуют. На втором этапе будет использоваться полномасштабная транспортная линия соленоидов с поворотом на 360° .

Искомый процесс $\mu N \rightarrow e N$ является фактически двухчастичным, в котором энергия сигнальных электронов фиксирована. Она составляет примерно 105 МэВ в зависимости от материала мишени. В данном эксперименте используется алюминиевая мишень: $E_e = (m_\mu - m_e - E_{\text{связи}}) = 104,97$ МэВ. Распад мюона в связанном состоянии с ядром DIO (Decay In Orbit) $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ является неустраняемым физическим фоном. При анализе данных сигнальный и фоновый процессы будут разделяться по измерению импульса в координатной системе. Основной задачей калориметра является выработка сигнала запуска детектора, а главным аргументом для этого – энергия электронов. Для обеспечения допустимой частоты запуска детектора разрешение в режиме реального времени должно быть не хуже 5 %. При этом алгоритм анализа данных должен учитывать как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и в 10^{15} раз большую фоновую загрузку, т. е. оперировать компактными группами кристаллов.

Технически процедура обработки сигналов в режиме реального времени и выработка сигнала запуска детектора реализуются в Системе Первичного Триггера калориметра.

Электромагнитный калориметр

Электромагнитный калориметр – это часть детектора, основанная на сцинтилляционных кристаллах LYSO [6]. Калориметр покрывает область радиусом 50 см, как показано на рис. 2 слева. Кристаллический калориметр расположен после координатной системы по направлению движения части. Основная задача калориметра – выработка сигнала запуска для сигнальных событий и подавление запусков от фоновых событий. Для обеспечения допустимой частоты запусков от фоновых событий энергетическое разрешение калориметра должно быть лучше 5 % при энергии 105 МэВ. Дополнительными задачами калориметра являются выработка затравочных данных для поиска траекторий частиц в координатной системе

и подавление фоновых событий от других типов частиц по соотношению выделенной энергии к импульсу.

Высокая сегментация требуется для уменьшения вклада от наложения фоновых событий наложения, а также для обеспечения достаточного пространственного разрешения при поиске треков. Калориметр состоит из кристаллов сечением 2×2 см² и длиной 12 см, что соответствует 10,5 радиационных длин. Для покрытия области детектора радиусом 50 см необходимо 1,920 кристаллов LYSO. Основным конструктивным элементом калориметра являются модули 2×2 кристалла (см. рис. 2). Так как энерговыделение распределяется между несколькими кристаллами, то для уменьшения объема информации в системе запуска произведено аналоговое суммирование по 2×2 кристаллов модуля и данный сигнал является базовой единицей («триггерной ячейкой»).

Моделирование алгоритма Системы Первичного Триггера калориметра

Триггерная система (ТС) электромагнитного калориметра должна иметь как можно более высокое энергетическое разрешение на этапе онлайн реконструкции энергии, для запуска записи событий от частиц с энергией в пределах выбранного диапазона порогов. В условиях высокой загрузки ТС также должна эффективно отсеивать фоновые события с целью снижения интенсивности потока экспериментальных данных до приемлемого уровня, сохраняя при этом высокую эффективность триггера (ТЕ) к полезным событиям на уровне не ниже 90 %.

Как отмечено ранее, в условиях сверхвысокой интенсивности остановок мюонов в мишени распад мюона в связанном состоянии с ядром является основным источником фона при поиске процесса $\mu \rightarrow e$ конверсии. Большинство таких распадов дают высокоэнергетические электроны, вылетающие из мишени. Поскольку DIO электроны происходят от остановок мюонов, их распределение по времени совпадает с распределением по времени потенциального конверсионного электрона. Детальное теоретическое описание энергетического спектра электронов от DIO распада мюонов, захваченных в алюминии (материал мюонной стоп-мишени

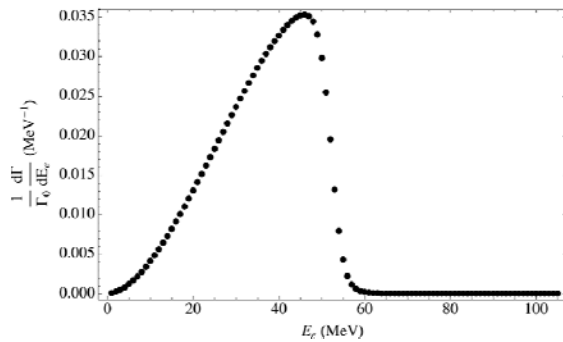


Рис. 3. Энергетический спектр электронов от DIO распада мюонов в алюминии

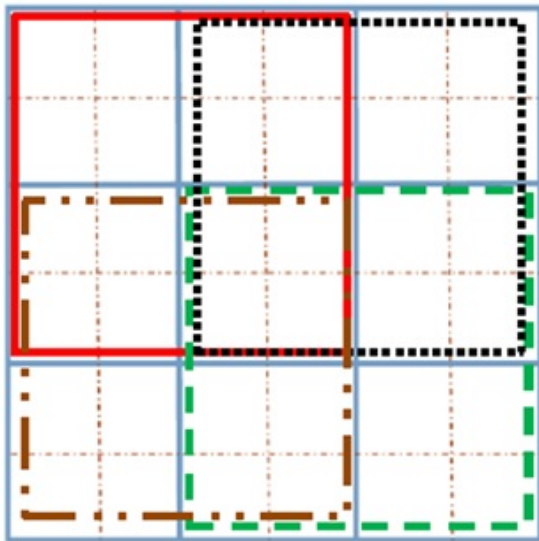


Рис. 4. Суммирование по всем возможным комбинациям 2×2 триггерных ячеек

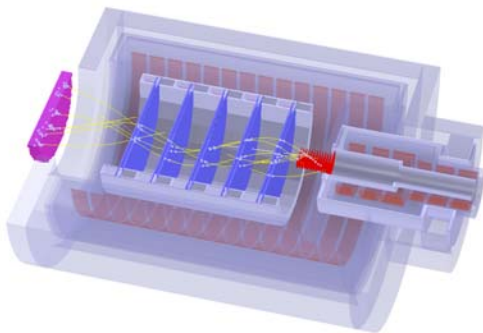


Рис. 5. Иллюстрация моделирования в ICEDUST

эксперимента COMET), приведено в работе [7] и показано на рис. 3.

Из рис. 3 и того факта, что максимальная энергия электрона в распаде свободного

мюона равна 52,8 МэВ, вытекает необходимость получить триггер с высокой пороговой энергией, желательно выше 60 МэВ. В этом случае триггер будет пропускать небольшую долю DIO событий. Варьируя величину порога на запуск триггера, необходимо обеспечить компромисс между загрузкой триггера, приемлемой для записи на диск, и его высокой эффективностью к полезным событиям.

При энергиях около 100 МэВ электромагнитный ливень, вызванный попадающей частицей, будет распределяться по многим кристаллам калориметра. Для восстановления полной энергии входящих в калориметр частиц необходимо суммировать энерговыделение по нескольким кристаллам, смежным с кристаллом с максимальным энерговыделением. Для энергетической реконструкции в режиме реального времени доступны только сигналы триггерных ячеек. Работа ТС основана на простом алгоритме, который запускает триггер при превышении минимального энергетического порога на энерговыделение в кластере. Поэтому важно выбрать оптимальное количество триггерных ячеек, которые должны быть отнесены к одному кластеру для суммирования энергии и удовлетворять вышеперечисленным требованиям.

Для построения оптимального алгоритма кластеризации было проведено моделирование методом Монте-Карло.

В моделировании сравнивалось три размера кластера (см. [8]):

- 1×1 триггерных ячеек, соответствующий 2×2 кристаллам (включает 1 модуль калориметра);
- 2×2 триггерных ячеек, соответствующий 4×4 кристаллам (включает 4 модуля калориметра)
- 3×3 триггерных ячеек, соответствующий 6×6 кристаллам (включает 9 модулей калориметра).

В случае с кластером 1×1, триггерная ячейка с максимальным энерговыделением принималась за кластер. Для случая с размером кластера 2×2, кластер искался следующим образом: сначала происходило суммирование по всем возможным комбинациям триггерных ячеек размером 2×2, как показано на рис. 4. Затем искалась максимальная триггерная сумма, которая в итоге и принималась за сработавший кластер.

В случае с размером кластера 3×3 триггерные ячейки поиск кластера происходил аналогично случаю 2×2 с единственной разницей в том, что суммирование происходило по всем возможным комбинациям 3×3 триггерные ячейки.

Моделирование было выполнено с использованием официального инструментария эксперимента COMET – ICEDUST (Integrated Comet Experimental Data User Software Toolkit) [4]. SimG4 центральный пакет моделирования ICEDUST основан на GEANT4 [9] и включает в себя полную геометрию эксперимента COMET. Был смоделирован один миллион электронных событий из мюонной стоп-мишени с энергией 105 МэВ/с и изотропным распределением направления движения (рис. 5).

На рис. 6 показано распределение энерговыделения для каждого размера кластера. Также проводилось моделирование эффективности запуска в зависимости от порога, налагаемого на восстановленную энергию для каждого размера кластера (рис. 7). Эффективность триггера определялась как доля сигнальных событий с энергией выше выбранного порога срабатывания. Из рис. 6 и 7 следует, во-первых, что для размера кластера 1×1 спектр энерговыделения очень широкий. Это означает, что энергетическое разрешение данного кластера будет недопустимо большим (больше 5 %).

Во-вторых, эффективность триггера в 90 % при сигнальных событиях соответствует порогу примерно 46 МэВ для одиночной триггерной ячейки, 78 МэВ для кластера 2×2 триггерных ячеек и 80,5 МэВ для 3×3 триггерных ячеек. Обращаясь к рис. 3, стоит отметить, что величина порога 46 МэВ, соответствующая 90 % эффективности триггера на основе одиночной триггерной ячейки, находится в области пика энергетического распределения электронов от DIO распада мюонов в алюминии, следовательно, ТС будет иметь большую фоновую загрузку. Использование кластера из 2×2 или 3×3 триггерных ячеек решают эту проблему, так как в случае 90 % эффективности ТС пороговая энергия находится в области логарифмического «хвоста».

Для количественного подтверждения проведено моделирование отклика ТС на поток DIO электронов, сгенерированных согласно энергетическому распределению, представленному на рис. 3, с целью оценки коэффи-

циента подавления потока DIO электронов в зависимости от ТЕ. Результаты моделирования для кластера 2×2 триггерных ячеек и одиночной триггерной ячейки приведены на рис. 8.

Как видно из рис. 8 при 90 % эффективности триггера, на основе единичной триггерной ячейки коэффициент подавления потока равен 50. В то время как при 90–93 % эффективности триггера на основе кластера 2×2 триггерных ячеек поток DIO электронов уменьшается на 6 порядков, т. е. обеспечивает нужный компромисс между загрузкой триггера и его высокой эффективностью к сигнальным событиям.

Исходя из сказанного, кластер размером 1×1 не может использоваться для предварительной триггерной системы калориметра и не учитывался при дальнейшей симуляции.

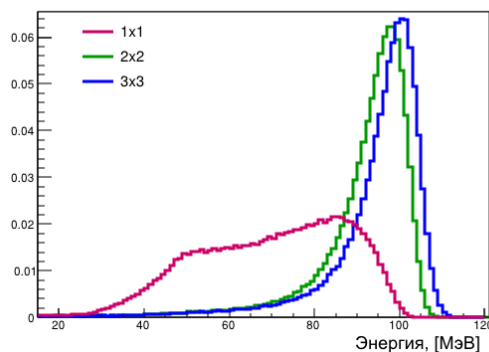


Рис. 6. Спектр энерговыделения в кластерах 3-х разных размеров

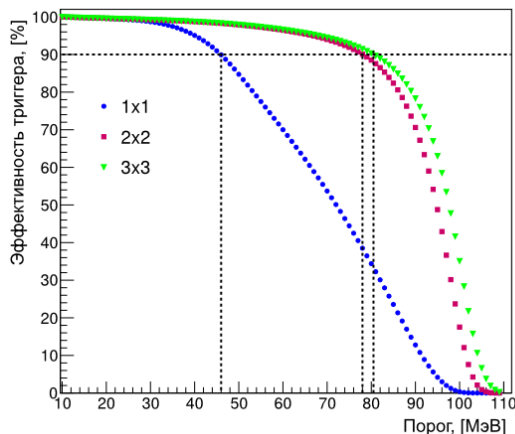


Рис. 7. Поведение эффективности запуска в зависимости от порога

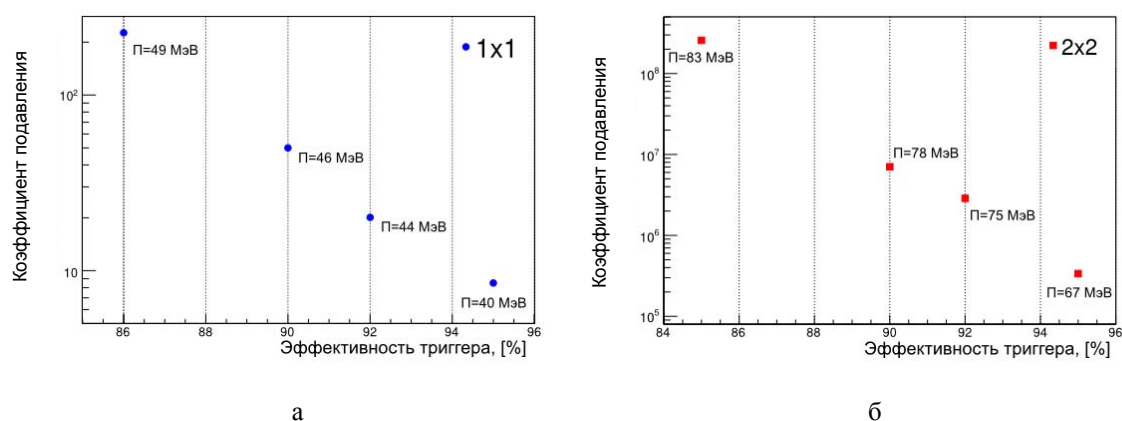


Рис. 8. Поведение коэффициента подавления потока ДЮ электронов в зависимости от эффективности триггера (а – одиночная триггерная ячейка; б – кластер из 2×2 триггерных ячеек; П – величина пороговой энергии, соответствующая данной эффективности триггера)

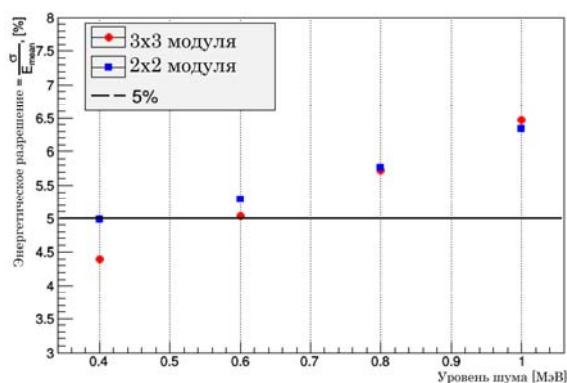


Рис. 9. Зависимости энергетического разрешения от уровня шума

Чтобы получить реалистичное значение энергетического разрешения, необходимо учитывать электронный шум. Энергетический эквивалент шума электроники в сигналах триггерных ячеек зависит от режимов работы калориметра и варьируется от 0,4 до 1 МэВ на кристалл. Следовательно, моделирование проводилось для нескольких эквивалентных значений энергии шума в пределах расчетного диапазона. Шумы электроники были смоделированы следующим образом: при каждом событии и для каждого кристалла генерировалось случайное значение шума, размытое нормальным распределением с заранее заданным $\sigma_{\text{шума}}$, и это значение было добавлено к значению энерговыделе-

ния в этом кристалле. Полученные значения собранных в модуле кристаллов суммировались, что дало значение «измеренной» энергии соответствующей триггерной ячейке в этом сигнальном событии.

Энергетическое разрешение для кластеров 2×2 и 3×3 оценивалось путем подбора соответствующего спектра с логарифмически нормальным распределением. Зависимости энергетического разрешения от уровня шума для каждого из размеров кластера показаны на рис. 9. Как видно из этого рисунка, для низких уровней шума в кристалле кластер 3×3 обеспечивает лучшее энергетическое разрешение, чем кластер 2×2 . Для уровней шума в кристалле от 0,6 до 0,8 МэВ оба кластера обеспечивают почти такое же энергетическое разрешение. Для уровней шума 1 МэВ и выше кластер 2×2 обеспечивает лучшее энергетическое разрешение, поскольку он собирает шумы меньшего количества каналов, чем самый большой кластер. Необходимо отметить, что основная фоновая загрузка от гамма-квантов и нейтронов дает энерговыделение свыше 1 МэВ, что делает кластер 2×2 еще более предпочтительным.

Кроме того, алгоритм для размера кластера 2×2 намного проще реализовать технически, и он более стабилен по отношению к коррелированным шумам. Поэтому было принято решение использовать в первичном триггере калориметра COMET

размер кластера 2×2 триггерных ячейки и описанный выше алгоритм поиска оптимального кластера.

Электроника первичного триггера

Для экспериментальной проверки предложенной логики работы первичного триггера был разработан и изготовлен прототип электроники.

Для облегчения технического обслуживания было принято решение аналоговую часть и оцифровку сигналов калориметра вынести в отдельные маленькие платки, а обработку оцифрованных данных сделать на материнской плате, которая была бы аналогом шины Крейта, как показано на рис. 10. Каждая такая оцифровывающая плата содержит два 4-канальных 8-битных аналого-цифровых преобразователя с частотой дискретизации 80 МГц. Всего в материнскую плату может быть установлено до 16 оцифровывающих плат.

Все поступающие с калориметра в материнскую плату первичного триггера оцифрованные сигналы обрабатываются в реальном времени в ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) по разработанному алгоритму.

Тестирование прототипа электроники на стенде

Работа прототипа электроники с запрограммированным алгоритмом была опробована с использованием нескольких комби-

наций тестового сигнала от генератора таким образом, чтобы смоделировать разные варианты энерговыделения в нескольких триггерных ячейках. Для тестирования использовались прототип электроники первичного триггера электромагнитного калориметра и одна плата предусилителей.

Было подтверждено, что алгоритм работает правильно: он обнаруживает сигналы ячеек – вырабатывает сигнал превышения порога, находит их пиковые значения, вычисляет сумму амплитуд по каждой триггерной группе (2×2 триггерных ячейки) и находит триггерную группу с максимальной суммой амплитуды.

Триггерные данные, в которые входят номер триггерной группы с наибольшим энерговыделением и значение энерговыделения в этой группе, вырабатывались через 0,8–1,0 мкс от момента появления сигнала от генератора (в зависимости от амплитуды сигнала).

Тестирование на пучке электронов

Работа системы была протестирована также на выведенном пучке электронов (Сендай, Япония). Для тестирования использовался прототип калориметра, состоящий из 64-х кристаллов.

Было набрано 10 заходов (5 с запусками от триггерной системы калориметра и 5 с запусками от внешней системы для измерения эффективности) по ~ 20 тысяч событий каждый. Общая эффективность при энергии выше 30 МэВ составила 99,4 %,



а



б

Рис. 10. Прототип электроники первичного триггера калориметра (а – оцифровывающая плата; б – материнская плата первичного триггера)

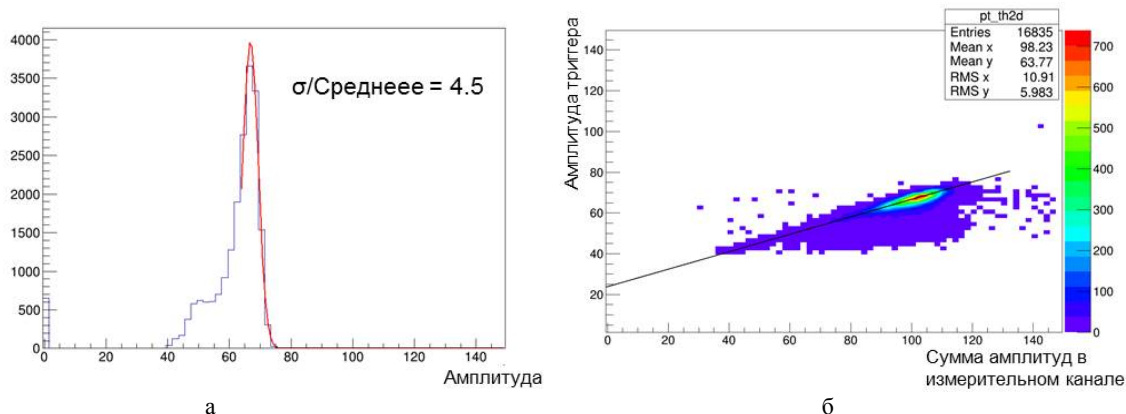


Рис. 11. Распределение измеренных амплитуд в каналах АЦП (а); график линейности каналов триггерной системы (б)

более 40 МэВ – 99,7%. Эффективность вычислялась из соотношения количеств событий, зарегистрированных внешней системой, и событий, зарегистрированных триггерной системой калориметра. Энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам получилось порядка 4,5% (рис. 11, а). Определялось энергетическое разрешение как отношение σ распределения к среднему значению распределения за вычетом пьедестала, который определялся из рис. 11, б.

Заключение

В настоящий момент прототип электроники первичного триггера электромагнитного калориметра произведен и протестирован. Алгоритм логики первичного триггера разработан, промоделирован и протестирован в электронике на стенде и реальных событиях. Результаты тестирования показали, что алгоритм работает корректно. На основании результатов измерений было принято решение произвести небольшие модификации в электронике, а также запланировано в будущем году тестирование электроники первичного триггера калориметра с системой глобального триггера детектора [4; 10] для принятия финального решения по использованию данной системы в эксперименте COMET.

Список литературы

1. *Kuno Y.* A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment

// Prog. Theor. Exp. Phys., v.022C01, 2013, p. 1–43.

2. *Uchida Y. et al.* Muon-to-Electron conversion with COMET // Journal of Instrumentation. 2014. Vol. 9. Iss. 9. C09008, 9 p.

3. *Litchfield P. et al.* COMET Phase-I // PoS NUFAC2014. 2015. P. 109.

4. COMET collaboration 2016 COMET Phase-I Technical Design Report. URL: http://comet.kek.jp/Documents_files/PAC-TDR-2016/COMET-TDR-2016_v2.pdf

5. *Bertl W. H. et al.* A Search for muon to electron conversion in muonic gold // Eur. Phys. J. 2006. C 47, 337.

6. *Kou Oishi et al.* Development of Electromagnetic Calorimeter Using GSO and LYSO Crystals for the J-PARC Muon-to-Electron Conversion Search Experiment // JPS Conf. Proc. 2015. Vol. 8. P. 025014.

7. *Czarnecki X., Tormo G., Marciano W. J.* Muon decay in orbit: Spectrum of high-energy electrons // Phys. Rev. D. 84:013006. 2011.

8. *Epshteyn L. B., Akhmetshin R. R., Gri-goriev D. N., Kazanin V. F., Melnik A. S., Shoukovy Dz. V., Yudin Yu. V.* L-1 Trigger System for Electromagnetic Calorimeter of COMET Experiment // Journal of Instrumentation. Vol. 12. C01064.

9. *Agostinelli S. et al.* Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 506, № 3. P. 250–303.

10. The FC7 project. URL <https://espace.cern.ch/project-FC7/SitePages/Home.aspx>.

L. B. Epshteyn¹⁻³, **R. R. Akhmetshin**^{1,3}, **D. N. Grigogiev**¹⁻³, **V. F. Kazanin**^{1,3}
A. S. Melnik⁴, **Dz. V. Shoukovy**⁴, **Yu. V. Yudin**^{1,3}

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Ave., Novosibirsk, Russian Federation*

³ *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, Russian Federation*

⁴ *Institute of Physics National Academy of Sciences of Belarus
68 Nezavisimost Ave., Minsk, Belarus*

L.B.Epshteyn@inp.nsk.su

ANALYSIS IN REAL TIME OF THE ELECTROMAGNETIC CALORIMETER DATA OF EXPERIMENT COMET

In this paper, an algorithm for real-time analysis of the COMET experiment calorimeter is described. In order to ensure the stable operation of the detector's information reading system, it is necessary to make a decision to start basing on the information from the calorimeter. At the same time, it is required to provide energy resolution in real time no worse than 5 %. On the basis of the simulation results a signal processing algorithm for determination in real time of the energy deposited by incident particles in the calorimeter based on the digitization of signals and their analysis in programmed logic in the traveling wave mode has been developed and optimized. The proposed algorithm was tested by Monte-Carlo simulation, test-bench measurements and electron beam experiments. The results satisfy to the experimental requirements.

Keywords: trigger system, calorimeter, experiment COMET.