

Расчет методом Монте-Карло дозового состава излучения за защитой высокоэнергетических ускорителей

МОХОВ Н. В., ФРОЛОВ В. В.

УДК 621.039.78

В работе [1] исследован компонентный вклад адронов в дозу за гомогенной защитой ускорителей. Расчет проведен в одномерной геометрии по программе HAMLET [2, 3]. В настоящей работе описана программа MARS, созданная для расчета методом Монте-Карло трехмерного межъядерного каскада в гетерогенной защите ускорителей. Дан способ оценки потоков частиц в произвольной геометрии и приведены результаты максимальных доз и дозового состава излучения за защитой ускорителей на энергии $E_0 = 1 \div 1000$ Гэв. Учтен вклад в дозу каонов, мюонов и γ -квантов. Знание дозового состава излучения позволяет определить величину полной дозы за защитой по величине парциальной дозы, рассчитанной или полученной экспериментально.

Программа MARS использует метод Монте-Карло для нахождения энергий и углов рассеяния частиц в разыгрываемых точках трехмерного блока вещества, облучаемого пучком протонов, нейтронов или пионов с произвольным спектрально-угловым распределением. Защитный блок может быть гетерогенным и иметь произвольные полости. В четырехстах заданных элементарных областях блока вычисляются потоки протонов, нейтронов и заряженных π -мезонов с $E \geq 15$ Мэв и их энергетические спектры. Первичные энергии адронов равны 0,05—1500 Гэв. Максимальный поперечный и продольный размеры блока 2500 г/см². Программа реализует как стандартные методы уменьшения дисперсии, так и модификации, разработанные для рассматриваемого диапазона энергий, что наряду с использованием системы полуэмпирических формул для описания инклюзивных распределений позволило превзойти параметры существующих программ [4, 5].

Программа MARS включает в себя шесть основных подпрограмм, написанных на языке ФОРТРАН.

BEGI — подготовка исходных данных; розыгрыш координат падения первичной частицы, ее энергии и направляющих косинусов.

TRACE — вычисление длины свободного пробега с учетом ионизационных потерь заряженных частиц, расчет статистического веса экспоненциального преобразования.

GEOM — расчет координат точек взаимодействия; регистрация фактов выхода частиц

из блока вещества и пересечения плоскостей, ограничивающих полости и заданные области из различных материалов. Если частица попала в заданный элемент блока, то вызывается подпрограмма предварительной обработки FINI, где накапливаются результат и его дисперсия.

TREE — обработка «дерева траекторий». Дерево просматривается по лексико-графической схеме [6]. Выбор энергии E , угла рассеяния θ и азимутального угла ϕ происходит в программе SELECT из функций выборки, своих для каждого типа частиц ($j = p, n, \pi$) и каждого интервала энергий. В зависимости от класса решаемой задачи (глубокие проникновения, боковая защита, расчет энерговыделения и т. п.) проводится пристрастная выборка углов и энергии из нужных функций $f_j(E, \theta)$, нормированных на единицу. Например, в задаче о глубоком проникновении предпочтение отдается высоким энергиям и малым углам, т. е. энергия выбирается из функций типа AE или AE^2 , а угол — из функций $\sim \exp(-BE^2\theta^2)$, где A и B — некоторые постоянные. Смещение устраняется статистическим весом, который включается в полный статистический вес.

FANG — вычисление спектрально-угловых распределений вторичных частиц в ядерных взаимодействиях. Для описания инклюзивных спектров используется та же система полуэмпирических формул, что и в программе HAMLET [2, 3].

SERV — окончательная обработка; вычисление функционалов, погрешностей, печатание результатов и построение графиков.

При высоких первичных энергиях «дерево траекторий» становится сильно разветвленным, и для уменьшения времени счета применяется следующая процедура. Для каждого типа частиц j в предыдущих историях выбирается максимальный вес в K -м взаимодействии $W_j^{\max}(K)$. Берется число $P \ll 1$ и с вероятностью $1 - P$ пренебрегается событиями, вес которых $W_j(K) < W_j^{\max}(K) \alpha$, где $\alpha \ll 1$. С вероятностью P эти события учитываются, но с весом $W_j(K)/P$. Для значений $P = 0,01$, $\alpha = 0,0001$ и первичных энергий $E_0 \geq 30$ Гэв необходимое время счета уменьшается в 10—15 раз. Существенная выборка по пространству и пристрастная выборка из удачно подобран-

ных функций $f_j(E, \theta)$ уменьшает статистическую погрешность на порядок. Время, необходимое для вычисления потоков частиц с погрешностью 10%, составляет 10—20 мин на БЭСМ-6. Спектры с той же статистической погрешностью вычисляются за 30—45 мин.

Для оценки в произвольной геометрии потоков нейтронов с $E < 15$ Мэв и потоков γ -квантов, заряженных каонов и мюонов написана программа SYNHET, синтезирующая результаты расчетов по программам MARS и HAMLET. Пусть известны функции плотности потока частиц типа j с энергией выше некоторой Γ_i , вычисленные для одинаковых начальных условий по программе HAMLET [$\Phi_j(z, \Gamma_j)$] и по программе MARS [$F_j(r, \Gamma_i)$]. Будем рассматривать толщины, на которых спектры находятся в равновесном состоянии. Воспользуемся тем, что плотность потока частиц на некоторой глубине Z для широкого пучка численно совпадает с потоком, проинтегрированным в поперечной плоскости на той же глубине от точечного мононаправленного источника. Тогда приближенно будут выполняться следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} F_m(Z, \Gamma_i) &= F_j(Z, \Gamma_i) \Phi_m(Z, \Gamma_i) / \Phi_j(Z, \Gamma_i) \\ F_n(Z, \Gamma_k) &= F_n(Z, \Gamma_i) \Phi_n(Z, \Gamma_k) / \Phi_n(Z, \Gamma_i) \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} F_m(r, \Gamma_i) / |r|=Z &= \\ = F_j(r, \Gamma_i) / |r|=Z \Phi_m(Z, \Gamma_i) / \Phi_j(Z, \Gamma_i) \\ F_n(r, \Gamma_k) / |r|=Z &= \\ = F_n(r, \Gamma_i) / |r|=Z \Phi_n(Z, \Gamma_k) / \Phi_n(Z, \Gamma_i) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } F_j(Z, \Gamma_i) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy F_j(r, \Gamma_i),$$

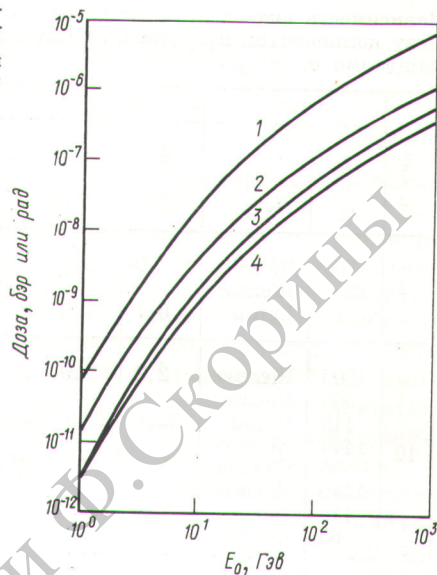
$$\Gamma_k < \Gamma_i = 15 \text{ Мэв}; j = p, n, \pi^\pm; m = K^\pm, \mu^\pm, \gamma.$$

Соотношения (1), отражающие пропорциональность потоков в плоскости, перпендикулярной к оси пучка, выполняются, конечно, строже равенств (2), которые справедливы достаточно далеко от границ.

С использованием соотношений (1) рассчитаны максимальные эквивалентные и поглощенные дозы за защитой, состоящей из блока железа с поперечными размерами 150×150 см, с толщиной 1500 и 2500 г/см² и помещаемых за блоком барьеров из обычного бетона и свинца ($H = 115$ и 60 г/см²; $\rho = 2,3$ и $11,35$ г/см³ соответственно). Энергия пучка первичных протонов, нормально падающего в центр железного блока, изменялась от 1 до 1000 Гэв. Спектральные распределения за защитой проинтегрированы в плоскости, перпендикулярной к оси

Зависимость максимальной эквивалентной (1, 3) и поглощенной (2, 4) доз от энергии первичных протонов за защитой:

1, 2 — железо (1500 г/см²); 3, 4 — железо и бетон (1500 и 115 г/см² соответственно)



пучка, и нормированы на один падающий протон.

Коэффициенты конверсии потока в дозу при энергиях $E > 10$ Мэв рассчитаны по методу работы [7], а при энергиях нейтронов и γ -квантов $E \leq 10$ Мэв взяты из работ [8, 9].

Зависимость вычисленных максимальных эквивалентных и поглощенных доз от энергии первичных протонов за защитой из железа и железа и бетона представлена на рисунке. Добавление слоя бетона толщиной 50 см уменьшает эквивалентную дозу на порядок и снижает коэффициент качества с 5,5 до 2. Это связано с тем, что за железом основной вклад в дозу дают быстрые и промежуточные нейтроны, а бетон эффективно ослабляет именно эти группы нейтронов, что и приводит к уменьшению коэффициента качества.

Дозовый состав излучения за гомогенной и гетерогенной защитами приведены в таблице для первичных энергий $E_0 = 1; 10; 50$ и 500 Гэв. Представлен вклад в максимальную эквивалентную дозу протонов, заряженных π - и K -мезонов ($E > 10$ Мэв), нейтронов ($E > 15$ Мэв), низкоэнергетических нейтронов ($E \leq 15$ Мэв), мюонов от распада пионов и каонов ($E > 10$ Мэв) и γ -квантов ($E > 0,1$ Мэв). Учитывалось γ -излучение, образовавшееся в результате радиационного захвата нейтронов, неупругого рассеяния и быстрых и промежуточных нейтронов, снятия остаточного возбуждения ядер после каскадно-испарительной стадии взаимодействия, π^0 -распада. За защитой из железа доза при всех энергиях определяется низкоэнергетическими

Зависимость вклада в максимальную эквивалентную дозу компонентов излучения за различными защитами от энергии первичных протонов (%)

$E_0, Гэв$	Защита		$p+\pi+K$	n			γ	μ
	$H, г/см^2$	Материал	$\wedge_{10 Мэв}$	$\wedge_{15 Мэв}$	$\vee_{15 Мэв}$	$\wedge_{1 Мэв}$	$\wedge_{10 Мэв}$	
1	1500	Железо	0,01	0,19	97,3	2,5	—	
	1500	Железо						
	115	Бетон	0,7	7,8	56,3	35,2	—	
10	1500	Железо	2,2	2,0	93,8	2,0	0,03	
	1500	Железо						
	115	Бетон	32,6	26,6	28,0	12,4	0,4	
	1440	Железо						
	60	Свинец	2,3	2,2	95,2	0,2	0,1	
	1440	Железо						
50	1500	Железо	3,2	2,3	93,0	1,4	0,1	
	1500	Железо						
	115	Бетон	40,5	27,5	22,2	9,3	0,5	
	2500	Железо	1,5	1,6	93,8	2,1	1,0	
	2500	Железо						
500	115	Бетон	20,5	22,3	26,5	15,0	15,7	
	2500	Железо	2,0	1,7	93,1	1,9	1,3	
	2500	Железо						
	115	Бетон	24,0	19,5	21,8	12,0	22,7	

нейтронами. Добавление бетона при $E_0 \geq 10 Гэв$ уравнивает вклады в дозу заряженных адронов, высоко- и низкоэнергетических нейтронов, и доза на 60—70% определяется высокоэнергетическими адронами. Вклад γ -квантов

в дозу при низких энергиях значителен (35%), при $E_0 \geq 10 Гэв$ уменьшается до 10—15% (защита: железо и бетон). Введение слоя свинца толщиной 60 $г/см^2$ (с сохранением общей толщины) уменьшает дозу от γ -квантов на порядок. Доза от мюонов, пренебрежимо малая при низких и средних энергиях, растет с увеличением энергии и толщины защиты, становясь при высоких энергиях определяющей за толщинами $H \geq 3000—3500 г/см^2$.

Полученные результаты по дозам от адронов согласуются с данными работы [1]. Используя данные типа приведенных на рисунке и в таблице, легко рассчитать полную дозу по дозе от какого-либо компонента.

Поступила в Редакцию 10/VII 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кимель Л. Р., Мохов Н. В. В сб.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 14. Под ред. В. К. Сахарова. М., Атомиздат, 1974, с. 27.
2. Кимель Л. Р., Мохов Н. В. «Изв. вузов. Физика», 1974, № 40, с. 101.
3. Бритвич Г. И. и др. Препринт ИФВЭ 74-86, Серпухов, 1974.
4. Chandler K., Armstrong T. Operating Instructions for the High Energy Nucleon-Meson Transport Code NETC. ORNL-4744, 1972.
5. Барашенков В. С., Соболевский Н. М., Топеев В. Д. Препринт ОИЯИ P2-5719, 1974.
6. Бусленко Н. П. и др. Метод статистических испытаний. М., Физматгиз, 1962.
7. Головачик В. Т. и др. Препринт ИФВЭ 73-29, Серпухов, 1973.
8. Shaw K., Stevenson G., Thomas R. Depth Dose and Depth Dose Equivalent Data as Functions of Neutron Energy. RHEL/M 149, 1968.
9. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М., Атомиздат, 1972.