

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 520.6.05

КАЛИБРОВКА МАКЕТА КАЛОРИМЕТРА ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400 НА ПУЧКЕ ПОЗИТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ “ПАХРА”

© 2021 г. С. И. Сучков^{а,*}, А. И. Архангельский^б, В. А. Басков^а, А. М. Гальпер^{а,б},
О. Д. Далькаров^а, А. И. Львов^а, Н. Ю. Паппе^а, В. В. Полянский^а,
Н. П. Топчиев^а, И. В. Чернышева^б

^а Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^б Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

*e-mail: soutch@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.

После доработки 07.04.2021 г.

Принята к публикации 19.04.2021 г.

На электронном синхротроне С-25Р “Пахра” ФИАН проведена калибровка макета электромагнитного калориметра γ -телескопа ГАММА-400. Результаты измерения энергетического разрешения согласуются с результатами расчетов методом Монте-Карло характеристик калориметра ГАММА-400. Подтверждена возможность применения ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН для калибровок детекторов в различных экспериментах.

DOI: 10.31857/S003281622105013X

ВВЕДЕНИЕ

Российская космическая обсерватория с γ -телескопом ГАММА-400 создается в соответствии с Федеральными космическими программами России на 2009–2015 гг. и 2016–2025 гг. ГАММА-400 предназначен для исследования γ -излучения в диапазоне высоких энергий с высокими угловым и энергетическим разрешениями, а также для получения данных о природе “темной материи” во Вселенной, развития теории происхождения высокоэнергичных космических лучей и физики элементарных частиц [1–3]. В отличие от существующих спутниковых γ -телескопов Fermi-LAT [4] и AGILE [5], ГАММА-400 обладает лучшими характеристиками: высокими угловым, $\sim 0.01^\circ$, и энергетическим, $\sim 2\%$, разрешениями при энергии γ -квантов 100 ГэВ.

КАЛИБРОВОЧНЫЙ ПУЧОК ЭЛЕКТРОНОВ (ПОЗИТРОНОВ) УСКОРИТЕЛЯ С-25Р

Калибровка макетов детекторов и самих детекторов различных экспериментальных установок на пучках заряженных частиц крайне необходима для проверки характеристик детекторов, их настройки, сравнения с результатами расчетов и отладки программного обеспечения. В настоящее время электронный синхротрон С-25Р “Пахра” в г. Троицке (рис. 1) является единственным в Рос-

сии постоянно работающим ускорителем, генерирующим пучки электронов и позитронов с энергиями от 100 до 500 МэВ [6].

Для осуществления ряда крупных национальных и международных проектов в области фундаментальной ядерной физики и астрофизики на ускорителе ФИАН “Пахра” был создан калибровочный канал квазимонохроматических вторичных электронов (позитронов) [6, 7].

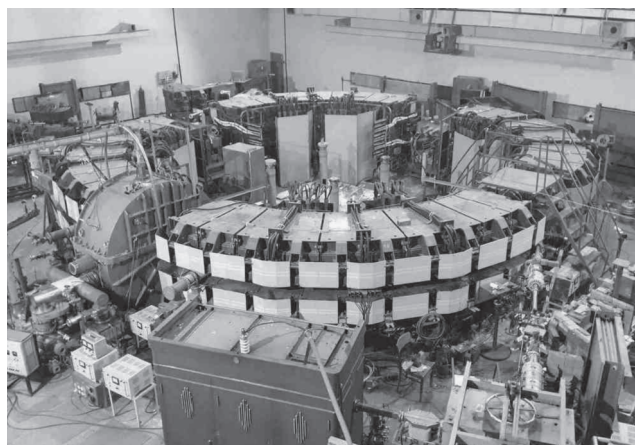


Рис. 1. Электронный синхротрон С-25Р “Пахра” ФИАН (г. Троицк).

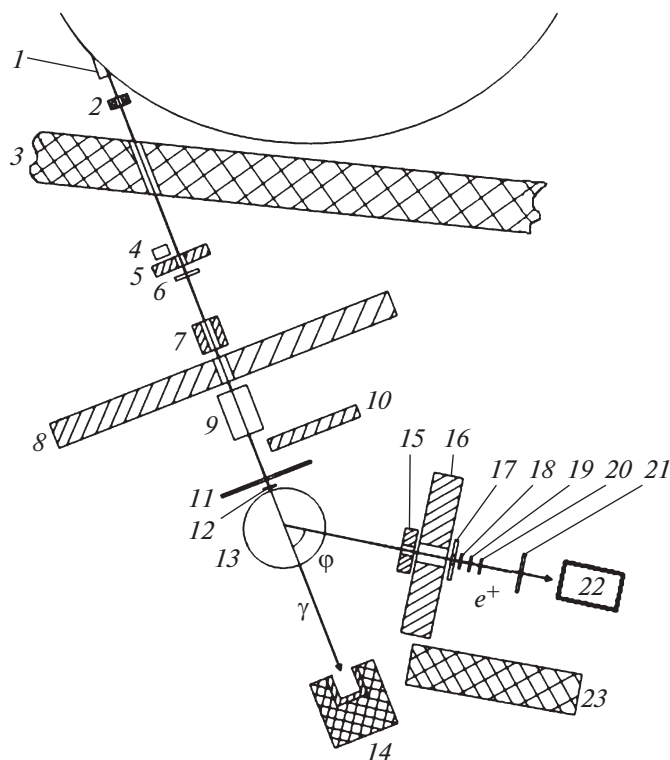


Рис. 2. Схема калибровочного квазимонохроматического пучка вторичных электронов. 1 — выходное окно камеры ускорителя; 2 — коллиматор; 3 — бетонная стена ускорительного зала; 4 — монитор “растяжки”; 5, 7, 16 — коллиматоры; 6 — монитор пучка; 8 — протяженная свинцовая стенка; 9 — очищающий магнит СП-3; 10 — дополнительная свинцовая стенка; 11 — металлическая плита; 12 — конвертер; 13 — магнит СП-57; 14 — поглотитель фотонного пучка; 15 — дополнительный коллиматор перед основным; 17 — сцинтилляционный счетчик антисовпадений; 18–21 — сцинтилляционные счетчики; 22 — калибруемый детектор; 23 — бетонный блок.

Схема калибровочного пучка представлена на рис. 2. Тормозной пучок фотонов, образованный в результате сброса электронов в кольцо на внутреннюю мишень, после выхода из камеры ускорителя 1 формируется свинцовым коллиматором 2 с диаметром отверстия 13 мм, расположенным на расстоянии 3.2 м от выходного фланца ускорителя. Далее, пучок по воздуху транспортируется к конвертеру 12, находящемуся непосредственно на срезе полюсов магнита СП-57 (13). В магните осуществляется разделение выходящих из конвертера позитронов и электронов по импульсам. Вторичный пучок позитронов (электронов) (в зависимости от направления магнитного поля между полюсами магнита СП-57) формируется под углом $\varphi = 36^\circ$ с помощью коллиматоров и выделяется системой сцинтилляционных счетчиков 17–21, расположенных вдоль траектории электронного (позитронного) пучка за коллиматором 16. В связи с тем что калибровочный пучок вторичных позитронов имеет меньший фон по сравнению с пучком электронов, для тестирования и калибровки макетов детекторов γ -телескопа ГАММА-400 использовался пучок позитронов. Сцинтилляци-

онный счетчик антисовпадений 17 размером $60 \times 90 \times 10$ мм и с диаметром отверстия $\varnothing 10$ мм предназначен для формирования позитронного пучка и устранения частиц, рассеянных от краев коллиматора. Сцинтилляционные счетчики 18–21 являются триггерными счетчиками и имеют размер $15 \times 15 \times 1$ мм. Положение счетчиков 17–20 относительно коллиматора 16 постоянно, положение и размер счетчика 21 зависят от условий калибровки исследуемого детектора. Юстирование исследуемого детектора на калибровочном пучке относительно траектории пучка осуществляется с помощью лазера, расположенного на геонометрической подставке.

Основные характеристики квазимонохроматического калибровочного пучка позитронов, использованного при калибровке макета калориметра γ -телескопа ГАММА-400, следующие:

- диапазон энергий позитронов $E = 30\text{--}300$ МэВ;
- относительный разброс по энергиям калибровочного пучка $\sigma \approx 5\%$ при энергии позитронов 300 МэВ, диаметре коллиматора 16 10 мм и толщине медного конвертера 1 мм;

– интенсивность $\sim 20 e^+/c$.

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

Гамма-телескоп ГАММА-400 с высокими угловым и энергетическим разрешениями предназначен для установки на российской космической обсерватории, которая будет выводиться на высокоэллиптическую орбиту с апогеем до 300000 км [1–3]. Основные научные задачи:

– измерение космического γ -излучения в диапазоне энергий от 20 МэВ до 1000 ГэВ;

– регистрация космического γ -излучения, γ -всплесков от активных астрофизических объектов разной природы (активные галактические ядра, блазары, пульсары, нейтронные звезды, остатки сверхновых, черные дыры, красные карлики и др., а также Солнце);

– поиск особенностей в энергетических спектрах от дискретных и протяженных источников, которые могут быть связаны с частицами “темной материи”;

– регистрация γ -излучения от дискретных переменных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках;

– проведение детальных обзоров и картографирования галактической плоскости, центра Галактики, протяженных источников с высокими угловым, энергетическим разрешениями и высокой чувствительностью;

– регистрация потоков электронов и позитронов космических лучей.

Физическая схема γ -телескопа ГАММА-400 представлена на рис. 3.

Одним из основных элементов γ -телескопа ГАММА-400 является калориметр, состоящий из позиционно-чувствительного калориметра KK_1 толщиной $2X_0$ (X_0 – радиационная единица длины) и электромагнитного калориметра KK_2 . Электромагнитный калориметр KK_2 состоит из 484 кристаллов CsI(Tl), его толщина составляет от $13X_0$ до $16X_0$ для электромагнитного ливня вдоль оси симметрии кристалла в продольном направлении (окончательно толщина калориметра и число кристаллов будут определены после выбора ракеты-носителя и уточнения массы научной аппаратуры). При регистрации частиц с боковых направлений (с помощью боковой апертуры KK_2) толщина KK_2 составляет $42.5X_0$.

В дальнейшем мы будем рассматривать только калориметр KK_2 в связи с особой сложностью его разработки, изготовления и тестирования. Калориметр KK_2 представляет собой сборную конструкцию (рис. 4), состоящую из силового алюминиевого корпуса, углепластиковых ячеек с толщиной стенок 0.4 мм, в которые вставлены

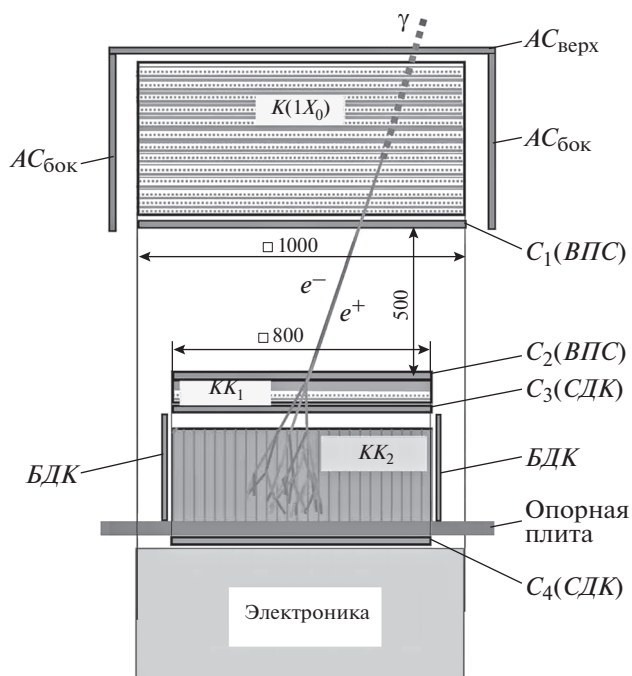


Рис. 3. Схема γ -телескопа ГАММА-400. АС – система антисовпадений (верхний АС_{верх} и боковые АС_{бок} детекторы); К – конвертер-трекер; C₁, C₂ – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы (ВПС); C₃, C₄ – сцинтилляционные детекторы калориметра (СДК); KK₁ – позиционно-чувствительный калориметр; KK₂ – электромагнитный калориметр; БДК – боковые детекторы (4 шт.) калориметра KK₂.

детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и кремниевых фотоприемников SiPM. Общая масса KK_2 составляет 800–1000 кг (в зависимости от длины кристаллов). Положение каждого кристалла фиксируется в пространстве позиционирующей конструкцией, которая определяет положение кристаллов с точностью не хуже ± 200 мкм. В качестве позиционирующей конструкции используются кассеты из углепластика. Кассета содержит два ряда ячеек с кристаллами, по двадцать две ячейки в каждом ряду. Кассеты стягиваются в общий блок прижимными планками, зажимаются боковыми стенками, опорной рамой и крышкой. Проведенные расчеты по определению частот собственных колебаний и напряженно-деформированного состояния показали, что конструкция калориметра KK_2 удовлетворяет требованиям прочности и жесткости.

МАКЕТ КАЛОРИМЕТРА KK_2 ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400

Для проведения тестирования и калибровок был изготовлен макет калориметра KK_2 . Он пред-

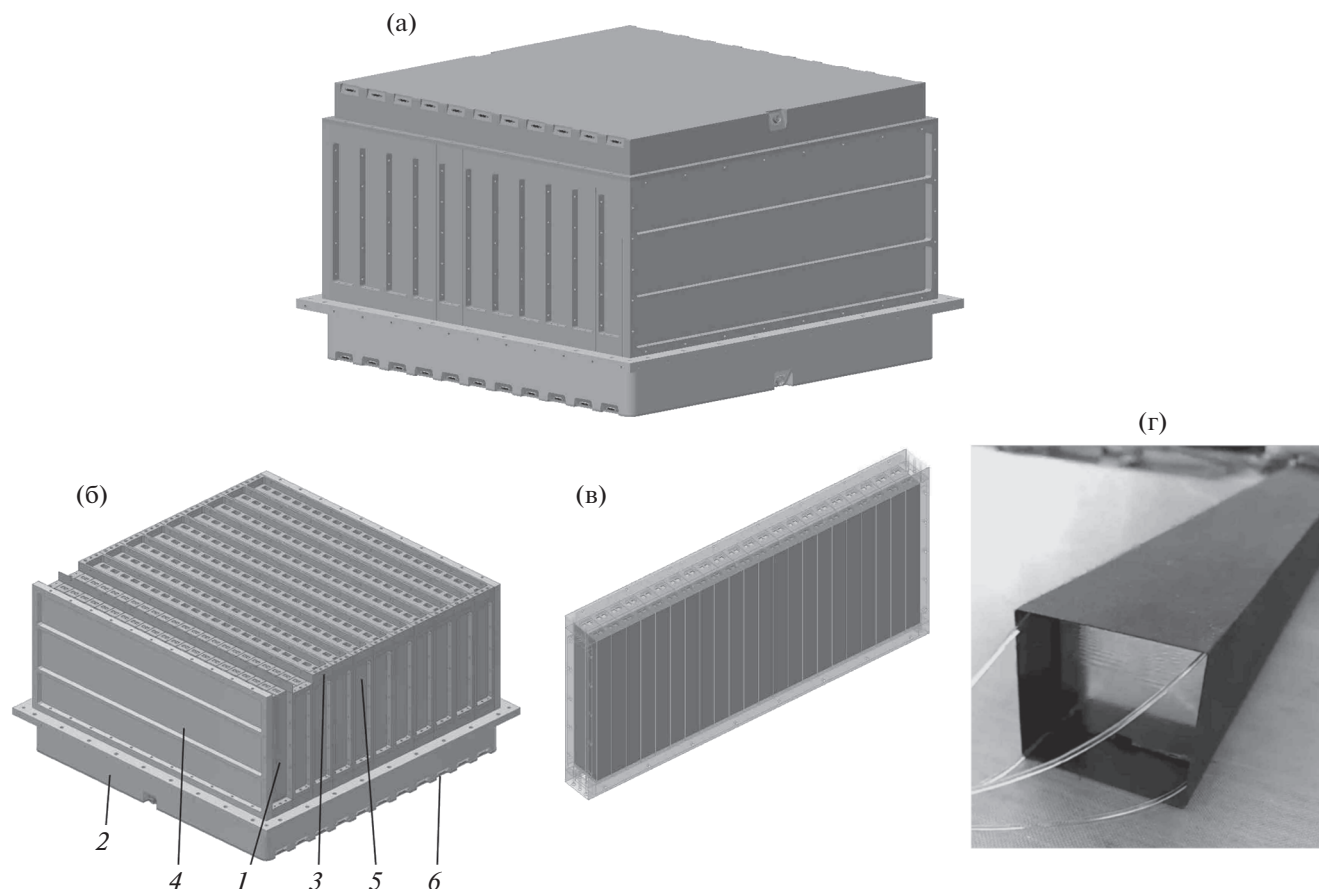


Рис. 4. Калориметр KK_2 γ -телескопа ГАММА-400: **а** – внешний вид; **б** – без верхней и боковой крышек; **в** – кассета из углепластика; **г** – углепластиковая ячейка со сцинтиллятором CsI(Tl). 1 – детектор; 2 – опорная решетка; 3 – прижимная планка; 4 – боковые панели тип 1; 5 – боковые панели тип 2; 6 – нижняя панель.

ставляет собой сборку из четырех детекторов на основе кристаллов CsI(Tl) (размер каждого кристалла $36 \times 36 \times 372$ мм) (рис. 5). Кристаллы отполированы и обернуты тайвеком. Для регистрации светового сигнала к торцу каждого кристалла подсоединены два светоприемника SiPM SensL MicroSB-60035-X13 размером 6×6 мм. Детекторы помещены в светонепроницаемый блок из алюминиевого сплава.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКЕТА КАЛОРИМЕТРА KK_2

Модельные расчеты физических характеристик макета калориметра KK_2 γ -телескопа ГАММА-400 проведены с учетом процессов рождения, распространения и регистрации фотонов оптических длин волн в сцинтилляционных кристаллах CsI(Tl) при развитии электромагнитного ливня от моноэнергетического пучка позитронов. Оптические фотоны сцинтиллятора CsI(Tl) регистрируют-

ся светоприемником с заданной эффективностью и участвуют в формировании выходного сигнала.

Расчеты проводились с использованием пакета программ GEANT4, в котором для описания процессов и моделей, характеризующих сечения и вероятности процессов взаимодействия частиц с веществом, использовался стандартный набор библиотек PhysicsList, дополненный библиотекой G4OpticalPhoton, содержащей характеристики процессов с участием оптических фотонов и процедуры их обработки.

Для практического применения при моделировании сцинтилляционных материалов и их характеристик необходимо учитывать процессы, происходящие при рождении сцинтилляций (световыход и его флуктуации), распространении света в веществе (поглощение, рассеяние на флуктуациях плотности или примесях) и взаимодействии с границами сред (отражение, преломление, поглощение при переходе фотонов из сцинтиллятора в светоприемники), а также характеристики и структуру самого светоприемника.

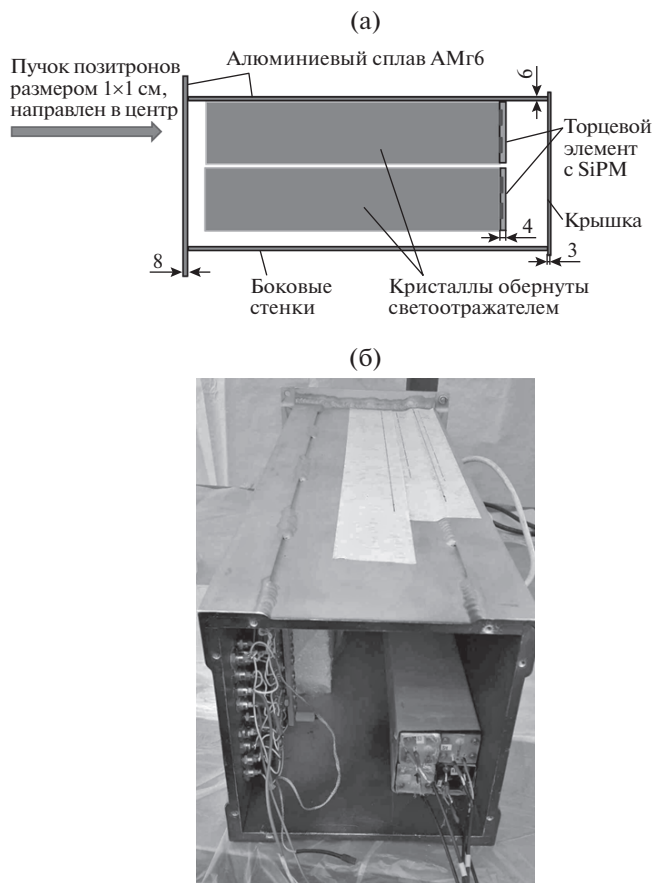


Рис. 5. Макет KK_2 из четырех кристаллов: а — схема (размеры даны в миллиметрах), б — фотография.

Учет данных факторов позволяет максимально приблизиться к оценке реального энергетического разрешения, определяемого флуктуациями световых выходов сцинтилляционного кристалла, потерями света в веществе при его распространении по пути к светоприемнику, влиянием границ со-

прикосновения кристалла и светоприемника и границ самого кристалла, эффективностью поглощения в светоприемнике.

При моделировании использовалась схема макета KK_2 , описанная выше. На рис. 6 показана схема моделирования макета KK_2 с расположением осей, светоприемников SiPM в геометрии, когда пучок позитронов падает по нормали к торцу одного из кристаллов. Апертура плоскопараллельного моноэнергетического пучка позитронов с энергиями 100, 200 и 300 МэВ была определена площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с равномерным распределением частиц.

Кристаллы CsI(Tl) (см. рис. 6) обозначены чувствительными объемами с номерами № 1, 2, 3 и 4. Определялись полное энерговыделение внутри них и количество фотонов, рожденных в результате как сцинтилляций со световых выходов 54 фотона/кэВ, так и черенковского излучения. Пучок позитронов направлялся на центр торца углового кристалла № 4. Как было указано, на торцах кристаллов установлено по два SiPM размером $6 \times 6 \text{ мм}$. Каждый из них формирует оптически прозрачную поверхность соприкосновения с кристаллом площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$. При попадании фотонов на эту поверхность происходит фиксация фотонов, согласно как заданным характеристикам SiPM как оптического объема (коэффициент преломления и длина поглощения), так и характеристикам границы соприкосновения (коэффициент отражения и квантовая эффективность).

КАЛИБРОВКА МАКЕТА КАЛОРИМЕТРА KK_2 НА ПУЧКЕ ПОЗИТРОНОВ

На пучке моноэнергетических позитронов с энергией 100–300 МэВ была проведена калибровка макета KK_2 γ -телескопа ГАММА-400. Схема установки макета KK_2 на пучке приведена на рис. 2. Комплекс измерительной аппаратуры, использовавшийся для калибровки, приведен на рис. 7.

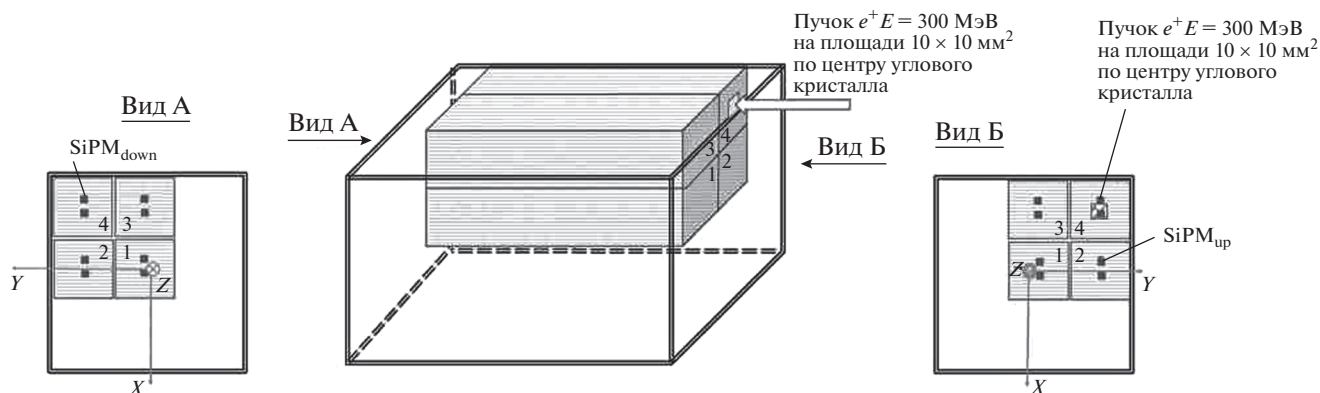


Рис. 6. Схема макета KK_2 , использованная при моделировании.

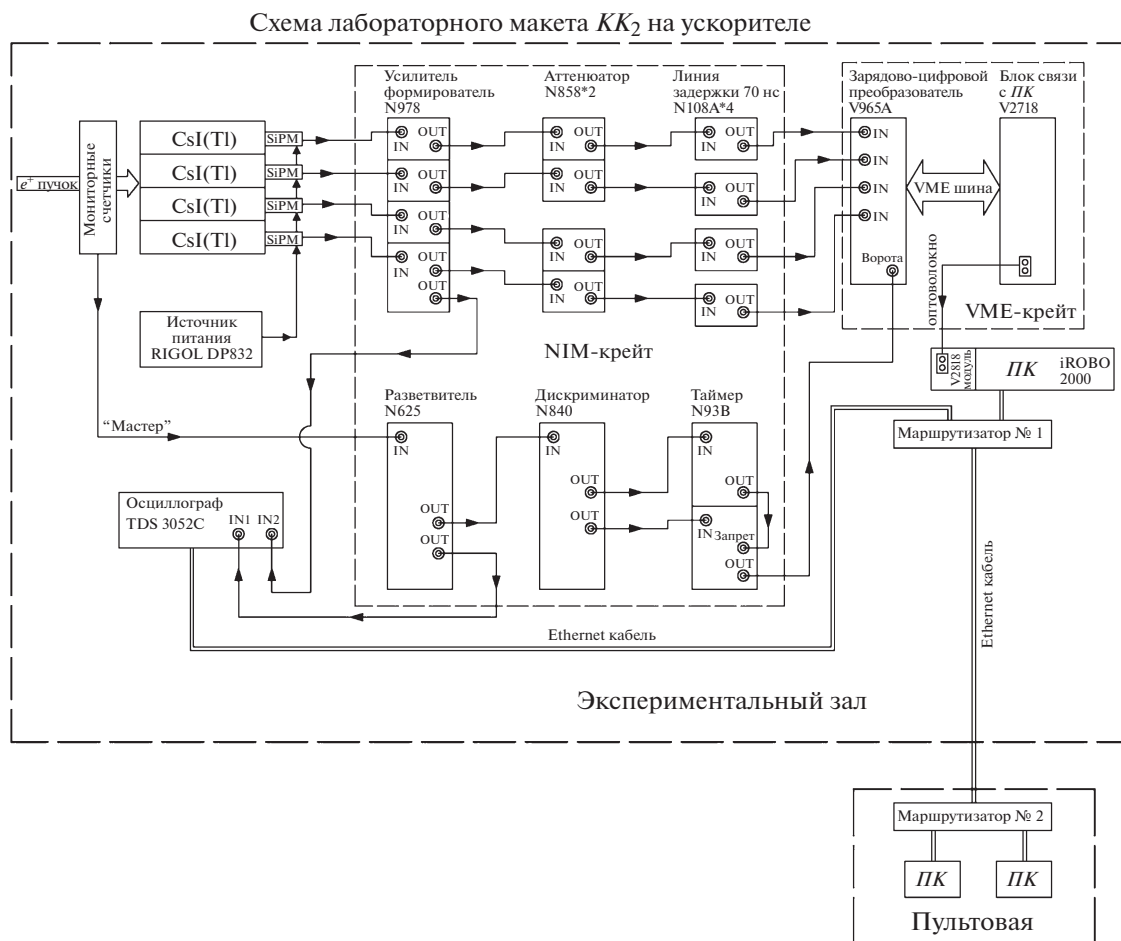


Рис. 7. Комплекс измерительной аппаратуры для калибровки макета. RIGOL DP832 – источник питания; Tektronix S3032C – осциллограф цифровой; Tektronix AFG3022C – генератор; NIM – крейт с блоком питания N8301/60; N 978 CAEN – усилитель формирователь; N 840 CAEN – дискриминатор; N108A – линии задержки; N 858 CAEN – аттенюатор; N 93B CAEN – таймер; VME – крейт с блоком питания VME8200; V965A CAEN – зарядово-цифровой преобразователь QDC; ПК – персональный компьютер с программным обеспечением работы QDC PC iROBO 2000; VX 2718 KIT CAEN – блок связи с персональным компьютером (ПК).

Для обеспечения связи между комплексом измерительной аппаратуры в экспериментальном зале и пульту использовалась система удаленного доступа, состоящая из маршрутизатора № 1 в экспериментальном зале, к которому были подключены находящиеся здесь же сетевые устройства комплекса измерительной аппаратуры (ос-

циллограф и персональный компьютер), кабели, соединяющие маршрутизатор № 1 и маршрутизатор № 2 в пульту, где находился персонал во время работы ускорителя. Маршрутизатор № 2 соединен с сервером, имеющим выход в Интернет.

Перед проведением калибровки проведен подбор параметров электроники: коэффициента ат-

Таблица 1. Влияние толщины конвертера на энергетическое разрешение пучка позитронов при энергии 300 МэВ

Толщина конвертера из Cu, мм	Энергетическое разрешение σ пучка позитронов с учетом разрешения KK_2 , %	Интенсивность пучка позитронов, Гц
3	10.0	17
1	10.1	16
0.1	10.0	7.2
Без конвертера (конверсия на молекулах воздуха)	9.8	7.0

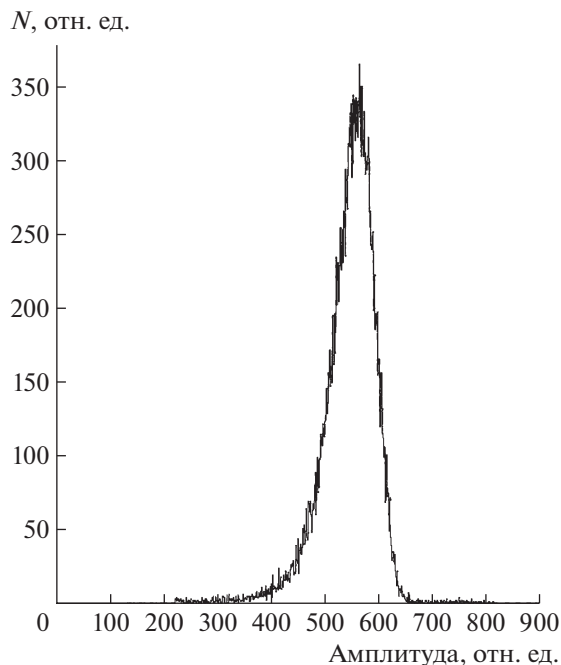


Рис. 8. Пример полученного распределения при облучении пучком позитронов с энергией 300 МэВ.

тенюатора, ширины ворот зарядово-цифрового преобразователя QDC (Charge-to-Digital Converter) с учетом параметров сигнала регистрации частиц, величины задержки.

На первом этапе калибровки было исследовано влияние толщины конвертера (поз. 12 на рис. 2) на энергетическое разрешение пучка позитронов при энергии 300 МэВ. Результаты исследования представлены в табл. 1. Видно, что толщина медного конвертера практически не влияет на энергетическое разрешение пучка. В дальнейшем при калибровке использовался медный конвертер толщиной 1 мм.

На втором этапе калибровки макета KK_2 были исследованы его энергетические характеристики при энергиях пучка позитронов 100, 200 и 300 МэВ. Пример полученного распределения при облучении пучком позитронов с энергией 300 МэВ показан на рис. 8. Обнаружено, что полученное при облучении пучком позитронов энергетическое разрешение макета калориметра и результаты модельных расчетов его физических характеристик в пределах экспериментальных ошибок совпадают (рис. 9). Энергетическое разрешение макета при энергии позитронов 300 МэВ составило 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе калибровки макета калориметра KK_2 γ -телескопа ГАММА-400 проведены измерения энергетического разрешения макета на основе

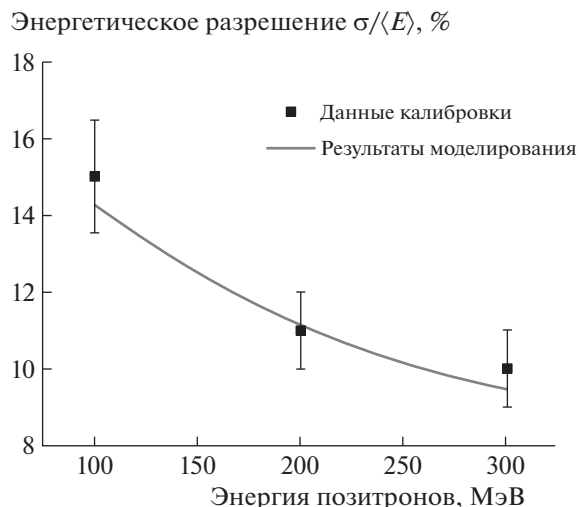


Рис. 9. Энергетическое разрешение макета калориметра KK_2 : линия — расчет, точки — результаты калибровки.

сцинтилляторов CsI(Tl). Результаты измерений показали, что энергетическое разрешение не хуже 10% при энергии позитронов 300 МэВ.

Результаты исследований характеристик макета калориметра KK_2 γ -телескопа ГАММА-400 на калибровочном пучке позитронов ускорителя С-25Р “Пахра” ФИАН согласуются в пределах экспериментальных ошибок с результатами расчетов методом Монте-Карло.

Подтверждена возможность использования электронного синхротрона С-25Р “Пахра” ФИАН (г. Троицк) для калибровки детекторов ядерно-физической аппаратуры, включая аппаратуру для космического применения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-40061 и контракта с Роскосмосом № 024-5004/16/224.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galper A.M., Topchiev N.P., Yurkin Yu.T. // Astronomy Reports. 2018. V. 62. № 12. P. 882. <https://doi.org/10.1134/S1063772918120223>
2. Topchiev I. N.P., Galper A.M., Arkhangel'skaja I.V., Arkhangel'skiy A.I., Bakaldin A.V., Chernysheva I.V., Dalkarov O.D., Egorov A.E., Gusakov Yu.V., Kheymits M.D., Leonov A.A., Naumov P.Yu., Pappe N.Yu., Runtso M.F., Stozhkov Yu.I., Suchkov S.I., Yurkin Yu.T., Zverev V.G. // IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1181. № 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012041>

3. Leonov A.A., Galper A.M., Topchiev N.P., Bakaldin A.V., Kheimits M.D., Mikhailova A.V., Mikhailov V.V., Suchkov S.I. // *Physics of Atomic Nuclei*. 2019. V. 82. № 6. P. 855.
<https://doi.org/10.1134/S1063778819660359>
4. Atwood W.B., Abdo A.A., Ackermann M., Althouse W., Anderson B., Axelsson M., Baldini L., Ballet J., Band D.L., Barbiellini G., Bartelt J., Bastieri D., Baughman B.M., Bechtol K., B'ed'er'ede D., Bellardi F., Bellazzini R., Berenji B., Bignami G.F., Bisello D. et al. // *The Astrophysical Journal*. 2009. V. 697. P1071.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071>
5. Tavani M., Barbiellini G., Argan A., Boffelli F., Bulgarelli A., Caraveo P., Cattaneo P.W., Chen A.W., Cocco V., Costa E., D'Ammando F., del Monte E., de Paris G., di Cocco G., di Persio G., Donnarumma I., Evangelista Y., Feroci M., Ferrari A., Fiorini M., Fornari F. et al. // *The AGILE mission. Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 502. P. 995.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810527>
6. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С. // *ПТЭ*. 2019. № 2. С. 5.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020162>
7. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Кольцов А.В., Полянский В.В., Сидорин С.С. // *КСФ*. 2020. № 7. С. 18.
<https://doi.org/10.3103/S1068335620070027>