

P1-2015-15

В. А. Аносов, Н. В. Анфимов, Й. Барт<sup>1</sup>, А. В. Гуськов,  
М. Дзиевицки<sup>2</sup>, М. Жембицки<sup>2</sup>, К. Заремба<sup>2</sup>, Ф. Клейн<sup>1</sup>,  
З. В. Крумштейн, Р. Курята<sup>2</sup>, Я. Мажец<sup>2</sup>, А. П. Нагайцев,  
А. Г. Ольшевский, И. А. Орлов, Т. В. Резинько,  
А. Рихтер<sup>2</sup>, А. В. Рыбников, А. С. Селюнин,  
В. Н. Фролов, Ф. Фроммбергер<sup>1</sup>, В. Хиллерт<sup>1</sup>,  
В. В. Чальшев, И. Е. Чириков-Зорин, Д. Элснер<sup>1</sup>

**ИССЛЕДОВАНИЕ СБОРКИ МОДУЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ESCAL0  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА COMPASS  
НА ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ ELSA**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

<sup>1</sup> Физический институт Боннского университета, Бонн, Германия

<sup>2</sup> Варшавский политехнический университет, Институт радиоэлектроники, Варшава

Аносов В. А. и др.

P1-2015-15

Исследование сборки модулей электромагнитного калориметра ECAL0 для эксперимента COMPASS на электронном пучке ускорителя ELSA

На электронном пучке ускорителя ELSA (Германия) была исследована сборка из  $3 \times 3$  модулей электромагнитного калориметра ECAL0 установки COMPASS (ЦЕРН). Изучались зависимости отклика и энергетического разрешения калориметра от угла падения пучка электронов. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с результатами расчетов методом Монте-Карло, что позволит существенно расширить применение моделирования для оптимизации алгоритмов реконструкции событий.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Anosov V. A. et al.

P1-2015-15

Tests of the Module Array of the ECAL0 Electromagnetic Calorimeter for the COMPASS Experiment with the Electron Beam at the ELSA

The array of  $3 \times 3$  modules of the electromagnetic calorimeter ECAL0 of the COMPASS experiment at CERN has been tested with an electron beam of the ELSA (Germany) facility. The dependence of the response and the energy resolution of the calorimeter on the angle of incidence of the electron beam has been studied. A good agreement between the experimental data and the results of Monte Carlo simulation has been obtained. It will significantly expand the use of simulation to optimize event reconstruction algorithms.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Измерение обобщенных партонных распределений (GPD) в реакции глубоконеупругого комптоновского рассеяния (DVCS)

$$\mu^+ p \rightarrow \mu^+ p \gamma \quad (1)$$

является одной из основных задач второй фазы эксперимента COMPASS [1]. Большинство фотонов, рожденных в реакции (1), регистрируется системой двух уже имеющихся на установке COMPASS электромагнитных калориметров ECAL1 и ECAL2. В настоящее время в ОИЯИ создается дополнительный широкоапертурный электромагнитный калориметр ECAL0, в задачи которого входит расширение кинематической области регистрации фотона в реакции (1) и участие в эффективном подавлении фона от процессов с  $\pi^0$  и  $\eta$  с большим поперечным импульсом в конечном состоянии. ECAL0 будет расположен после протяженной жидководородной мишени на выходе детектора протонов отдачи, и в его задачу будет входить регистрация гамма-квантов с энергией от 0,15 до 30 ГэВ в диапазоне полярных углов 0,15–0,6 рад.

Конструкция калориметра ECAL0 была выбрана в результате ряда успешных испытаний различных прототипов электромагнитных калориметров типа «шашлык» со съемом света микропиксельными лавинными фотодиодами (МЛФД) на пучке T9 PS (ЦЕРН) в 2008–2009 гг. [2, 3]. ECAL0 представляет собой калориметр типа «шашлык» с высокой гранулярностью (размер ячейки  $4 \times 4$  см). Модуль калориметра ( $3 \times 3$  ячейки) состоит из активной части — 109 чередующихся слоев свинца (0,8 мм) и сцинтиллятора (1,5 мм) — и блока регистрации на МЛФД. Суммарная толщина активной части составляет 15,3 радиационных длин. Светосбор со сцинтилляционных пластин на МЛФД осуществляется спектросмещающими волокнами. Применение фотомножителей в качестве фотодетекторов практически невозможно, так как калориметр будет расположен в области достаточно сильного рассеянного поля спектрометрического магнита установки COMPASS. В блоке регистрации используются фотодиоды типа MAPD-3N и MAPD-3A со сверхвысокой плотностью пикселей ( $1,5 \cdot 10^4$  мм<sup>-2</sup>) и площадью  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, имеющие широкий динамический диапазон, обеспечивающий хорошую линейность отклика [2]. Активные части модулей калориметра изготовлены в Институте сцинтилляционных материалов (Харьков). Детальное описание конструкции

модуля калориметра представлено в работе [4]. Отметим, что модули аналогичной конструкции планируется использовать для электромагнитных калориметров коллайдера NICA.

В 2011 г. на пучке T9 (ЦЕРН) была успешно испытана сборка из  $3 \times 3$  прототипов модулей ECAL0 [5]. В тестовом сеансе на установке COMPASS в 2012 г. проводились испытания фрагмента калориметра ECAL0 из 56 модулей (примерно четверть от полного числа). Калибровка ячеек калориметра осуществлялась с помощью параллельного пучка мюонов и сигнала от распада  $\pi^0$ . Исследования показали, что такие параметры, как энергетическое, пространственное, временное разрешения и линейность отклика, соответствовали ожидаемым и были стабильны во времени.

Однако для дальнейшей оптимизации алгоритмов реконструкции событий, а также улучшения пространственного и энергетического разрешения и т. д. необходимо изучить зависимости характеристик калориметра от угла падения фотонов (или электронов). С этой целью в феврале 2014 г. на электронном пучке ускорителя ELSA [6] в г. Бонне были проведены дополнительные исследования сборки из  $3 \times 3$  модулей.

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СБОРКИ МОДУЛЕЙ

**1.1. Эксперимент.** Исследование сборки  $3 \times 3$  модулей (81 ячейка) проводилось на выведенном электронном пучке ускорителя ELSA с интенсивностью  $2 \cdot 10^3 e^-/с$  при трех значениях энергии электронов: 0,8, 1,6 и 3,2 ГэВ. Сборка модулей размещалась на дистанционно управляемой подвижной платформе, позволяющей устанавливать вертикальное и горизонтальное положение модулей с точностью лучше 0,2 мм, а угол поворота в горизонтальной плоскости — с точностью 0,1°. Годоскоп, состоящий из двух плоскостей сцинтилляционных волокон диаметром 1,0 мм с шагом 0,7 мм, использовался для определения координат точки падения электронов на модули калориметра, мониторинга интенсивности пучка, а также в качестве триггера. Размер активной области годоскопа составлял  $2,3 \times 2,3$  см. На рис. 1, а представлен типичный профиль пучка электронов с энергией 1,6 ГэВ, полученный с использованием годоскопа. Сигналы с фотодетекторов модулей калориметра подавались на усилители-формирователи и затем по скрученной паре на вход 12-разрядного 80-МГц аналого-цифрового преобразователя MSADC-COMPASS. Триггер для системы считывания вырабатывался при совпадении сигналов с двух плоскостей годоскопа. В системе считывания MSADC-COMPASS устанавливался цифровой порог — 5 каналов АЦП ( $\approx 50$  МэВ).

Исследование модулей калориметра проводилось в два этапа. На первом этапе выполнена калибровка отклика каждой ячейки при энергии 3,2 ГэВ. На втором этапе исследована угловая зависимость отклика калориметра для 15 ячеек, расположенных в центральной области сборки.

Для осуществления энергетической калибровки ячеек платформа с установленной на ней сборкой перемещалась в вертикальном и горизонтальном направлении с шагом в 40 мм так, чтобы пучок электронов попадал в центр каждой ячейки. Для нескольких ячеек сканирование было проведено с шагом 10 мм с целью изучения вариации отклика в зависимости от места попадания электрона в ячейку.

Для изучения угловых зависимостей характеристик calorimetра сборка поворачивалась в горизонтальной плоскости на угол  $\theta$  от 0 до  $36^\circ$  относи-

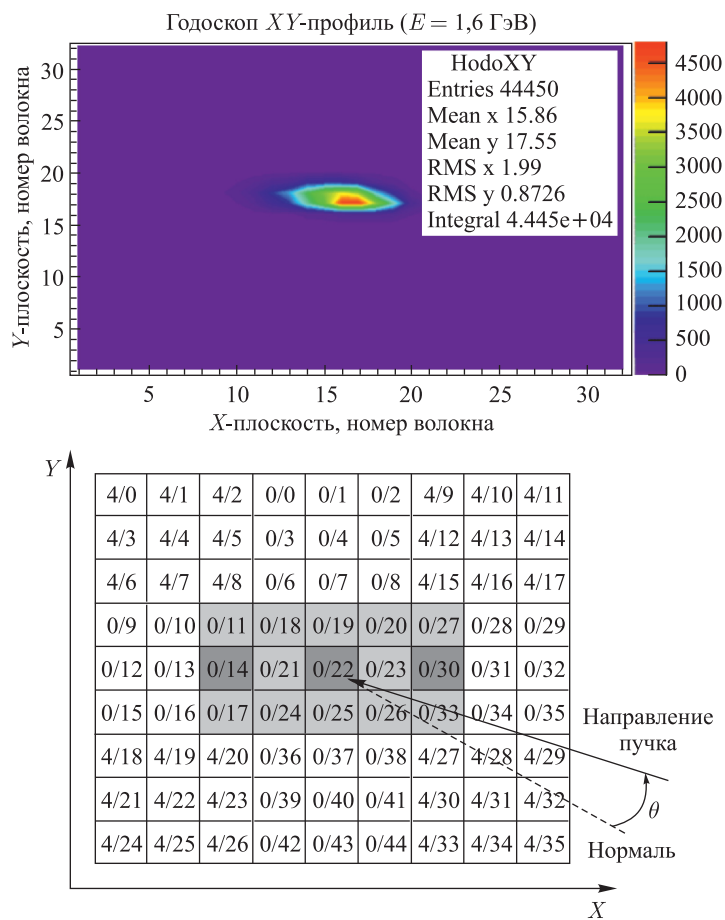


Рис. 1. а) Типичный профиль пучка электронов с энергией 1,6 ГэВ:  $\sigma_x = 1,4$  мм,  $\sigma_y = 0,5$  мм. б) Конфигурация сборки из 9 модулей. Серым цветом показаны центральные ячейки, для которых измерялись энергетическая и угловая зависимости отклика. Темно-серым цветом отмечены ячейки, для которых проводилось Монте-Карло моделирование отклика

тельно оси пучка с шагом в  $6^\circ$ . Направление поворота показано на рис. 1, б. Измерения выполнялись при энергиях электронов 0,8, 1,6 и 3,2 ГэВ для 15 центральных ячеек сборки, которые отмечены серым цветом на рис. 1, б.

**1.2. Моделирование.** Экспериментальные результаты сравнивались с результатами Монте-Карло моделирования, выполненного с использованием программного пакета Geant4 [7]. При описании конструкции калориметра в модели было учтено наличие отверстий в свинцовых и сцинтилляционных пластинах, зазоров, LEGO-соединений и спектросмещающих волокон. Учитывались также размеры пучка электронов, полученные с помощью сцинтилляционного годоскопа. При моделировании развития электромагнитного ливня в веществе использовался стандартный набор физических процессов QGSP\_BERT. Отклик калориметра на прохождение электрона считался пропорциональным суммарному энерговыделению в слоях сцинтиллятора, при этом для каждой ячейки был установлен порог регистрации 43 МэВ, который соответствовал цифровому порогу электроники (5 каналов АЦП). Для корректного описания отклика калориметра дополнительно вводилось гауссовое размытие порога с  $\sigma = 15$  МэВ, определенной из экспериментальных данных. Также при моделировании учитывались затухание света в волокнах и статистические флуктуации числа фотоэлектронов, образующихся в МЛФД.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований представлены на рис. 2–5, ошибки измерений меньше размеров точек на графиках.

На рис. 2, а, б представлены результаты измерений отклика и энергетического разрешения калориметра для случая нормально падающего пучка. Для

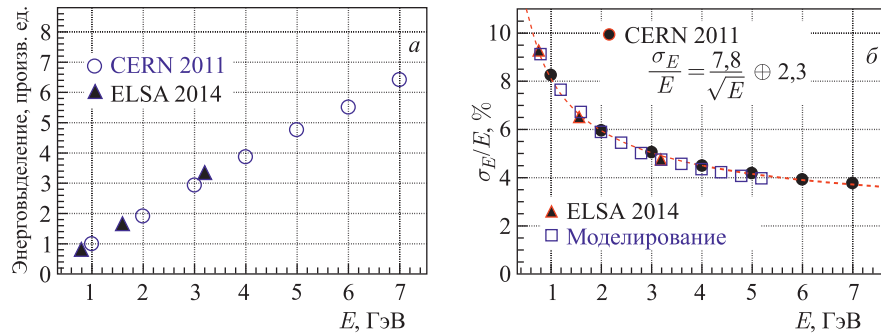


Рис. 2. Зависимость отклика (а) и энергетического разрешения  $\sigma_E/E$  (б) сборки модулей от энергии электронов, нормально падающих ( $\theta = 0^\circ$ ) в центр ячейки 0/22. Результаты измерений 2011 г. в ЦЕРН показаны кружками, 2014 г. на ELSA — треугольниками, а результаты Монте-Карло моделирования — квадратами

сравнения также приведены результаты моделирования и данные, полученные в 2011 г. на канале T9 в ЦЕРН [5]. Видно, что результаты хорошо согласуются.

На рис. 3 представлены измеренные и полученные в результате моделирования угловые зависимости энергетического разрешения  $\sigma_E/E$  при падении пучка электронов с энергией 3,2 ГэВ в центры ячеек 0/14, 0/22 и 0/30. Для ячеек 0/22 и 0/30 наблюдается ожидаемое незначительное улучшение разрешения с ростом угла, связанное с увеличением эффективной длины активной части калориметра. Тогда как для ячейки 0/14 при углах  $\theta \geq 20^\circ$  разрешение ухудшается значительно, что обусловлено вытеканием электромагнитного ливня через боковую поверхность сборки. Зависимости энерговыделения от угла падения пучка для центральной ячейки 0/22 и краевой 0/14 при энергии 3,2 ГэВ представлены на рис. 4, а, б соответственно. Видно, что Монте-Карло моделирование описывает экспериментальные данные.

При моделировании использовалось экспериментально полученное значение порога на энерговыделение в одной ячейке — 43 МэВ. Для подтверждения правильности этого значения были построены экспериментальное и

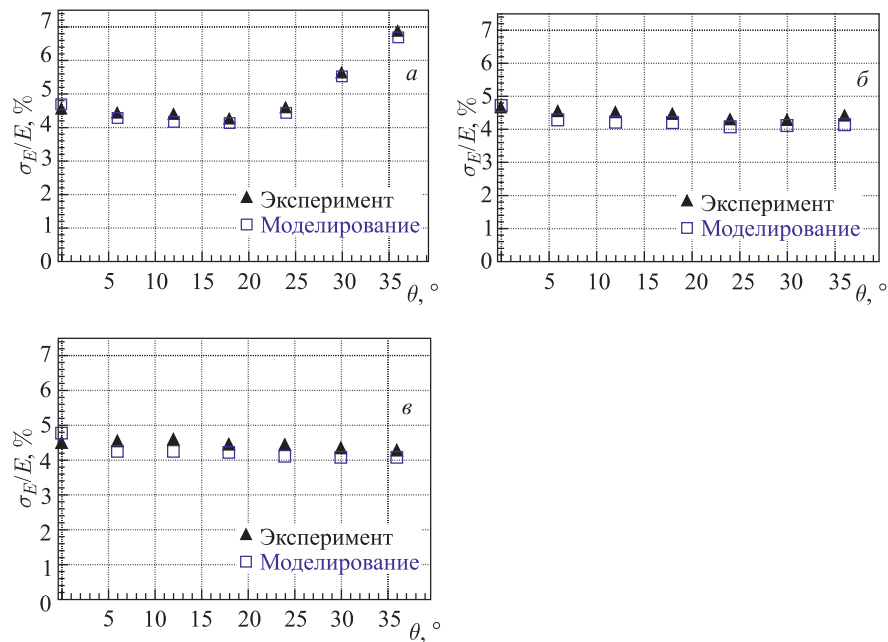


Рис. 3. Зависимости энергетического разрешения сборки  $\sigma_E/E$  от угла падения пучка электронов с энергией 3,2 ГэВ в центры ячеек: 0/14 (а), 0/22 (б), 0/30 (в). Результаты измерений показаны треугольниками, результаты моделирования — квадратами

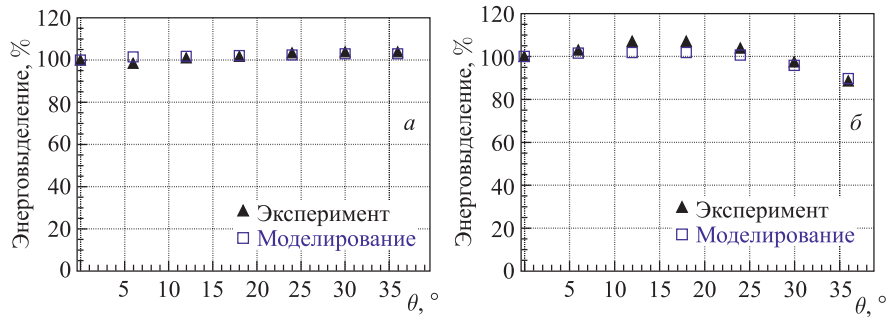


Рис. 4. Зависимости энерговыделения в сборке от угла падения пучка электронов с энергией 3,2 ГэВ в центральную 0/22 (а) и краевую 0/14 (б) ячейки. Результаты измерений показаны треугольниками, результаты моделирования — квадратами

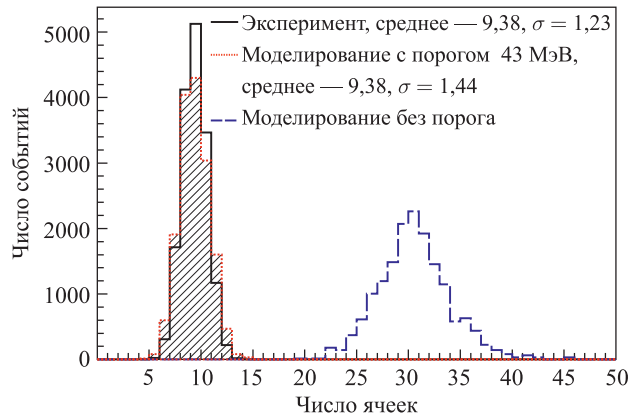


Рис. 5. Распределения числа ячеек в кластере энерговыделения при падении пучка электронов в ячейку 0/30 под углом  $\theta = 36^\circ$ : экспериментальное и полученные в результате моделирования без порога на энерговыделение в ячейке и с порогом 43 МэВ

полученные при моделировании распределения числа ячеек в кластере энерговыделения в калориметре (рис. 5). Как видно из представленных распределений, моделирование с использованием порога 43 МэВ хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований продемонстрировали способность калориметра ECAL0 измерять энергию фотонов, падающих под большими углами (до 0,6 рад), с требуемой в эксперименте COMPASS точностью



$\sigma_E/E \leq 10\%/\sqrt{E}$ . Результаты Монте-Карло моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Результаты измерений и моделирования будут использованы для оптимизации алгоритмов реконструкции кластеров, в которых будут учтены как эффекты, связанные с углом падения, так и краевые эффекты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *COMPASS Collab.* COMPASS II Proposal. CERN-SPSC-2010-014, SPSC-P-340. 2010.
2. *Anfimov N. et al.* Beam Test of Shashlyk EM Calorimeter Prototypes Readout by Novel MAPD with Super High Linearity // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 617. P. 78–80.
3. *Anfimov N. et al.* Novel Micropixel Avalanche Photodiodes (MAPD) with Super High Pixel Density // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 628. P. 369–371.
4. *Chirikov-Zorin I. et al.* The Design of a Module of a New Electromagnetic Calorimeter for COMPASS II // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 3(187). С. 412–417; JINR Preprint E13-2013-82. Dubna, 2013.
5. *Anfimov N. et al.* Shashlyk EM Calorimeter Prototype Readout by MAPD with Superhigh Pixel Density for COMPASS II // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 718. P. 75–77.
6. *Hillert W.* The Bonn Electron Stretcher Accelerator ELSA: Past and Future // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 28. s01. P. 139–148.
7. *Agostinelli H. et al.* Geant4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303.

Получено 12 марта 2015 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 14.04.2015.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,78. Тираж 305 экз. Заказ № 58526.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)