

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 539.12

СЭМПЛИНГ-ФЛУКТУАЦИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАЛОРИМЕТРАХ

© 2021 г. В. Н. Горячев^а, *, С. П. Денисов^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение “Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Россия

*E-mail: Vladimir.goryachev@ihep.ru

Поступила в редакцию 12.06.2021 г.

После доработки 14.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

В работе представлены результаты расчетов сэмплинг-флуктуаций в Pb–LAr калориметрах типа “сэндвич”. Для генерации ЭМ ливней, инициированных электронами с энергиями E_0 от 20 до 500 ГэВ, использовался пакет GEANT4. Показано, что зависимость сэмплинг-флуктуаций от E_0 и толщины свинцового абсорбера x может быть описана формулой $kx^b/\sqrt{E_0}$. Показатель степени b слабо зависит от ширины жидкоаргонового слоя d и близок к $2/3$, а $k = 0.1985 - 0.0363 \ln d$ [мм].

Ключевые слова: калориметр, электромагнитный ливень, электрон, энергия, распределение, спектр, свинцовый абсорбер, жидкий аргон

DOI: 10.56304/S2079562920060275

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной вклад в стохастический член $a/E^{1/2}$ энергетического разрешения электромагнитных (ЭМ) калориметров типа “сэндвич”, состоящих из чередующихся слоев пассивного и активного вещества, дают так называемые сэмплинг-флуктуации (СФ), связанные со статистической природой ионизационных потерь энергии заряженными частицами в ЭМ ливне и их распределением между активными и пассивными слоями [1, 2]. В качестве пассивного вещества часто используется Pb, реже W, U, Fe, Cu. Активными слоями обычно являются жидкий аргон, сцинтилляторы или кремний.

СФ определяются только физическими процессами, протекающими в калориметре, и не зависят от его конструктивных недостатков (ограниченная толщина или наличие щелей между модулями) или метода регистрации сигналов. Таким образом, СФ определяют наилучшее значение энергетического разрешения, которое может быть достигнуто для данного калориметра. Цель настоящей работы – исследовать путем моделирования ЭМ ливней зависимость СФ от энергии ливня и структуры Pb–LAr калориметра типа “сэндвич”. Радиационные единицы длины X_0 были выбраны равными 6.37(Pb) и 19.55(LAr) г/см² [1].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМ ЛИВНЕЙ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Для моделирования ЭМ ливней использовался пакет GEANT4 10.01.p02 (Physical list FTFP_BERT) [3] с “обрезанием” по пробегу R_c ливневых частиц 100 мкм. Соответствующие пороги по энергии для e^+ , e^- и γ равны 232, 242 и 29 кэВ для Pb и 82, 83 и 2.0 для LAr. Было проверено, что изменение R_c до 700 мкм не влияет на величину СФ. ЭМ ливни генерировались для электронов с энергиями E_0 20, 40, 80, 200 и 500 ГэВ в калориметрах из 400 слоев Pb и LAr. Толщина x слоя Pb менялась от 0.2 до $0.9X_0$ с шагом $0.1X_0$, ширина d LAr промежутка составляла 2, 3, 4, 6 и 8 мм. Таким образом, минимальная полная толщина калориметров составляла $85.6X_0$ (при $x/X_0 = 0.2$ и $d = 2$ мм). Поперечный размер калориметров был выбран равным 1×1 м². Утечками энергии ЭМ ливней из калориметров таких размеров можно пренебречь (см. ниже).

Для каждого набора параметров E_0 , x , d было разыграно 10^4 событий. Для каждого события рассчитывались значения ионизационных потерь энергии в каждом из 400 слоев LAr. Типичное распределение событий по энергии E , выделившейся в LAr, показано слева на рис. 1. Все подобные распределения имеют “хвосты” в области малых E , растущие с увеличением E_0 . Оказалось, что “хвосты” связаны с фотоядерными реакциями: они исчезают, если при моделировании “выключить” сильные взаимодействия. События с

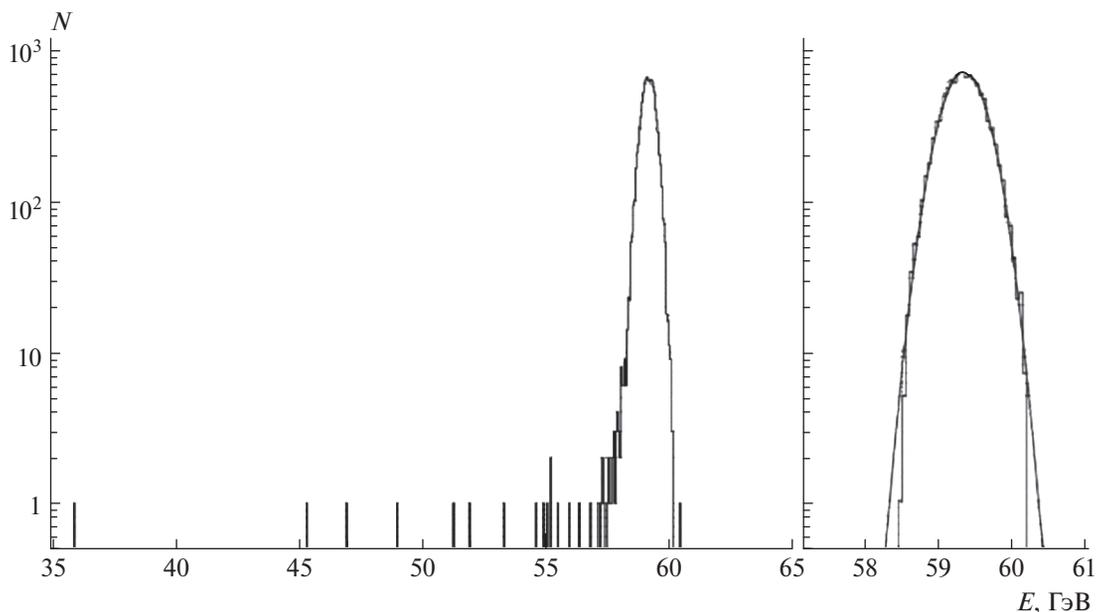


Рис. 1. Спектры ионизационных потерь энергии в жидкоаргоновых промежутках калориметра с 50 слоями Pb толщиной $0.6 X_0$ и LAg шириной 4 мм (всего $31.4X_0$). Слева—для всех событий, справа—для событий из интервала $\langle E \rangle \pm 3$ RMS, фитированный распределением Гаусса. Энергия $E_0 = 500$ ГэВ.

аномально малой энергией часто наблюдаются и при калибровке калориметров в пучке электронов, но они, как правило, связываются только с тормозным излучением электронов в веществе перед калориметром и исключаются путем введения “обрезания” на амплитуду сигнала (см., например, [4, 5]). В настоящей работе применялась похожая процедура: для оценки СФ использовались события из интервала $\langle E \rangle \pm 3$ RMS. Спектры $N(E)$ для отобранных событий хорошо фитировались

распределением Гаусса. Пример такого спектра показан справа на рис. 1. Его параметры: $\langle E \rangle = 59.34$, $\text{RMS} = 0.272$ и $\sigma = 0.281$ ГэВ. Для спектра слева на рис. 1 $\langle E \rangle = 59.17$ и $\text{RMS} = 0.472$ ГэВ.

На рис. 2. показан пример зависимости СФ от толщины калориметра l_c . Видно, что для $E_0 = 500$ ГэВ $\sigma/\langle E \rangle$ выходит на плато уже при $l_c \cong 30X_0$. Таким образом, флуктуациями утечек энергии в

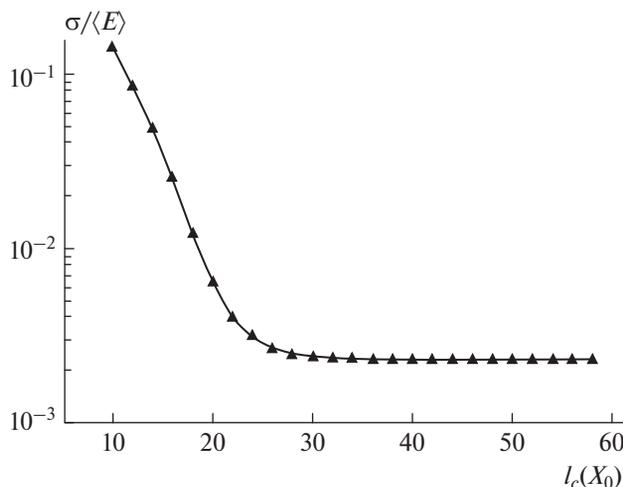


Рис. 2. Зависимость СФ от толщины калориметра с $x = 0.2 X_0$ и $d = 4$ мм при $E_0 = 500$ ГэВ.

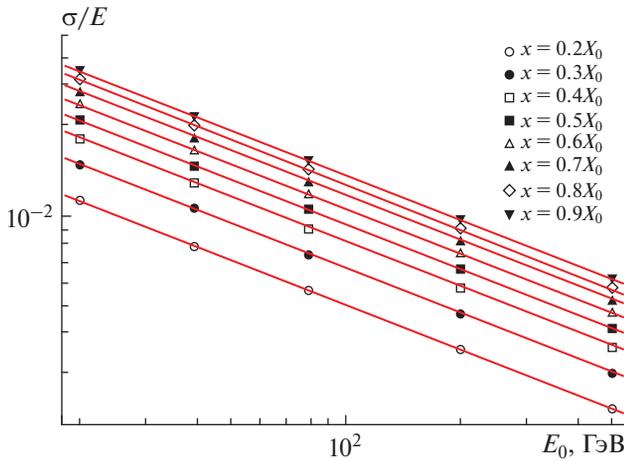


Рис. 3. Зависимости СФ от энергии и при $d = 4$ мм.

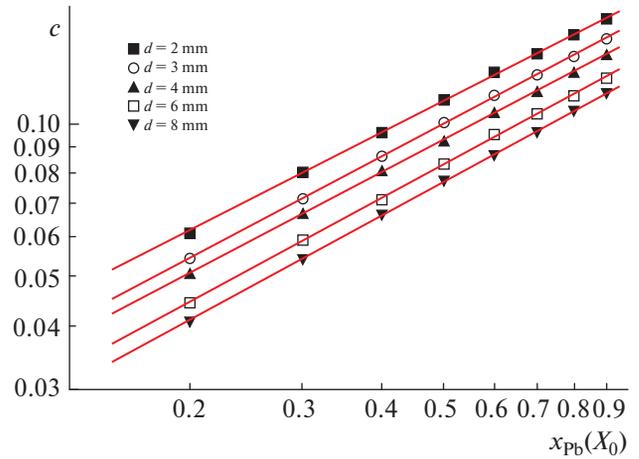


Рис. 4. Зависимости параметра c от x .

продольном направлении из калориметров с l_c более $30 X_0$. можно пренебречь.

3. ЗАВИСИМОСТЬ СЭМПЛИНГ-ФЛУКТУАЦИЙ ОТ ЭНЕРГИИ И СТРУКТУРЫ КАЛОРИМЕТРА

Зависимость СФ от E_0 хорошо фитируется степенной функцией

$$\sigma / \langle E \rangle = c / E_0^n, \quad (1)$$

для всех значений x и d (пример показан на рис. 3). Показатель степени n не зависит от x и d и его среднее значение 0.4988 ± 0.0005 близко к величине 0.5, ожидаемой для статистического характера процес-

сов в ЭМ ливне. Зависимость c от толщины абсорбера x также следует степенному закону

$$c = kx^b. \quad (2)$$

Значения c , рассчитанные при $n = 0.5$, приведены в табл. 1 и на рис. 4. Оказалось, что показатель степени b слабо зависит от d (рис. 5) и его среднее значение равно 0.666 ± 0.007 , а коэффициент k может быть представлен логарифмической функцией $k = (0.1985 \pm 0.0003) - (0.0363 \pm 0.0002) \ln d [\text{мм}]$ (рис. 6). Приведенные ошибки – статистические.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована зависимость сэмплинг-флуктуаций от энергии E_0 первичного электрона и структуры Pb-LAg калориметра типа “сэндвич” с

Таблица 1. Значения параметров c в формуле (1). Статистические погрешности не превышают 0.5%

x/X_0	$d, \text{ мм}$				
	2	3	4	6	8
0.2	0.0609	0.0542	0.0503	0.0442	0.0407
0.3	0.0807	0.0716	0.0665	0.0584	0.0539
0.4	0.0962	0.0869	0.0809	0.0712	0.0662
0.5	0.1113	0.1013	0.0936	0.0835	0.0773
0.6	0.1258	0.1142	0.1055	0.0946	0.0869
0.7	0.1371	0.1239	0.1166	0.1046	0.0963
0.8	0.1492	0.1359	0.1276	0.1141	0.1062
0.9	0.1602	0.1469	0.1366	0.1231	0.1148

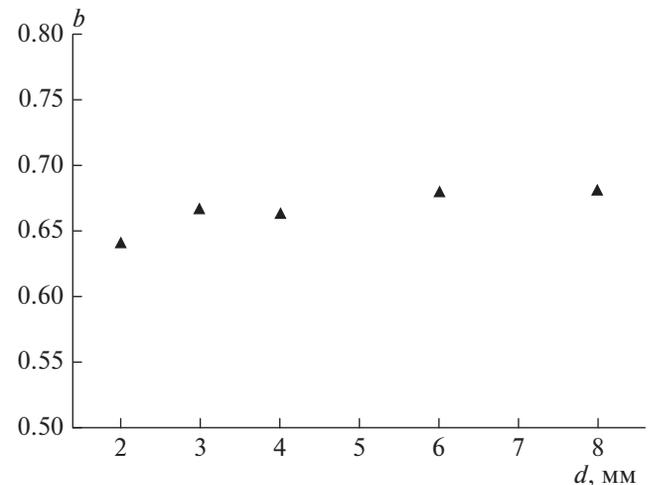


Рис. 5. Зависимость параметра b от ширины LAg промежуток d .

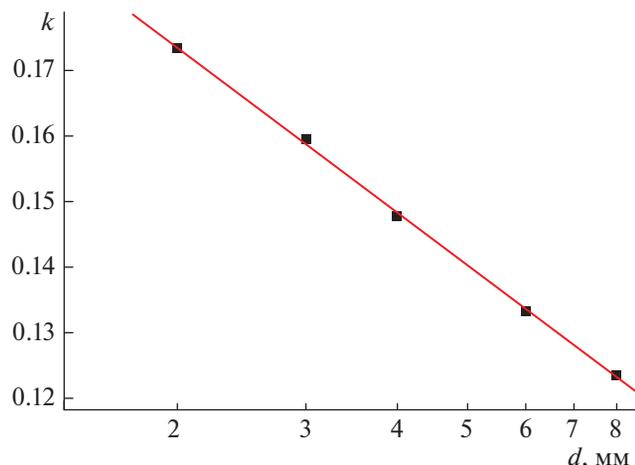


Рис. 6. Зависимость параметра k от ширины LAr промежутка d .

использованием пакета GEANT4. Показано, что эта зависимость хорошо описывается формулой $\sigma/\langle E \rangle = c(d,x)/\sqrt{E_0}$, где x – толщина абсорбера из свинца и d – ширина жидкоаргонового слоя. Коэффициент $c(d,x)$ следует степенному закону $k(d)x^b$. Показатель степени b слабо зависит от d и его среднее значение близко к $2/3$. Параметр k может

быть представлен логарифмической функцией $k = (0.1985 \pm 0.0003) - (0.0363 \pm 0.0002) \ln d[\text{мм}]$.

Так как СФ в калориметрах с одинаковыми ионизационными потерями энергии в активном и пассивном веществах близки, то полученные результаты могут быть использованы для оценки СФ в калориметрах из других материалов. Например, СФ в калориметрах с одинаковыми толщинами слоев из сцинтиллятора и LAr будут близки, поскольку ионизационные потери на ед. длины в сцинтилляторе и LAr примерно одинаковы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Т.З. Гуровой, Д.С. Денисову и Д.А. Стояновой за помощь в подготовке этой публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. <https://pdg.lbl.gov>.
2. *Bosetti M., Furetta C., Leroy C. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1994. V. 345. P. 244.
3. <http://cern.ch/geant4>.
4. *Binon F., Buyanov V.M., Donskov S.V. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1986. V. 248. P. 86.
5. *Gingrich D.M., Greeniaus G., Kitching P. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1995. V. 364. P. 290.

Sampling-Fluctuations in Electromagnetic Calorimeters

V. N. Goryachev¹, * and S. P. Denisov¹

¹*Institute for High Energy Physics of the National Research Centre “Kurchatov Institute”,
1 Nauki sq., Protvino, Moscow region, 142281 Russia*

**e-mail: Vladimir.Goryachev@ihep.ru*

Received June 12, 2021; revised June 14, 2021; accepted June 25, 2021

The paper presents the results of calculations of the sampling fluctuations in Pb–LAr electromagnetic sandwich calorimeters. The GEANT4 package was used to generate showers initiated by electrons with energies E_0 from 20 to 500 GeV. It is shown that the dependence of the sampling fluctuations on E_0 and the thickness of the lead absorber x can be described by the formula $kx^b/\sqrt{E_0}$. The exponent b weakly depends on the LAr gap width d and is close to $2/3$ and $k = (0.1985 \pm 3) - (0.0363 \pm 2)\ln d[\text{mm}]$.

Keywords: calorimeter, electromagnetic shower, electron, energy, distribution, spectrum, lead absorber, liquid argon