



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-57

ОНФ

С.В.Беликов, И.А.Васильев, С.Н.Гуржиев, В.В.Липаев

**КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРА БАРС
ОСТАНАВЛИВАЮЩИМИСЯ МЮОНАМИ**

Направлено в ПТЭ

Протвино 1998

Аннотация

Беликов С.В., Васильев И.А., Гуржиев С.Н., Липаев В.В. Калибровка калориметра БАРС останавливающимися мюонами: Препринт ИФВЭ 98–57. – Протвино, 1998. – 9 с., 5 рис., 2 табл., библиогр.: 4.

Предложен метод калибровки Большого жидкоаргонового спектрометра (БАРС), входящего в состав комплекса меченых нейтрино (КМН) ускорительного комплекса У-70, базирующийся на регистрации останавливающихся в спектрометре мюонов. Изложен итерационный способ нахождения калибровочного коэффициента, основанный на сравнении экспериментальных данных и данных моделирования, полученных с учетом экспериментальных значений шумов и порогов считывания системы сбора данных. Данный метод калибровки может быть использован и для других калориметров с тонкой гранулярностью и низким порогом регистрации.

Abstract

Belikov S.V., Gurzhiev S.N., Lipaev V.V., Vasiliev I.A. Calorimeter BARS Calibration by Stopped Muons: IHEP Preprint 98–57. – Protvino, 1998. – p. 9, figs. 5, tables 2, refs.: 4.

The calibration method of the Big liquid argon spectrometer (BARS), which is a part of the Tagged Neutrino Facility of 70 GeV PS in Serpukhov is based on stopped muons detection. An iterative way of the calibration coefficient determination, founded on the comparison of the experimental data and the results of simulation, which were obtained with the experimental values of noises and thresholds of data acquisition system read-out taken into account, is described. This calibration method may also be used for other highly granulated calorimeters with low detection thresholds.

Введение

Большой жидкоаргоновый спектрометр (БАРС) насчитывает около 137 радиационных длин и около 24 ядерных длин вдоль пучка. В связи с этим калибровка всех 27648 каналов данного детектора с помощью адронных или электронных пучков затруднительна. В данной работе предложен метод получения калибровочного коэффициента для всех каналов спектрометра, основанный на регистрации мюонов высоких энергий, останавливающихся в детекторе.

1. Детектор БАРС

Спектрометр БАРС используется как детектор-мишень в комплексе меченых нейтрино (КМН). Схема комплекса показана на рис.1.

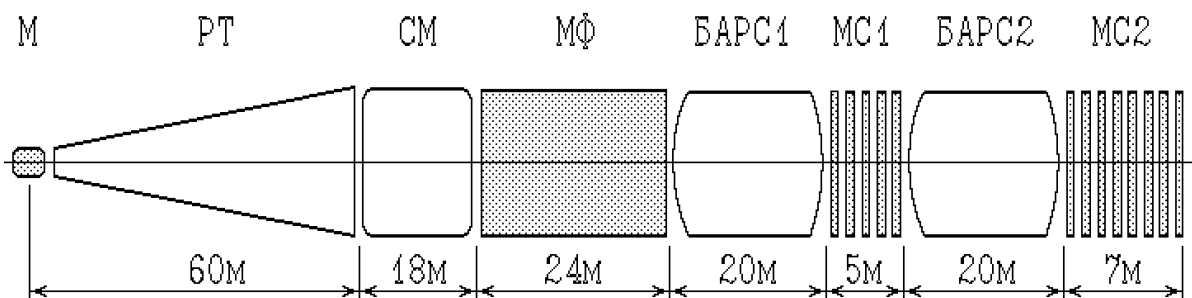


Рис. 1. Комплекс меченых нейтрино: М – фокусирующий магнит; РТ – распадная труба; СМ – станция мечения; МФ – мюонный фильтр; БАРС1, БАРС2 – жидкоаргоновый спектрометр; МС1, МС2 – магнитный спектрометр.

В настоящее время это самый большой среди действующих жидкоаргоновых детекторов. В то же время он является относительно “легким” спектрометром (его средняя плотность составляет $1,6 \text{ г/см}^3$), в котором большая часть (около 67%) оставшейся ионизирующими частицами энергии выделяется в активном веществе.

Железная защита толщиной 28 метров предотвращает проникновение нераспавшихся адронов от пучка в БАРС. Таким образом, только нейтрино, космические частицы и часть мюонов от пучка, прошедшие или обогнувшие защиту, попадают в детектор.

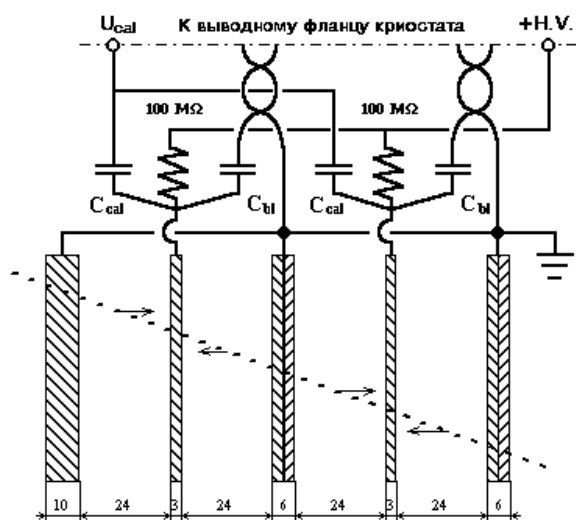


Рис. 2. Схема подключения сигнальных электродов ионизационных камер: C_{cal} – калибровочные конденсаторы; C_{bl} – блокировочные конденсаторы.

Спектрометр состоит из двух одинаковых криостатов БАРС1 и БАРС2, расположенных один за другим вдоль оси пучка и заполненных жидким аргоном. Внутри каждого криостата расположены 24 секции ионизационных камер, перемежающиеся сцинтилляционными триггерными детекторами [1]. Ионизационные камеры внутри БАРС1 и БАРС2 состоят из расположенного вдоль оси пучка ряда идентичных элементарных двухзазорных ячеек, которые называются бигэпами. Бигэп представляет собой три параллельные алюминиевые пластины, толщиной 3 мм каждая, разнесенные на 24 мм друг от друга. Первая и третья пластины заземлены, а на вторую, являющуюся сигнальным электродом, подается высокое напряжение (рис.2). Пространство между пластинами заполнено жидким аргоном.

Каждый сигнальный электрод сегментирован в поперечном направлении на 48 стрипов шириной 61 мм каждый; зазор между стрипами составляет 2 мм. Внутри каждого из криостатов ионизационные камеры сгруппированы в 24 секции. Секция включает в себя 12 бигэпов, образуя, таким образом, $12 \times 48 = 576$ сигнальных стрипов. С обеих сторон каждой секции находятся 10-миллиметровые алюминиевые пластины, являющиеся внешними земельными электродами. Секции смонтированы попарно на 12 алюминиевых платформах, последовательно расположенных внутри криостата.

Внутри каждого криостата между секциями ионизационных камер расположены 24 сцинтилляционные триггерные плоскости [2]. Каждая триггерная плоскость состоит из 8 сцинтилляционных пластин шириной 334 мм, толщиной 22 мм и длиной от 1 до 2,5 м, прослоенных 7 полосами переизлучателей спектра сечением $22 \times 10 \text{ мм}^2$. Каждый переизлучатель просматривается двумя ФЭУ-84-3. Сигналы от всех 14 фотоумножителей плоскости выводятся через специальный разъем наружу из криостата. В специально созданном триггерном модуле сигналы от триггерных плоскостей в зависимости от экспериментальных задач коммутируются в схемах совпадений и образуют запускающий детектор БАРС триггерный сигнал, по приходу которого осуществляется рабочее считывание информации с ионизационных камер [3].

2. Выбор энергии для калибровки

Трек от мюона высокой энергии (≥ 5 ГэВ), проникающего сквозь всю установку БАРС, практически прямой, что облегчает задачу геометрической реконструкции события. Однако существует трудность: с ростом энергии мюона растет сечение его взаимодействия вследствие тормозного излучения, процесса образования пар и фотоядерных взаимодействий [4]. Также наличие тормозных γ -квантов и δ -электронов, возникающих вдоль трека мюона, приводит к ситуации, когда некоторая доля сигнала от мюона будет зарегистрирована не только в том стрипе данной сигнальной плоскости, который он пересекает, но и в соседних стрипах той же сигнальной плоскости.

Для оценки доли сигнала в соседних стрипах с помощью программы GEANT 3.21 была задана реальная структура детектора БАРС и было произведено моделирование 1000 мюонов, проходящих через установку, при определенных значениях импульсов от 1 до 50 ГэВ. Стрип, пересекаемый мюоном, обозначен центральным стрипом, правый и левый соседние стрипы — ближними соседними стрипами, следующие правый и левый стрипы — дальними соседними стрипами. Для каждого события в каждой из сигнальных плоскостей значение энерговыделения в центральном стрипе заносилось в один (центральный) канал гистограммы, в ближних соседних стрипах — соответственно в предшествующий центральному и следующий за ним каналы гистограммы и т.д. Для расчетов через A_0 был обозначен сигнал в центральном стрипе, A_1 — сумма сигналов в ближних соседних стрипах, A_2 — сумма сигналов в дальних соседних стрипах, A — сумма сигналов во всех стрипах.

Таблица 1. Соотношение долей сигналов в соседних стрипах в зависимости от начального импульса мюона

Импульс, ГэВ	$A_0/A, \%$	$\sigma(A_0/A), \%$	$A_1/A, \%$	$\sigma(A_1/A), \%$	$A_2/A, \%$	$\sigma(A_2/A), \%$
1	96,3	0,3	2,93	0,07	0,299	0,008
2	96,6	0,2	2,70	0,08	0,296	0,007
3	96,4	0,2	2,81	0,07	0,339	0,006
5	96,0	0,3	3,11	0,07	0,436	0,008
7,5	95,3	0,3	3,53	0,08	0,591	0,009
10	94,5	0,3	3,99	0,07	0,722	0,009
12,5	94,2	0,3	4,22	0,10	0,761	0,010
15	93,7	0,3	4,6	0,2	0,840	0,010
20	93,3	0,3	4,8	0,2	0,950	0,009
25	93,1	0,3	4,9	0,3	0,998	0,011
30	92,3	0,3	5,5	0,4	1,12	0,02
35	91,9	0,3	5,7	0,6	1,16	0,05
40	91,7	0,2	5,9	0,6	1,19	0,07
45	91,6	0,3	6,1	0,7	1,20	0,06
50	90,8	0,3	6,5	0,8	1,40	0,09

В результате анализа данных, приведенных в табл.1, предлагается для процедуры калибровки спектрометра БАРС использовать останавливающиеся в детекторе мюоны (мюоны с начальной энергией до 5 ГэВ). Для останавливающихся мюонов можно выделить следующие характерные признаки. Во-первых, доля энергии, регистрируемая в центральном стрипе, практически не зависит от энергии мюона в диапазоне от 1 до 5 ГэВ и составляет 0,963 от полной выделившейся энергии (табл.1). Во-вторых, энерговыделение останавлиющихся в БАРСе мюонов обусловлено только ионизационными потерями, которые описываются формулой Бете-Блоха [4]. Поэтому для ячейки, в которой происходит остановка мюона, энерговыделение существенно превышает энерговыделения в каждой из предыдущих ячеек и может служить дополнительной реперной точкой при калибровке.

Сопоставляя экспериментальное значение энергетических потерь в ячейке, выраженное в отсчетах аналого-цифрового преобразователя (АЦП), со значением, полученным в результате моделирования методом Монте-Карло с помощью программы GEANT, можно определить калибровочный коэффициент перевода из отсчетов в энергию (отсчеты/МэВ).

3. Метод определения калибровочного коэффициента

Была проведена обработка 500 событий остановок μ^+ в БАРСе, записанных в ходе сеанса 1994 года (Run 5970). Мюоны, образовавшиеся в распадной трубе вследствие распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ и прошедшие мюонную защиту, частично разобранную для увеличения потока мюонов, попадали в БАРС. Триггерный сигнал на считывание информации с ионизационных камер вырабатывался по совпадению срабатываний заданного количества триггерных плоскостей, что позволяло набирать статистику для останавливающихся мюонов в пределах определенной секции ионизационных камер.

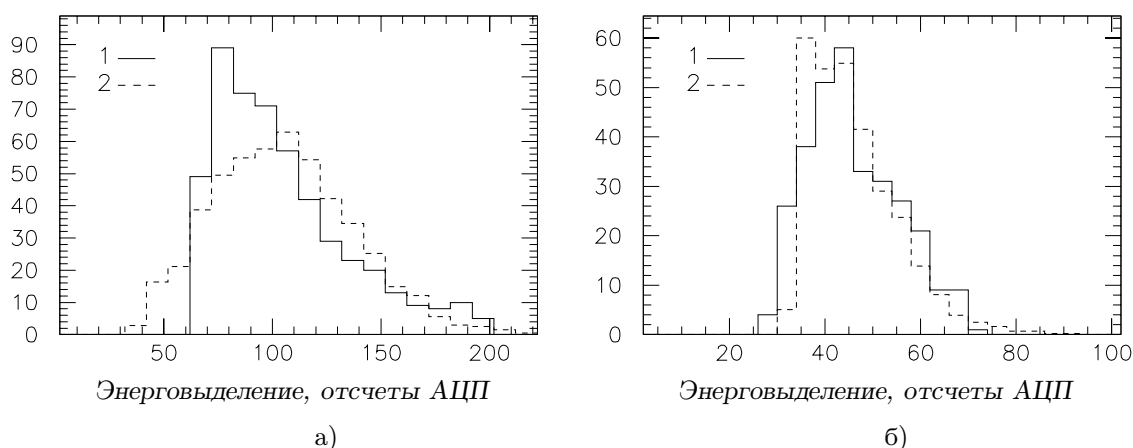


Рис. 3. Распределения потерь энергии: а) в 14-й ячейке (соответствующее максимуму энерговыделения); б) в 1-й ячейке (соответствующее минимуму энерговыделения). 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты моделирования.

Для каждого события, в котором мюон останавливался внутри рабочего объема детектора, для дальнейшего анализа использовалась информация об энерговыделении в 14 последних ячейках, выраженная в отчетах АЦП. В 14-ю ячейку заносились максимальные зарегистрированные значения вблизи остановки для каждого события, а в ячейки с 13-й по 1-ю последовательно заносились 13 значений, предшествовавших данному максимальному значению вдоль трека останавливающегося мюона. Исследовались последние 14 ячеек перед остановкой, так как при моделировании было установлено, что в этом случае энерговыделения в 1-й и 2-й ячейках соответствуют минимуму ионизационных потерь в жидком аргоне (рис.3). Также моделирование показало, что возможно появление сигналов за ячейкой, в которой мюон остановился, связанное с γ -квантами и δ -электронами, образованными при движении мюона в детекторе. Поэтому точкой остановки мюона была выбрана ячейка с максимальным энерговыделением.

При проведении эксперимента каждый стрип и каждая ячейка имели свои значения шумов и измерительного порога регистрирующей аппаратуры, распределения которых описываются следующими характеристиками: среднее значение шума составило $(11,1 \pm 1,9)$ отсчетов АЦП, а среднее значение порога — $(33,7 \pm 4,5)$ отсчетов АЦП. Значения потерь энергии ниже пороговых не регистрировались и при обработке такие события не учитывались. В связи с этим средние значения во всех ячейках, кроме последней, оказались завышенными по сравнению с теми, которые получились бы при отсутствии порогов. В последней же, 14-й ячейке, собраны экспериментальные значения потерь энергии выше порогового значения, поэтому существование данного порога при регистрации энерговыделения не смещает среднего значения для данного распределения.

При розыгрыше событий методом Монте-Карло необходимо учесть, что экспериментальные данные получены при наличии порогов и шумов. Однако для перевода пороговых и шумовых значений из отсчетов АЦП в энергию нам нужен искомый калибровочный коэффициент, поэтому работа была проведена в следующей последовательности:

1. При помощи программы GEANT был проведен расчет Монте-Карло для останавливающихся в детекторе БАРС $2000 \mu^+$.
2. Калибровочный коэффициент ϵ был определен как отношение среднего значения энерговыделения в последней ячейке (ячейке с максимальными потерями) экспериментальных данных в отчетах к соответствующему среднему значению, полученному при моделировании и выраженному в МэВ.
3. С учетом полученного ϵ усредненные значения шумов и порогов были переведены из отсчетов в энергетические величины.
4. Была проведена повторная генерация событий методом Монте-Карло с этими значениями шумов и порогов, в результате чего получились смещенные средние значения потерь энергии во всех ячейках.
5. Для каждой из 14 ячеек был вычислен калибровочный коэффициент ϵ и его среднее значение сопоставлено с первоначальным.

6. Для этого нового (усредненного по 14 точкам) значения ϵ процедура моделирования была повторена и было получено следующее значение коэффициента калибровки.
7. Данная процедура повторялась итерационно для отыскания оптимального значения калибровочного коэффициента.

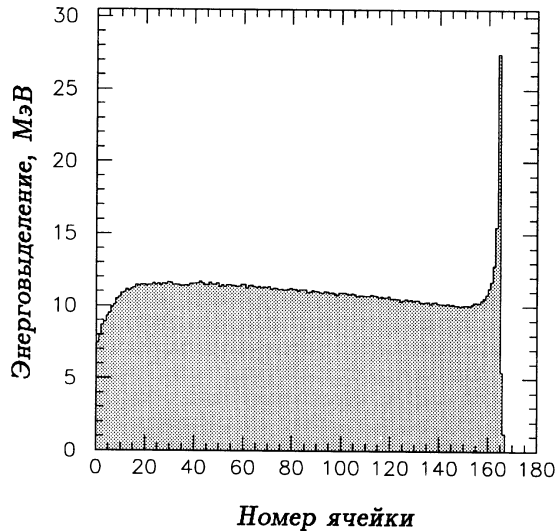


Рис. 4. Данные моделирования энергосвечения в ячейках БАРС от мюонов с начальной энергией 3 ГэВ, совмещенные по ячейке с максимумом потерь энергии.

Моделирование проводилось методом, идентичным методу обработки экспериментальных данных. Максимальные значения потерь энергии вблизи остановки для данного события заносились в последнюю (14-ю) ячейку, а значения энергосвечений в предшествующих 13 ячейках — в ячейки с номерами с 1-го по 13-й. Процедура восстановления данных энергосвечений от всех остановившихся мюонов, использующая совмещение ячеек с максимальными потерями энергии вблизи ячейки остановки, позволяет получить характерную картину для энергетических потерь мюонов с начальной энергией 3 ГэВ в жидком аргоне (рис.4). Форма этого распределения и при других энергиях имеет аналогичный вид, причем величина восстановленного пика практически не зависит от начальной энергии мюона и, следовательно, от места его остановки в детекторе.

Среднее значение этой величины при характерных для остановившихся в БАРСе мюонов энергиях (до 5 ГэВ) оказалось равным $(27,5 \pm 0,8)$ МэВ. Соответственно, первоначальное опорное значение калибровочного коэффициента $\epsilon = 103,9/27,5 = 3,78$ отсчетов/МэВ. Для полученного коэффициента ϵ средние значения измерительного порога и шума составляют 8,92 и 2,94 МэВ соответственно, и эти значения были использованы для повторного моделирования мюонных событий с начальной энергией мюона 3 ГэВ с помощью программы GEANT.

Для того чтобы данные моделирования соответствовали экспериментальной ситуации, считалось, что энергосвечение в ячейке равно нулю, если оно ниже порогового значения. По полученным 14 экспериментальным и 14 смоделированным распределениям были вычислены калибровочные коэффициенты ϵ , которые определялись как отношение среднего экспериментального значения, выраженного в отсчетах АЦП, к соответствующему среднему моделированному значению, выраженному в энергетических величинах. Было построено распределение величины ϵ , в результате чего получилось новое значение $\epsilon = (3,81 \pm 0,09)$ отсч./МэВ, и для первоначального значения коэффициента $\epsilon = 3,78$ отсч./МэВ была вычислена следующая величина:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{14} \frac{(x_e(i) - x_m(i))^2}{(\sigma_{x_e(i)})^2}, \quad (1)$$

где $x_e(i)$ — среднее экспериментальное значение энерговыделения в ячейке i ; $x_m(i)$ — среднее моделированное значение, переведенное в отсчеты с помощью $\epsilon = 3,78$ отсч./МэВ; $\sigma_{x_e(i)}$ — среднеквадратичное отклонение среднего экспериментального значения.

С учетом нового $\epsilon = 3,81$ отсч./МэВ значения порогов и шумов в энергетических величинах равны 8,85 и 2,92 МэВ соответственно. Генерация событий с этими значениями дала следующее значение калибровочного коэффициента. Результаты нескольких итераций представлены в табл.2, где ϵ_i — начальное значение коэффициента; ϵ_f — его конечное значение, полученное по 14 точкам.

Таблица 2. Результаты итерационной процедуры определения коэффициента калибровки

ϵ_i , отсч./МэВ	Порог, МэВ	Шум, МэВ	ϵ_f , отсч./МэВ	χ^2
3,78	8,92	2,94	$3,81 \pm 0,09$	24,2
3,81	8,85	2,92	$3,82 \pm 0,08$	18,6
3,83	8,80	2,90	$3,83 \pm 0,06$	16,2
3,85	8,76	2,89	$3,84 \pm 0,07$	17,2
3,88	8,69	2,86	$3,86 \pm 0,08$	22,0

Распределения сигналов, полученные в последней и первой ячейках в результате генерации событий с пороговыми и шумовыми значениями для $\epsilon=3,83$ отсч./МэВ, переведенные в отсчеты АЦП, представлены на рис.3 вместе с экспериментальными результатами. Переведенные с коэффициентом 3,83 из МэВ в отсчеты значения энерговыделений в 14 ячейках были наложены на экспериментальные (рис.5).

Заключение

Предлагаемый метод калибровки детектора БАРС при помощи останавливающихся мюонов обладает следующими особенностями:

1. Останавливающиеся мюоны позволяют получить экспериментальные данные для каждого канала детектора БАРС.
2. Для каждого канала существует опорная калибровочная точка (точка, соответствующая максимуму энерговыделения) и реперные точки (точки, соответствующие минимуму энерговыделения), которые позволяют проверить и уточнить полученный калибровочный коэффициент. Для экспериментальных данных, полученных в Run 5970, при помощи предлагаемого метода получено следующее значение калибровочного коэффициента — $\epsilon = (3,83 \pm 0,08)$ отсч./МэВ.

3. Время, необходимое для калибровки всех каналов БАРС от ускорительных μ^+ , незначительно по сравнению со временем, необходимым для набора статистики в нейтринном эксперименте, и при количестве 200 событий на канал и регистрации ~ 300 событий за сброс составляет при 6 сбросах за минуту $\simeq 26$ часов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №98-02-16405.

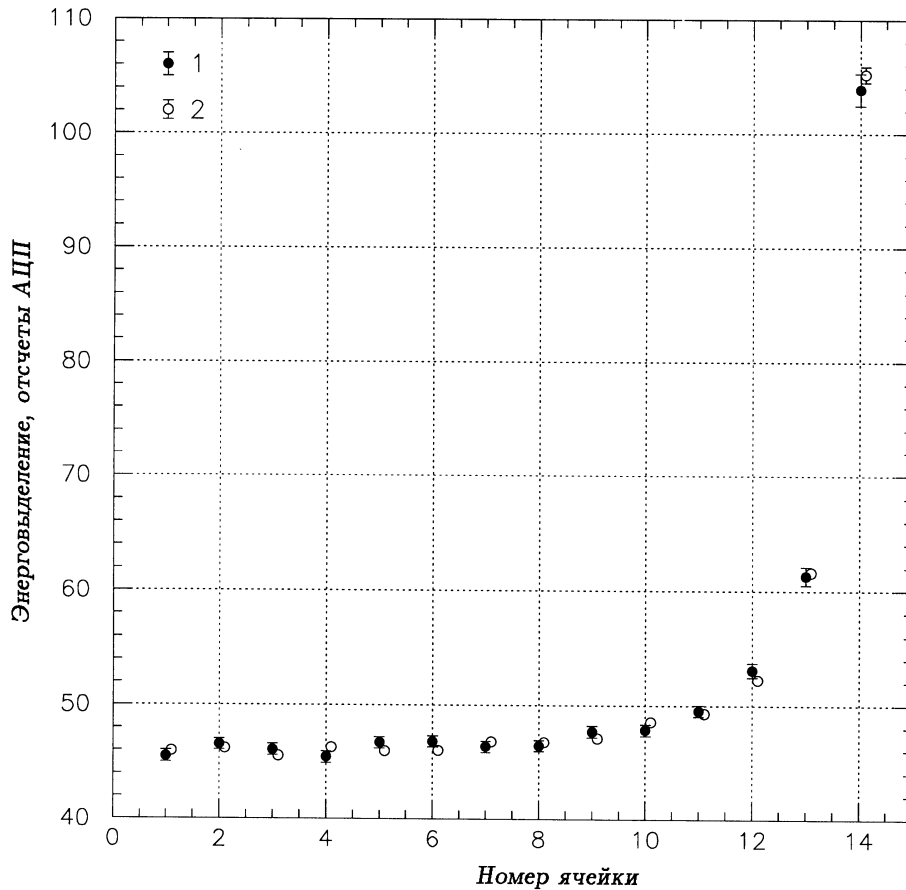


Рис. 5. Значения энерговывделений в 14 последних ячейках для останавливающихся в детекторе БАРС мюонов: 1 – экспериментальные данные; 2 – данные, полученные в результате моделирования программой GEANT с учетом экспериментальных значений порогов и шумов, переведенные в отсчеты АЦП с помощью калибровочного коэффициента $\epsilon=3,83$ отсч./МэВ.

Список литературы

- [1] Аникеев В.Б., Беликов С.В., Гилицкий Ю.В. и др. Большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС: Препринт ИФВЭ 97-32, Протвино, 1997.
- [2] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Кочетков В.И., Старцев В.С. — Препринт ИФВЭ 92-24, Протвино, 1992.
- [3] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Гутников Ю.Е. и др. — Препринт ИФВЭ 94-68, Протвино, 1994.// ПТЭ, 1995, т.2, с.43.
- [4] Lohmann W., Kopp R., Voss R. Energy Loss of Muons in the Energy Range 1–10000 GeV. — CERN 85-03, Geneva, 1985.

Рукопись поступила 26 августа 1998 г.

С.В.Беликов и др.

Калибровка калориметра БАРС останавливающимися мюонами.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 26.08.98. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1,1. Уч.-изд.л. 0,85. Тираж 150. Заказ 4. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

