



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4599/2-81

7/9-81

P16-81-377

+

М.М.Комочков

АППРОКСИМАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ АДРОННОГО КАСКАДА
В ВЕЩЕСТВЕ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ
РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ И ЗАЩИТЫ

Направлено на 3 Всесоюзную конференцию
по защите от ионизирующих излучений
ядерно-технических установок /Тбилиси, 1981 г./

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные к настоящему времени методы и способы прогноза радиационной обстановки и расчета защиты на ускорителях протонов либо имеют ограниченную доступность, в частности, в силу сложности и трудоемкости^{/1-3/}, либо имеют сравнительно узкие границы применимости^{/4-6/}; некоторые нуждаются в пересмотре в свете современных данных. Справочный материал для прогноза радиационной обстановки и расчета защиты ускорителей ограничен либо диапазоном энергии частиц^{/5,6/}, либо геометрией расчета^{/4/}. Назначение настоящей работы - восполнить, по возможности, имеющийся пробел. Результаты исследований адронного каскада в веществе, инициируемого одним протоном высокой энергии $> 0,5$ ГэВ, аппроксимируются на основе простейшего выражения для точечного анизотропного источника:

$$F(\theta, R, l, x, E_p, A) = f(\theta, E_p, A) \frac{\eta(E_p, l, A)}{R^2} \exp[-x/\lambda(\theta)]. \quad /1/$$

Здесь F - дозиметрический параметр поля излучения /доза, флюенс/; R - расстояние от мишени до точки наблюдения; f - угловое распределение флюенса или дозы на единичном расстоянии ($R=1$) при одном неупругом соударении протона с энергией E_p с ядром мишени, атомный вес которого A ; θ - угол между направлением движения протона и направлением на точку наблюдения из точечной мишени; η - эффективное число неупругих соударений протона с энергией E_p с веществом мишени; l - длина мишени по направлению движения протона; x - толщина защиты по направлению от мишени к точке наблюдения; λ - длина ослабления флюенса или дозы адронов при аппроксимации функции ослабления флюенса или дозы адронов экспонентой.

2. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛЮЕНСА АДРОНОВ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

При аппроксимации результатов исследований угловых распределений флюенса и поглощенной дозы излучений примем за основу экспериментальные данные^{/7/}, полученные с мишенями из трех различных веществ (Al, Cu, W) при двух значениях энергии протонов: 7,1 ГэВ и 23,1 ГэВ. Эти данные, приведенные к одному неупругому взаимодействию, можно аппроксимировать суммой из двух экспонент:

$$\Phi = \frac{dN/d\Omega}{R^2} = \frac{1}{R^2} (C_{1\Phi} e^{-\beta_1 \theta} + C_{2\Phi} e^{-\beta_{2\Phi} \theta}), \quad /2/$$

$$D = \frac{1}{R^2} (C_{1D} e^{-\beta_1 \theta} + C_{2D} e^{-\beta_{2D} \theta}), \quad /3/$$

где $dN/d\Omega$ - число адронов, вылетающих из мишени в единице телесного угла; $C_{1\Phi}$ и C_{1D} - постоянные, определяемые из условия согласия рассчитанных и измеренных значений флюенса и дозы соответственно; β_1 - константа; $\beta_{2\Phi}$ - параметр распределения, зависящий только от нижней границы /порога/ рассматриваемого энергетического диапазона вторичных адронов; β_{2D} - константа;

$$C'_{2\Phi} = \sqrt{\frac{E_p}{7,1}} \sqrt{\frac{A}{63,5}} C_{2\Phi}; \quad C'_{2D} = \sqrt{\frac{E_p}{7,1}} \sqrt{\frac{A}{63,5}} C_{2D}. \quad /4/$$

Здесь $C_{2\Phi}$ и C_{2D} - постоянные, определяемые из условия согласия рассчитанных и измеренных значений флюенса и дозы соответ-

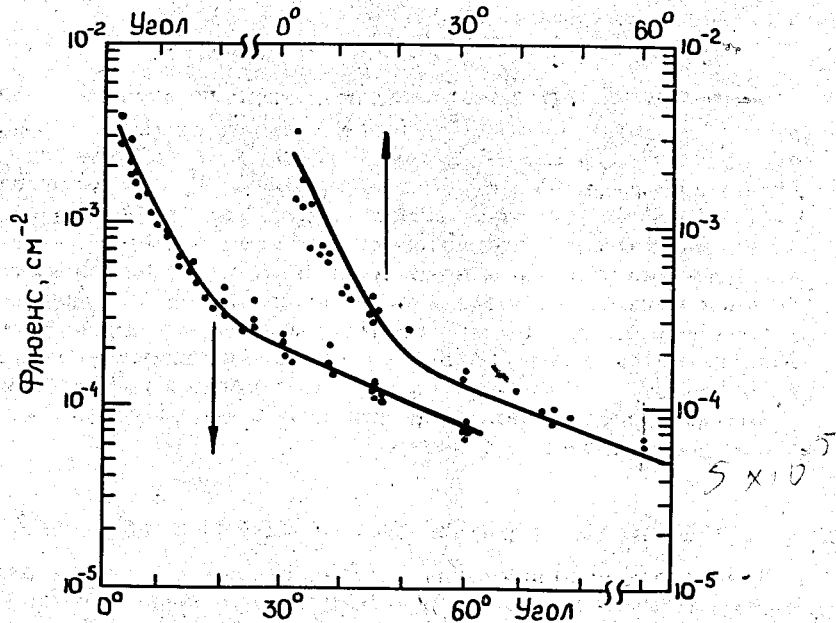


Рис.1. Измеренные (·) и рассчитанные (-) величины флюенса адронов на расстоянии 1 м от медной мишени при одном неупругом взаимодействии протонов с энергией 7,1 ГэВ /верхние результаты/ и 23,1 ГэВ /нижние/.

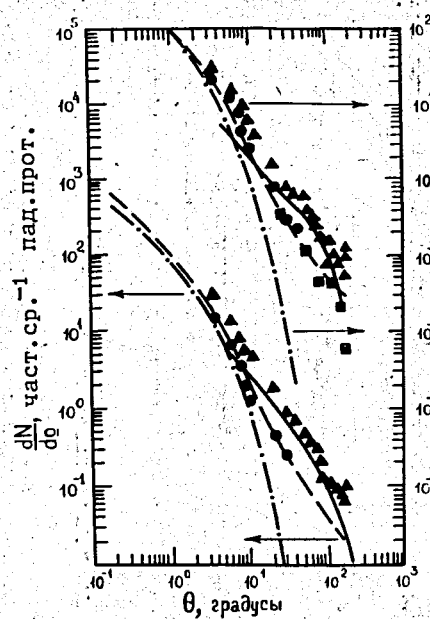


Рис.2. Угловое распределение потока адронов от тонкой /0,2 л.яд./ медной /вверху/ и алюминиевой /внизу/ мишеней, бомбардируемых протонами 69 ГэВ: Δ - ^{12}C - ^{11}C ; \bullet - Cu - ^{24}Na ; \blacksquare - ядерные эмульсии БР-400 /заряженные частицы/; - - - - - расчет по MARS-4 с порогом 2 ГэВ; — — — — — то же, с порогом 20 МэВ; — — — — — расчет полуэмпирическим методом / $E > 22$ МэВ/.

ственно; E_p - в ГэВ, 63,5 - атомный вес меди; $n=2$ при $E_p \leq 7,1$ ГэВ и $n=3$ при $E_p > 7,1$ ГэВ. Результаты аппроксимации данных эксперимента представлены на рис.1 для медной мишени диаметром 2 см и длиной 5 см. Для одного неупругого взаимодействия величины C оказались равными:

$C_{1\Phi} = 46$ адрон/ср, $C_{2\Phi} = 3,4$ адрон/ср, $C_{1D} = 5 \cdot 10^{-10}$ рад / $R = 100$ см/, $C_{2D} = 3,6 \cdot 10^{-11}$ рад / $R = 100$ см/. Величины β получились равными: $\beta_1 = 10,1$ рад $^{-1}$, $\beta_{2\Phi} = 1,4$ рад $^{-1}$ / $E' > 20$ МэВ/, $\beta_{2D} = 1,44$ рад $^{-1}$, где E' - порог реакции $^{12}\text{C}(x, n)^{11}\text{C}$, с помощью которой регистрировали адроны в эксперименте. Зависимость $\beta_{2\Phi}$ от пороговой энергии регистрации адронов установлена в работе /7/.

Степень согласия рассчитанных и измеренных величин флюенса адронов при энергиях 69 и 0,66 ГэВ иллюстрируется на рис.2 и 3. При расчете число неупругих соударений протонов с ядрами определяли без учета межъядерного каскада, так как мишени тонкие.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА И ФЛЮЕНСА АДРОНОВ В ТОЛСТОЙ МИШЕНИ /ПОГЛОТИТЕЛЕ/

Поток адронов F на глубине x в поглотителе, на который падает пучок протонов J , в первом приближении /8/ может быть получен как сумма потоков первичных протонов и вторичных частиц:

$$F(x) = J e^{-x/\lambda_{in}} + \frac{J \nu \lambda}{\lambda - \lambda_{in}} [e^{-x/\lambda} - e^{-x/\lambda_{in}}], \quad /5/$$

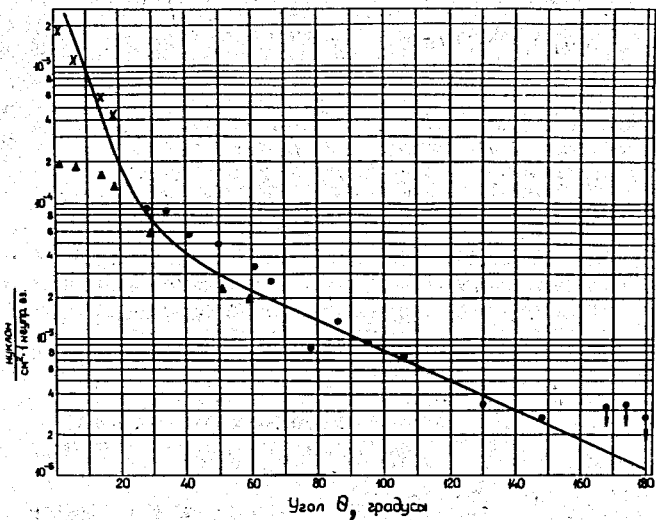


Рис.3. Измеренные (●,▲) и рассчитанные величины флюенса адронов / $E > 20$ МэВ/ на расстоянии 1 м от медной мишени при одном неупругом взаимодействии протонов с энергией 660 МэВ: ▲ - нейтроны, ● - адроны } эксперимент, — } - расчет.

где λ_{in} - длина для неупругого взаимодействия протонов с ядрами; ν - выход адронов при одном неупругом взаимодействии протона с ядром, который находится как результат интегрирования $dN/d\Omega$ по телесному углу; λ - длина ослабления потока вторичных частиц в поглотителе. Примем формулу /5/ за основу аппроксимации зависимости потока адронов от толщины поглотителя, определяя λ из условия согласия рассчитанных с помощью /5/ и измеренных или рассчитанных более достоверными методами /например, методом МК/ величин потоков. Результаты аппроксимации продольного развития каскада, выполненной таким образом, представлены на рис.4. В работе /8/ с помощью /5/ аппроксимированы результаты продольного развития каскада при прохождении в железе протонного пучка с энергией ~20 ГэВ. Воспроизведение с помощью /5/ экспериментальных и рассчитанных методом МК данных в этих случаях оказывается хорошим, что дает основание использовать формулу /5/ при оценке размеров защиты в направлении движения протонов и выхода адронов с заднего торца погло-

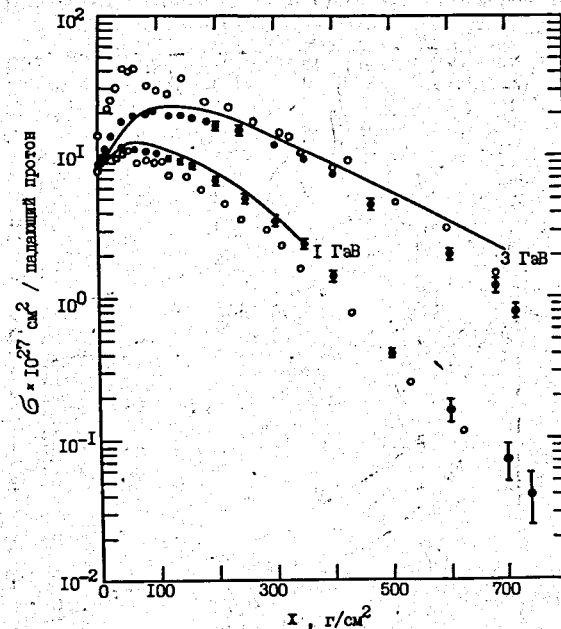


Рис.4. Продольное развитие каскада в железе в единицах поперечного сечения образования ^{18}F из ^{27}Al в толстой мишени при бомбардировке протонами с энергией 1 и 3 ГэВ: ○ - эксперимент; ● - расчет методом МК; — - результат аппроксимации.

тителя протонов. При $e^{-x/\lambda} \gg e^{-x/\lambda_{in}}$ формула /5/ имеет следующий вид:

$$F \approx \frac{J\nu\lambda}{\lambda - \lambda_{in}} e^{-x/\lambda} = JB e^{-x/\lambda}, \quad /6/$$

где $B = \nu\lambda / (\lambda - \lambda_{in})$ - так называемый фактор накопления /6,8/. Величину η можно оценивать через фактор B , который найден в ряде работ /2,8,9/. Определяя B как функцию длины мишени ℓ /глубины x в поглотителе, так как для /5/ и /6/ ℓ и x совпадают/, можно оценивать зависимость эффективного числа неупругих взаимодействий от длины мишени:

$$\eta(\ell) = \frac{B(\ell)}{\nu}. \quad /7/$$

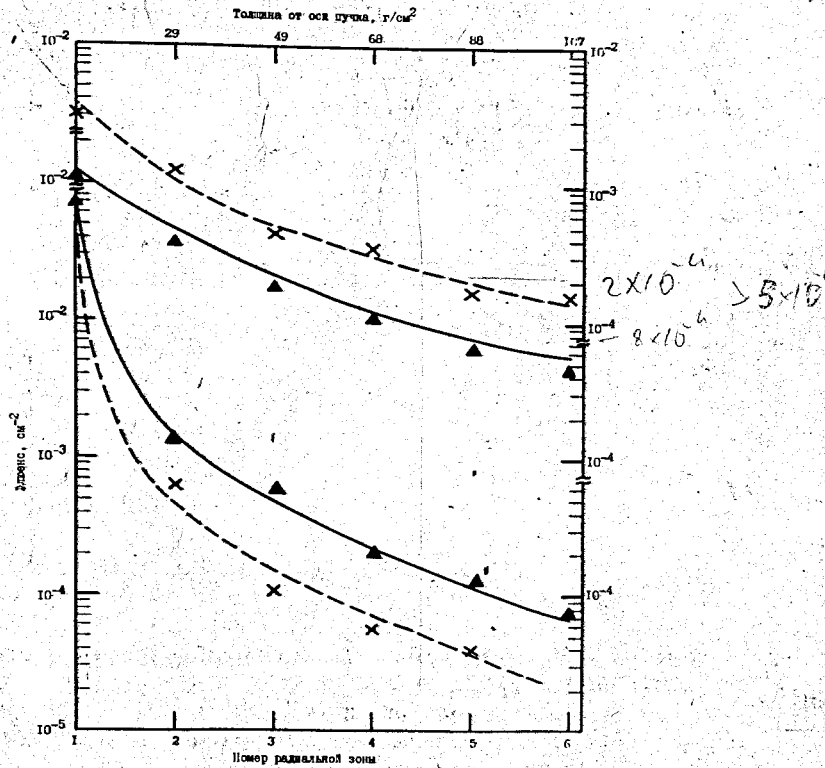


Рис.5. Радиальное распределение флюенса адронов при прохождении одного протона /узкий пучок/ через железо:
 ▲ $E_p = 3$ ГэВ } расчет методом МК; — $E_p = 3$ ГэВ } полу-
 × $E_p = 1$ ГэВ } расчет методом МК; - - - $E_p = 1$ ГэВ } эмпирич. расчет.

Поперечное развитие каскада опишем на основе /1/ и /2/ как суперпозицию флюенсов от точечных источников j , расположенных по оси пучка:

$$\Phi(x, r) = \sum_j \frac{\eta_j (C_{1\phi} e^{-\beta_1 \theta_j} + C_{2\phi} e^{-\beta_2 \theta_j})}{(x_j - x)^2 + r^2} \exp \left[- \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + r^2}}{\lambda(\theta_j)} \right], \quad /8/$$

где r - расстояние от оси пучка до рассматриваемой точки. Величины η_j оцениваются с помощью /7/ или /что более точно/ из условия

$$F(x) = \int_0^\infty \Phi(x, r) 2\pi r dr, \quad /9/$$

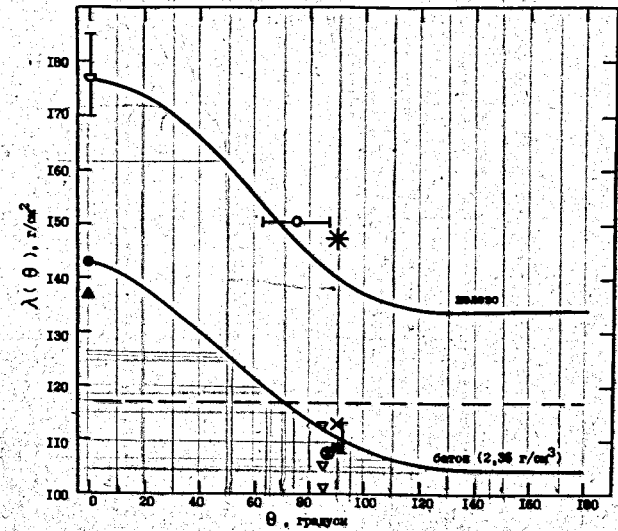


Рис.6. Зависимость длины ослабления $\lambda(\theta)$ нейтронов $/E > 20$ МэВ/ в обычном $\rho = 2,35$ г/см³/ бетоне и железе /обозначения см. в таблице/.

где $F(x)$ находится по данным эксперимента, расчета методом МК или вычисляется с помощью /5/. Результаты вычислений согласно /8/ при $j=1$ и условии /9/ радиального распределения флюенса адронов при прохождении одного протона с энергией 1 и 3 ГэВ через железо представлены на рис.5 вместе с данными, полученными методом МК; верхние кривые соответствуют $x = 356$ г/см², нижние - $x = 20$ г/см². При вычислениях Φ пользовались зависимостью λ от угла θ для нейтронов, представленной на рис.6.

4. РАСЧЕТ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ ЗА ЗАЩИТОЙ

Для углов $\theta > 15^\circ$ и толщины защиты более 300 г/см² заряженным компонентом потока адронов из мишени можно пренебречь. При этих условиях рабочие формулы для флюенса и дозы нейтронов за защитой будут следующими:

$$\Phi = 2,8 \sqrt{\frac{E_p}{7,1}} \sqrt{\frac{A}{63,5}} \frac{J \eta}{R^2} e^{-\beta_2 \phi \theta} e^{-x/\lambda(\theta)}, \quad /10/$$

Таблица 1

Сравнение рассчитанных и измеренных величин флюенса адронов и дозы излучения за защитой при гашении пучка протонов $E_p=660$ МэВ в толстой медной мишени /источник I, $J = 1,8 \cdot 10^9$ протон/с/ и защите /источник II, $J = 5 \cdot 10^8$ протонов/с/

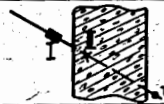
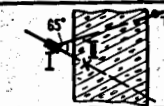
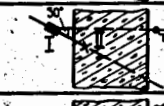
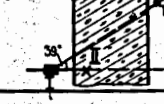
Источники и места измерений	Измеренные		Рассчитанные			Отношения	
	Мощность эквивалентной дозы излучения H_e , мЗв/час	Плотность потока адронов ($E > 20$ МэВ) Φ_a , адрон/см ² ·с	Плотность потока адронов ($E > 20$ МэВ) Φ_p , адрон/см ² ·с	Мощность эквивалентной дозы H_p , мЗв/час	$\frac{H_p}{H_e}$	$\frac{\Phi_p}{\Phi_a}$	$\frac{H_p}{H_e}$
 I	116 ± 18	470 ± 70	93	141	1	1,2	
			сумма				470
II			377				
 I	3 ± 1	$2,6 \pm 0,5$	12	3,8	4,8	1,3	
			сумма				12,5
II			0,5				
 I	84 ± 11	346 ± 50	125	56	0,54	0,67	
			сумма				188
II			63				
 I	6 ± 1	16 ± 3	8	2,8	0,57	0,46	
			сумма				9,3
II			1,3				

Таблица 2

Сравнение рассчитанных и измеренных величин флюенса частиц при гашении пучка протонов с импульсом 19,2 ГэВ/с и потоком 10^{12} протонов·с⁻¹

Номера точек	θ , рад	Толщина защиты, г/см ²	λ , г/см ²	Флюенс частиц, см ⁻² ·с				$\frac{H_p}{H_e}$	$\frac{H_p}{H_e}$	A
				¹¹ C	Li	Al	Fe			
30	1,83	794	106	3260	-	$9,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	0,4	-	3,0
31	1,43	778	113	10500	$4,1 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$	$7,3 \cdot 10^3$	0,7	0,41	0,9
32	1,07	875	120	3900	$2 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	1,5	2,1	2,5
33	0,89	987	125	1840	$0,92 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	1,6	0,51	5,4
34	0,76	1116	128	670	$0,46 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$	1,6	0,51	15
35	0,66	1290	131	210	$2 \cdot 10^2$	$9,8 \cdot 10^3$	312	1,5	0,95	47
36	0,44	1791	136	3,8	34^{+34}_{-27}	$9,8 \cdot 10^3$	6,2	1,6	8,9	$2,6 \cdot 10^3$
37	1,40	592	114	26300	$5,3 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$53 \cdot 10^3$	2,0	2,0	2,8
38	0,97	707	123	9340	$2,8 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$32 \cdot 10^3$	3,4	3,0	7,8
39	1,45	778	112	3830	$4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^3$	1,1	1,05	3,7
40	1,13	911	119	2590	$1,9 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^3$	0,9	0,76	5,4
					Среднее значение			1,5	2,0	-

МК - метод Монте-Карло; А - аналитический метод; ПЭ - полуэмпирический метод; ¹¹C - данные эксперимента с детекторами из углерода.

$$D = 3 \cdot 10^{11} n \sqrt{\frac{E_p}{7,1}} \sqrt{\frac{A}{63,5}} \frac{J\eta}{R^2} e^{-\beta_{2D}\theta} e^{-x/\lambda(\theta)} \text{ рад.} \quad /11/$$

В /11/ R выражается в метрах. Эквивалентная доза находится как

$$H = 4D \text{ бэр,} \quad /12/$$

где 4 - типичная величина коэффициента качества излучений на ускорителях высоких энергий. Результаты вычислений флюенса нейтронов согласно /10/ и H на основе /11/ и /12/ за двухметровой защитой синхроциклотрона ОИЯИ сравниваются в табл.1 с измеренными величинами /10/. В табл.2 сравниваются рассчитанные с помощью /10/ - ПЭ, измеренные /11/ и рассчитанные методом МК /11/ и на основе работы /4/ /A/ величины флюенса с энергией более 20 МэВ за трехметровой бетонной защитой, на которую падает излучение от толстой железной мишени / $d=30$ см; $\ell = 300$ см/, бомбардируемой пучком протонов с импульсом 19,2 ГэВ/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байшев И.С. и др. ИФВЭ, ОРИ 78-2, Серпухов, 1977.
2. Ranft J. Part. Accel., 1972, 3, p.129.
3. Armstrong T.W. et al. Nucl. Sci. and Engin., 1972, 49, p.82.
4. O'Brien K. HASL-203, New York, 1968.
5. Манько Б.В., Сычев Б.С. Труды Радиотехнического института, М., 1971, №9, с.117.
6. Комочков М.М. ОИЯИ, P16-7335, Дубна, 1973.
7. Levine G.S. et al. Part. Accel., 1972, 3, p.91.
8. Зайцев Л.Н. и др. Основы защиты ускорителей. Атомиздат, М., 1971, с.136.
9. Patterson H.W., Thomas R.H. Accelerator Health Physics. Academic Press, New York and London, 1973.
10. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, P16-8179, Дубна, 1974.
11. Goebel K., Ranft J. CERN, 70-16, Geneva, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июня 1981 года.