XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова: Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. Секция «Физика космических лучей и солнечно-земных связей»

Расчет эффективной площади многоцелевого детектора мюонов в широком диапазоне зенитных углов

П. И. Сушкова,* И. Ю. Трошин, Е. А. Задеба
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31
(Поступила в редакцию 15.04.2025; подписана в печать 17.04.2025)

Для изучения мюонной компоненты широких атмосферных ливней в настоящее время разрабатывается проект Многоцелевого детектора мюонов на территории НИЯУ МИФИ в Научно-образовательном центре НЕВОД. Основная цель установки — анализ мюонной компоненты широких атмосферных ливней в диапазоне зенитных углов от 0° до 60° с помощью метода спектров локальной плотности мюонов. Для использования метода нужно знать эффективную площадь детектора для всех исследуемых направлений регистрации частиц.

В настоящей работе представлены расчеты по определению эффективной площади Многоцелевого Детектора Мюонов в зависимости от зенитных углов приема частиц. Для определения эффективной площади детектора написана программа, моделирующая прохождение частиц через основные компоненты установки. В модель заложена геометрия детектора, взаимное расположение дрейфовых камер и стальных поглотителей. Эффективная площадь в программе вычислялась с применением метода Монте–Карло.

PACS: 96.50.S-, 96.50.sd, 13.85.Tp УДК: 524.1
Ключевые слова: мюоны, космические лучи, дрейфовые камеры, эффективная площадь.

ВВЕДЕНИЕ

На территории НИЯУ МИФИ на базе Научно-образовательного центра НЕВОД [1] разрабатывается проект Многоцелевого детектора мюонов (МДМ) [2] для изучения мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) в диапазоне энергий от 10^{14} до 10^{17} эВ, генерируемых космическими лучами высоких энергий, и ряда прикладных задач. Детектор предназначен для регистрации частиц в диапазоне зенитных углов от 0° до 60° и анализа околовертикальных мюонов ШАЛ сверхвысоких энергий с использованием метода спектров локальной плотности мюонов [3].

Многоцелевой детектор мюонов представляет собой массив многопроволочных дрейфовых камер (ДК) [4, 5], экранированных слоями поглотителя (рис. 1). Габариты детектора: высота 1.8 м, ширина и длина по 4.5 м. В каждом слое два уровня ДК, ориентированных перпендикулярно друг другу. Верхний слой стального поглотителя толщиной 210 мм играет ключевую роль в снижении фона, создаваемого космическими частицами низких энергий. Промежуточный слой толщиной 105 мм не только дополнительно уменьшает этот фон, но и выполняет важную функцию отклонения вторичных частиц, рожденных в самой установке, от их первоначальной траектории.

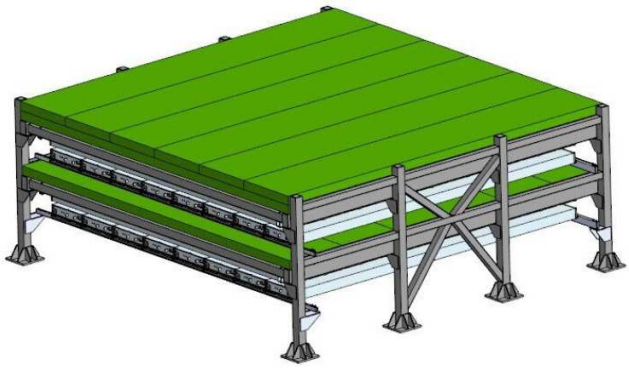

Рис. 1. Визуализация детектора МДМ: ДК (светло-серый), стальной поглотитель (зеленый) и рамная конструкция (серый)

В МДМ частицы регистрируются с помощью ДК. ДК представляет параллелепипед размером $4000 \times 508 \times 112$ мм^3, внутренний объем которого заполнен газовой смесью, состоящей из 94% Ar и 6% CO_2. На рис. 2 показано поперечное и продольное сечения камер.

Вдоль ДК натянуты 4 типа проволок: сигнальные проволоки, регистрирующие образовавшийся каскад из электронов; защитные, для устранения краевых

* polina.sushkova.02@list.ru

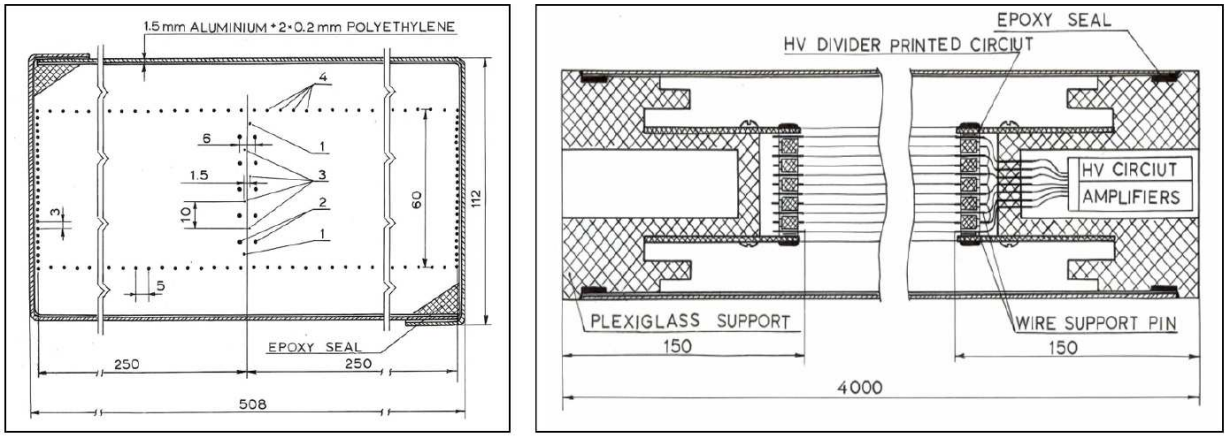

Рис. 2. Поперечное (слева) и продольное (справа) сечение ДК. Для поперечного сечения: 1 – охранные, 2 – катодные, 3 – сигнальные, 4 – полеформирующие проволоки

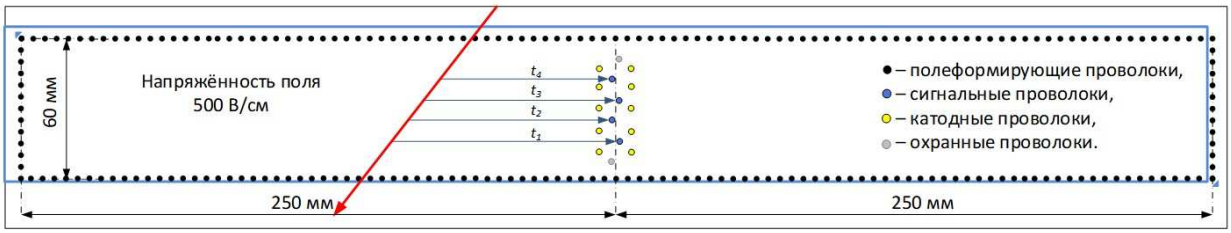

Рис. 3. Принцип работы ДК

эффектов; полеформирющие и катодные проволоки, создающие электростатическое поле напряженностью 500 В/см для обеспечения постоянной скорости дрейфа электронов. Для однозначного определения, с какой стороны относительно центра пролетела частица, сигнальные проволоки смещены от центра на величину 0.75 мм влево и вправо от оси в шахматном порядке.

При прохождении заряженной частицы через рабочий объем камеры в результате ионизации образуется облако электронов, которое под действием постоянного электрического поля дрейфует к сигнальным проволокам в центре ДК. Рядом с четырьмя сигнальными проволоками напряженность поля на порядок выше, поэтому в этой области происходит газовое усиление порядка 10^6. По данным ДК определяются времена дрейфа до каждой проволоки, с помощью которых можно реконструировать проекцию трека частицы на плоскость торца камеры. Принцип работы ДК показан на рис. 3, где красной стрелкой обозначен трек заряженной частицы.

После прохождения частицы через ДК можно реконструировать проекционный зенитный угол ее трека. Для трехмерной реконструкции необходимо, чтобы частица прошла через два слоя ДК, ориентированных перпендикулярно друг другу. В таком случае получается две проекции трека частицы на две различные перпендикулярные плоскости, по которым реконструируется трехмерное представление трека.

В МДМ будут изучаться частицы, которые пройдут через оба слоя ДК и поглотителей. Поэтому на основе геометрии детектора (рис. 4) определен предельный рассматриваемый зенитный угол регистрации МДМ: $\theta_{\text{theor}} = 81.2°$.

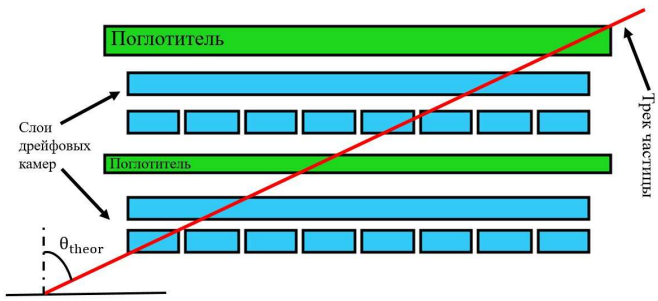

Рис. 4. Схема МДМ: поглотители (зеленый), ДК (голубой) и трек частицы (красный)

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКОСТИ МДМ

Для определения эффективной площади МДМ разработана программа, моделирующая прохождение частиц через детектор. В моделировании учитывается

только геометрия, без физических свойств поглотителей и ДК. Для каждого зенитного и азимутального угла строится плоскость площадью S_0, с которой изотропно генерируется поток частиц в направлении детектора (рис. 5). В модели поглотители представлены в виде двух параллелепипедов, а для каждой ДК определен эффективный объем, через который должна пройти частица, чтобы быть зарегистрированной. Отбор частиц происходит по следующим критериям: частица должна пройти через оба поглотителя и через все четыре слоя, состоящих из ДК.

Визуальное представление работы программы показано на рис. 5, где нарисованы детектор, система координат, определяющая положение плоскости, в которой генерируются частицы, и плоскость генерации S_0. Показаны примеры треков частиц: синим – идеальный трек, прошедший через все компоненты детектора, красным – трек, не прошедший через детектор полностью или частично.

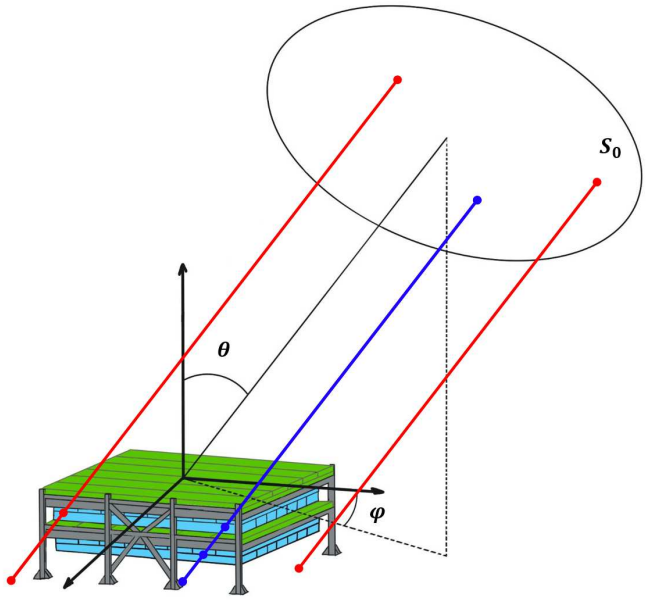

Рис. 5. Визуальное преставление работы программы

В начале для проверки ПО по моделированию и поиску оптимальных параметров было проведено моделирование прохождения частиц через две плоскости: плоскость верхнего поглотителя размером 4.5×4.5 м^2 и плоскость в центре слоя дрейфовых камер 4×4 м^2.

Если рассматривать прохождение частиц через плоскость, то эффективная площадь будет зависеть только от фактической площади объекта и косинуса угла между нормалью к плоскости и направлением прилета частиц, в данном случае от косинуса зенитного угла. Получается, эффективная площадь S_{eff} не зависит от азимутального угла и выражается следующим образом:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{fact}} \cos(\theta), \tag{1}$$

где S_{fact} — площадь плоскости, θ — зенитный угол прихода частиц.

Проведено сравнение значений эффективной площади, полученных из моделирования, с расчетными значениями, вычисленными с помощью формулы 1. На рис. 6 приведен график зависимости эффективной площади от зенитного угла прихода частиц. Зависимость эффективной площади слоя поглотителя и ДК от зенитного угла прилета частиц хорошо описываются формулой (1).

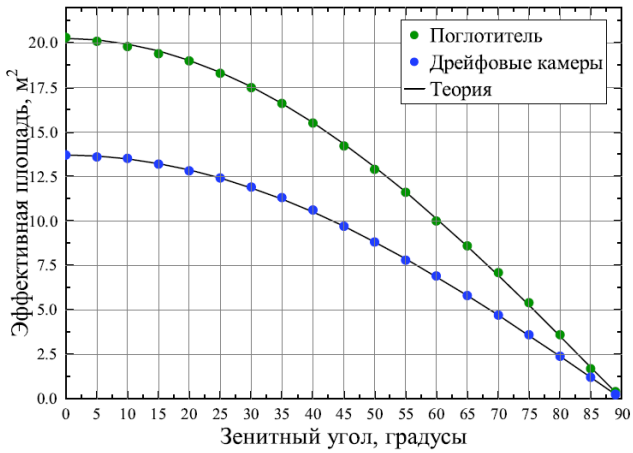

Рис. 6. Графики зависимости эффективной площади МДМ от зенитного угла для верхнего слоя поглотителя и верхнего слоя ДК в первом приближении

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для более точного анализа значений, полученных с помощью моделирования, определены погрешности расчета эффективной площади.

В работе эффективная площадь установки определяется с помощью метода Монте–Карло по формуле:

$$S_{\text{п}} = S_0 \cdot \frac{n}{N},$$

где $S_{\text{п}}$ – эффективная площадь, S_0 – площадь плоскости, с которой частицы начинают свое движение, N – начальное количество частиц, n – количество частиц, прошедших через детектор.

Так как n — независимая величина, а S_0 и N являются заданными, то погрешность эффективной площади будет определяться по формуле:

$$\Delta S_{\text{п}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{\text{п}}}{\partial n}\right)^2 \cdot \Delta n^2}, \tag{2}$$

где:

$$\frac{\partial S_{\text{п}}}{\partial n} = \frac{S_0}{N}. \tag{3}$$

Подставив (3) в (2) и используя то, что $\Delta n = \sqrt{n}$, получим формулу для определения погрешности эффективной площади детектора МДМ:

$$\Delta S_{\text{п}} = \frac{S_0}{N}\sqrt{n}.$$

На основе полученной формулы проведен анализ зависимости величины погрешности эффективной площади верхнего поглотителя от зенитных углов в диапазоне от 0° до 80° при азимутальном угле 0° для трех значений количества падающих частиц: 10^6, 5×10^6 и 10^7. Результаты представлены в виде графика (рис. 7). По полученным данным можно утверждать, что для определения эффективной площади лучше всего использовать 10^6 или 5×10^6 падающих частиц, так как при дальнейшем увеличении статистики значение погрешности меняется слабо.

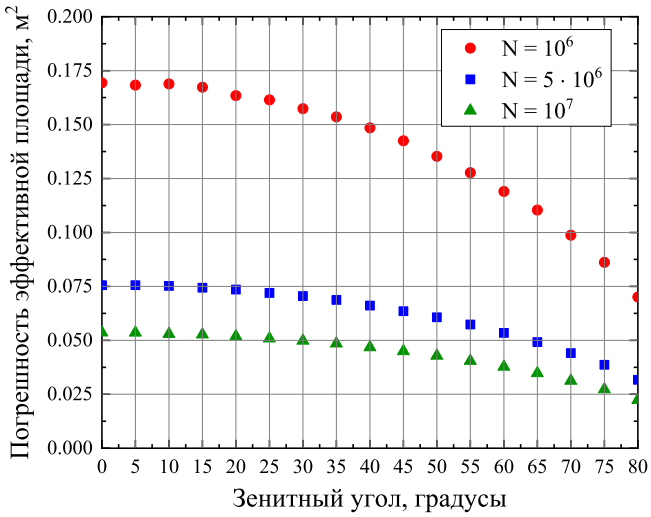

Рис. 7. Графики зависимости погрешности эффективной площади МДМ от зенитного угла для начального числа частиц: 10^6, 5×10^6 и 10^7

Также данные для двух значений количества падающих частиц 10^6 и 5×10^6 продемонстрированы в таблице, где записаны значения погрешностей эффективной площади, результат сравнения значения, полученного с помощью формулы (1) и моделирования в пределах σ и 2σ (где «+» – значения сошлись в пределах погрешности, «-» – не сошлись).

С помощью таблицы можно утверждать, что значение эффективной площади, определенное с помощью метода Монте–Карло, согласуется с теоретическим значением (формула (1)) в пределах 2σ для двух выбранных значений начального числа частиц. В работе используется количество итераций $5 \cdot 10^6$ для более точного определения эффективной площади, так как по данным таблицы для диапазона зенитных углов от 0° до 80° значение эффективной площади сходится с теоретическим в пределах σ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения эффективной площади всей установки в ДК рассматривались четыре плоскости сигнальных проволок. Для того, чтобы в модели ДК зарегистрировала частицу, поставлено условие прохождения частицы хотя бы через три плоскости сигнальных проволок. При построении плоскостей сигнальных проволок ДК учтены размеры эффективного объема детектора, взаимное расположение ДК в установке и наличие пустот между ДК.

С учетом трехмерного представления ДК рассчитана эффективная площадь всего МДМ. В моделировании рассматривались частицы, прошедшие через оба слоя ДК и поглотителей. По полученным значениям построен график зависимости эффективной площади регистрации МДМ от зенитного угла прилета частиц для диапазона зенитных углов от 0° до 80° (рис. 8) при азимутальном угле 0°. Так же получены значения эффективной площади для азимутальных углов от 0° до 45° для четырех значений зенитных углов: 15°, 40°, 60° и 75° (рис. 9). Выбор такого диапазона азимутальных углов обусловлен симметричностью детектора относительно поворота на 45°. По графику (рис. 9), на который были нанесены полученные значения, видно, что эффективная площадь изменяется не более чем на 1.6% при варьировании азимутального угла. Погрешности не видны на графиках, так как их значения малы.

Теоретически вычислено, что предельный рассматриваемый зенитный угол регистрации частиц детектором составляет 81.2°, что соответствует графику зависимости эффективной площади МДМ от зенитного угла прилета частиц (рис. 8), полученному из моделирования.

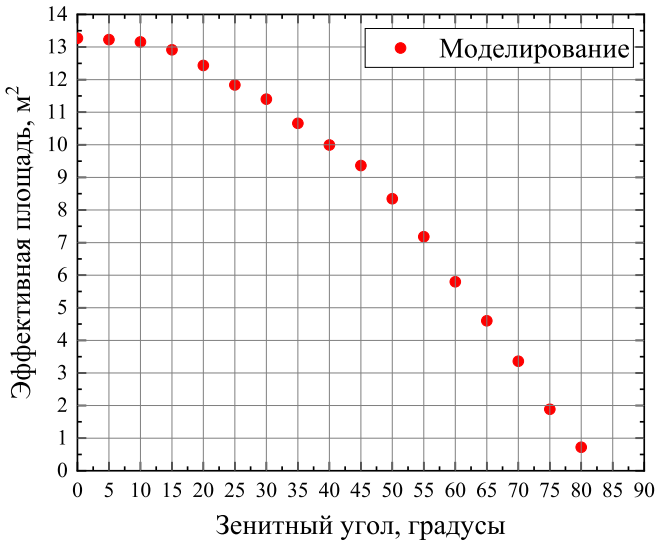

Рис. 8. Зависимость эффективной площади от зенитного угла прихода частиц

Таблица. Значения погрешности эффективной площади МДМ в зависимости от зенитного угла прихода частиц

$N = 10^6$				$N = 5 \times 10^6$			
θ,°	$\Delta S_{\text{п}}$, м^2	Сравнение теории и моделирования		θ,°	$\Delta S_{\text{п}}$, м^2	Сравнение теории и моделирования	
		σ	2σ			σ	2σ
0	0.169	+	+	0	0.076	+	+
5	0.168	+	+	5	0.076	+	+
10	0.169	-	+	10	0.075	+	+
15	0.167	-	+	15	0.074	+	+
20	0.163	+	+	20	0.074	+	+
25	0.161	+	+	25	0.072	+	+
30	0.157	+	+	30	0.071	+	+
35	0.154	+	+	35	0.069	+	+
40	0.148	+	+	40	0.066	+	+
45	0.143	+	+	45	0.064	+	+
50	0.135	+	+	50	0.061	+	+
55	0.128	-	+	55	0.057	+	+
60	0.119	+	+	60	0.053	+	+
65	0.111	-	+	65	0.049	+	+
70	0.099	+	+	70	0.044	+	+
75	0.086	-	+	75	0.039	+	+
80	0.071	-	+	80	0.032	+	+

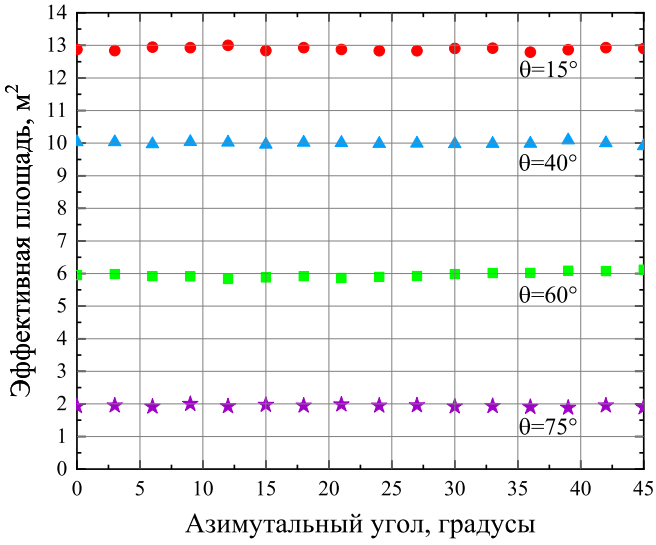

Рис. 9. Зависимость эффективной площади от азимутального угла прихода частиц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана программа для расчета эффективной площади МДМ для широкого диапазона зенитных и азимутальных углов прилета частиц. Для тестирования ПО и поиска оптимальных параметров проведен первичный расчет эффективной площади двух плоскостей детектора. Полученные значения эффективной площади согласуются с теорией в пределах 2σ.

Рассчитана эффективная площадь МДМ с учетом трехмерного представления дрейфовых камер. Получены графики, демонстрирующие изменение значения эффективной площади в зависимости от значений зенитных и азимутальных углов. Определенный предельный угол регистрации частиц $\theta_{\text{theor}} = 81.2°$ совпадает с моделированием, что указывает на корректность работы ПО.

Работа выполнена на Уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» и поддержана Российским научным фондом, 23-72-10067, https://rscf.ru/project/23-72-10067/.

[1] *Yashin I.I., Amelchakov M.B., Astapov I.I.* et al. // Journal of Instrumentation. **16**. Art. No. T08014. (2021).

[2] *Трошин И.Ю., Задеба Е.А., Воробьев В.С.* // Журнал технической физики. **94**, № 12. 2006 (2024).

[3] *Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокоулин Р.П.,* и др. // // Ядерная физика. **73**, № 11. 1904 (2010).
[4] *Барабаш Л.С., Баранов С.А., Батусов Ю.А.* и др. // Приборы и техника эксперимента. **46**, № 3. 20 (2003).
[5] *Vorobev V.S., Khomchuk E.P., Nikolaenko R.V.* et al. // Proceedings of Science. **395**. Art. No. 401. (2021).

Calculation of the effective area of Multifunctional detector of muons in a wide range of zenith angles

P. I. Sushkova[a], I. Yu. Troshin, E. A. Zadeba

National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute)
Moscow 115409, Russia
E-mail: [a]polina.sushkova.02@list.ru

To study the muon component of extensive air showers, a project for Multifunctional Detector of Muons is currently being developed at the National Research Nuclear University MEPhI within the Scientific and Educational Centre NEVOD. The primary goal of this setup is to analyze the muon component of extensive air showers within the zenith angle range from 0° to 60° using the method of local muon density spectra. To apply this method, it is necessary to know the effective area of the detector for all studied directions of particle arrival. This paper presents calculations for determining the effective area of multifunctional detector of muons as a function of the zenith angles of particle arrival. A program has been developed to determine the effective area of the detector by simulating the passage of particles through the composite components of the setup. The model incorporates the geometry of the detector, including the arrangement of drift chambers and steel absorbers. The effective area in the program was calculated using the Monte Carlo method.

PACS: 96.50.S-, 96.50.sd, 13.85.Tp.
Keywords: muons, cosmic rays, drift chambers, effective area.
Received 15 April 2025.

Сведения об авторах

1. Сушкова Полина Игоревна – студент 4 курса, лаборант; e-mail: polina.sushkova.02@list.ru.
2. Трошин Иван Юрьевич – аспирант, инженер 2 категории; e-mail: IYTroshin@mephi.ru.
3. Задеба Егор Александрович – доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: EAZadeba@mephi.ru.