

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P16-85-549

В. И. Цовбун

РАДИАЦИОННЫЕ ПОЛЯ  
И ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
НА ЭНЕРГИИ ДО 100 МэВ.  
КРАТКИЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Направлено на IX Всесоюзное совещание  
по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1984.

**1985**

Критерии отбора представленной здесь информации следующие: полнота информации для оперативного решения задач прогноза радиационной обстановки и расчета защиты, компактность, современность.

Поля тормозного излучения. Энергетическая и угловая зависимости мощности дозы <sup>\*</sup> тормозного излучения для толстых (оптимальная толщина) мишеней с большим атомным номером представлены на рис 1 и 2. Поля тормозного излучения вблизи мишеней с меньшими атомными номерами рекомендуется [1] оценивать умножением значений мощностей доз вблизи мишеней с большим Z на коэффициенты "К" из таблицы 1.

Таблица 1

Направление	Мишень	Коэффициент "К"
0°	Fe, Cu	0,7
0°	Al, бетон	0,5
90°	Fe, Cu	0,5
90°	Al, бетон	0,3

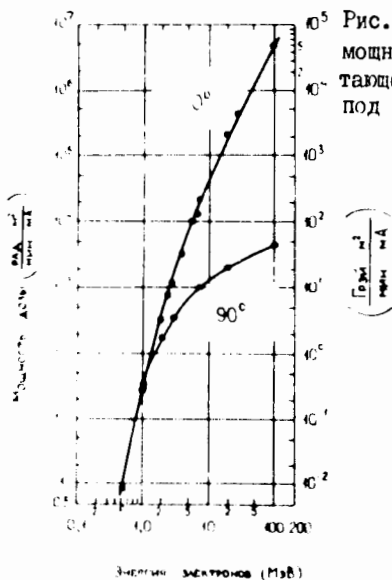
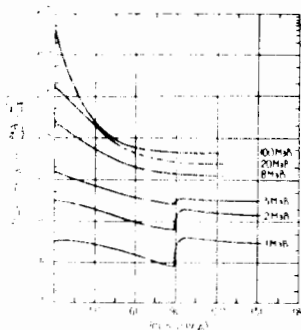


Рис.1. Энергетическая зависимость мощности дозы тормозного излучения, вылетающего из мишени с большим атомным номером под углами 0° и 90°.

Рис.2. Угловые распределения мощности дозы тормозного излучения, вылетающего из мишени с большим атомным номером.



\* Здесь представлены значения индекса поглощенной дозы.

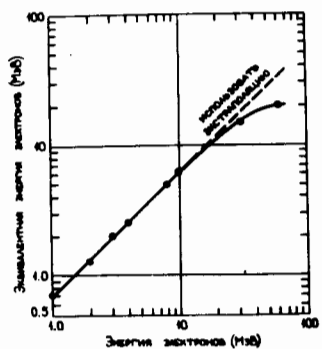


Рис.3. Соотношение эквивалентности для оценок параметров ослабления тормозного излучения, вылетающего в направлении  $90^\circ$ , как функция энергии падающих на мишень электронов.

Для энергий электронов выше 10 МэВ и излучения, летящего под  $90^\circ$ , рекомендуется [1] использовать  $K=1$  для всех материалов мишени.

Смягчение спектрального состава излучения, вылетающего под  $90^\circ$  по сравнению с излучением, летящим вперед, для мишеней с большим атомным номером удобно учитывать, используя соотношение эквивалентности для спектров под этими углами вылета, рис.3[1]. Эквивалентная энергия электронов, определенная по рис.3, используется при выборе соответствующих параметров ослабления тормозного излучения. Для мишеней с меньшим атомным номером, а также для больших чем  $90^\circ$  углов подобная оценка является консервативной.

**Фотонейтроны.** Количество нейтронов, образованных в мишенях больших размеров при гашении в них пучка электронов, представлено на рис.4 [2]. Точками на рисунке обозначены пороги фотоядерных реакций различных элементов. Единица мощности пучка I киловатт соответствует I МэВ·мА.

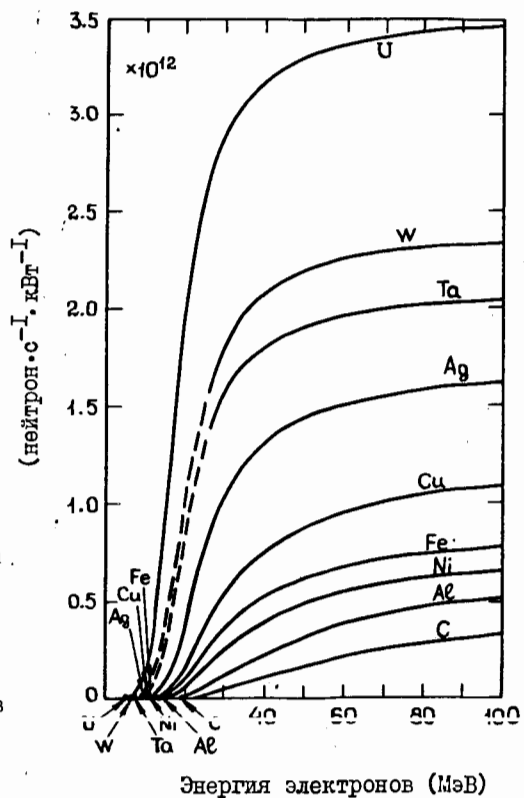


Рис.4. Энергетическая зависимость образования фотонейтронов в толстых мишенях.

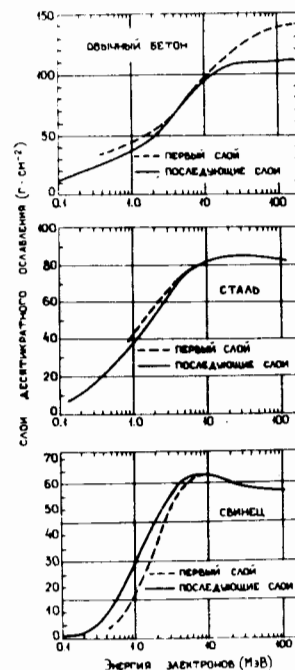


Рис.5. Энергетические зависимости слоев десятикратного ослабления тормозного излучения в различных материалах.

Пунктирные линии проведены по значениям первого слоя десятикратного ослабления, а сплошные соответствуют последующим ("равновесным") слоям десятикратного ослабления. Для защиты из земли, песка, кирпича и тяжелых бетонов с плотностью до  $4 \text{ г/см}^3$  можно пользоваться данными для слоев ослабления излучения в бетоне в массовых единицах ( $\text{г/см}^2$ ), начиная с плотности бетонов  $4 \text{ г/см}^3$  и выше - для железа [1, 2].

Данные для случая наклонного падения тормозного излучения на бетонную защиту приведены на рис.6 [3]. Обозначения около кривых указывают граничную энергию спектра в МэВ и вещество толстой мишени. Углы вылета излучения  $0^\circ$ - $70^\circ$  равны углу падения на защиту. При энергиях электронов, больших 10 МэВ, и углах вылета излучения  $90^\circ$  и более рекомендуется использовать соотношение эквивалентности (рис.3) для оценок слоев десятикратного ослабления.

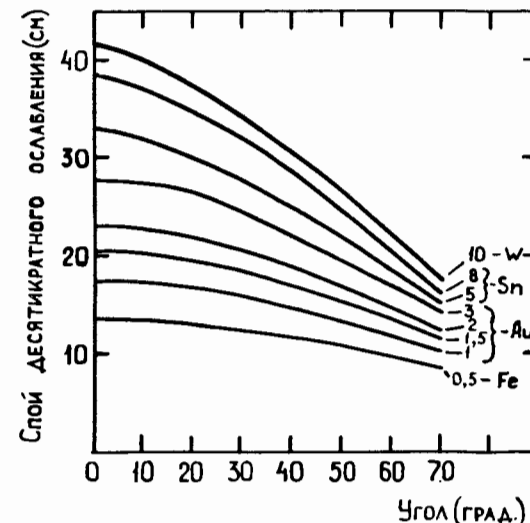


Рис.6. Слои десятикратного ослабления тормозного излучения в обычном бетоне при наклонном падении.

**Ослабление излучения в защите.** На рис.5 представлены значения слоев десятикратного ослабления тормозного излучения при перпендикулярном падении широкого пучка на защиту из бетона ( $\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$ ), железа ( $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ ) и свинца ( $\rho = 11,3 \text{ г/см}^3$ ). Данные приведены для излучения, вылетающего вперед из толстой мишени с большим атомным номером.

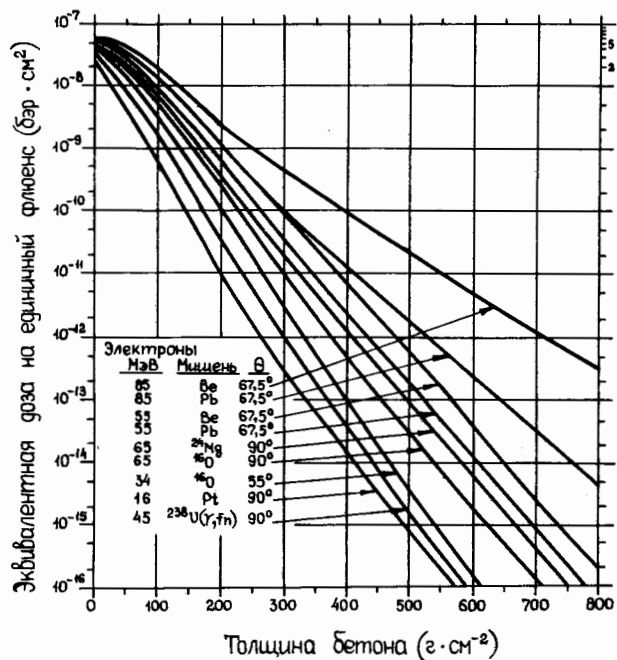


Рис.7. Кривые ослабления фотонейтронов.

Кривые ослабления эквивалентной дозы широкого пучка фотонейтронов в обычном бетоне представлены на рис.7 [1]. Эти кривые получены с использованием данных ослабления моноэнергетического нейтронного излучения и спектров фотонейтронов, вылетающих из тонкой мишени, для толстой мишени эти данные являются консервативной оценкой.

Как показано в [2, 4], спектры фотонейтронов близки к спектрам некоторых изотопных источников, а в случае с мишенями из делящегося материала — к спектру деления. Спектр фотонейтронов из мишеней с большим атомным номером близок к спектру нейтронов источника Cf, а спектр из мишеней с малым атомным номером — к Am-Be источнику. Следует заметить, что, как видно из рис.7, фотонейтроны, летящие вперед, имеют несколько большую проникающую способность по сравнению с излучением в боковом направлении и назад. В таблице 2 представлены значения слоев десятикратного ослабления эквивалентной дозы широкого пучка нейтронов различных источников излучения в различных материалах.

**Поле излучения на местности.** В таблице 3 приведены отношения доз непосредственно за потолочным перекрытием над мишенью к дозе в максимуме на местности вблизи здания в зависимости от его высоты и расстояния от мишени до защитной стены [5, 6].

Таблица 2

Материал	Спектр	Слой десятикратного ослабления, г/см²
Парафин	Am-Be	23
Дерево	Cf	28
Вода	деления	22
Песок (SiO <sub>2</sub> )	Am-Be	85
	Cf	70
Обычный бетон	Cf	85
	Am-Be	110
Тяжелый бетон (ρ = 3,7 г/см³)	Am-Be	115
	Cf	96
Железо	Cf	290
	Am-Be	290
	деления	280-330
Свинец	Cf	523
	Am-Be	548

Для расстояний  $d_s = 20-250$  метров от источника излучения в [1] предлагается оценивать мощность дозы по формуле

$$D_s = \frac{2,5 \cdot 10^{-2} \cdot D_0 \cdot \omega^{1,5}}{d_s^2}$$

где  $D_s$  — мощность дозы, рад/мин;  $D_0$  — мощность дозы на расстоянии 1 метр от мишени в направлении вверх, рад м²/мин;  $\omega$  — телесный угол (в стерadianах) выхода излучения через потолочное перекрытие.

Следует заметить, что для малых расстояний и энергий больше 0,5 МэВ формула значительно, в несколько десятков раз, завышает мощность дозы на местности.

**Наведенная радиоактивность.** Основные радиоактивные нуклиды, образующиеся в мишенях с естественным содержанием изотопов, и мощности экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от мишеней представлены в таблице 4 [2]. Учтены изотопы со временем полураспада более 5 мин. Данные приведены для размеров мишеней, в которых электрон-фотонный каскад поглощается практически полностью. Самопоглощение излучения в мишени не учтено.

Радиоактивность воздуха в помещении ускорителя определяется [2]  $N-13$ , образующимся в реакции на  $N-14$  с порогом 10,55 МэВ,  $T_{1/2} = 9,96$  мин. Предельно допустимая концентрация  $N-13$  для персонала  $7,4 \cdot 10^{-2}$  Бк/см³. Для ускорителей на энергии 30 МэВ и более удельная активность  $N-13$  в насыщении составляет  $\sim 5,2 \cdot 10^8$  Бк/(м·кВт).

Таблица 3. Отношение мощностей доз над мишенью на уровне потолочного перекрытия к мощностям доз в максимуме на местности (умножить на  $10^3$ ).

Энергия электронов, МэВ	Высота здания, м	Расстояния до защитной стены, м				
		3	6	10	15	20
0,5	3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
	4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
	6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	10	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
1	3	3	2	1	2	2
	4	2	1	1	1	1
	6	2	1	0,8	0,8	0,9
	8	1	1	0,9	0,8	0,8
	10	1	1	0,9	0,7	0,8
1,5	3	14	5	4	5	5
	4	10	5	3	3	3
	6	6	4	3	2	2
	8	4	3	3	2	2
	10	4	3	2	2	2
2	3	25	7	5	5	5
	4	13	6	4	4	3
	6	10	6	4	4	2
	8	6	5	4	3	2
	10	5	4	3	3	2
3	3	35	10	7	5	5
	4	28	10	7	4	3
	6	15	9	6	4	3
	8	11	7	5	4	3
	10	8	6	4	3	3

Чтобы определить насыщенную концентрацию  $N$  -I3 в помещении, надо умножить приведенную выше удельную активность на длину пути тормозного излучения по воздуху (средний линейный размер камеры облучения) и поделить на объем помещения. Ускоритель с мощностью пучка 1 кВт, у которого размер камеры облучения составляет 1 м, а объем помещения 1000 м<sup>3</sup>, будет производить концентрацию  $N$  -I3 0,5 Бк/см<sup>3</sup>, в несколько раз превышающую предельно допустимую.

Таблица 4. Наведенная радиоактивность мишеней, облучаемых электронами.

Материал мишени	Радио-нуклиды	$T_{1/2}$	Экспозиционная мощность дозы в насечении (Р/час)(кВт/м <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>															
			Энергия электронов, МэВ															
			10	15	20	25	30	35	40	10	15	20	25	30	35	40		
Al	Na-24	14,96 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Mn-54	303 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Fe-53	8,51 мин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fe	Fe-55	2,6 лет	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	V-48	16 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ni-57 <sup>m</sup>	36 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ni	Co-57	270 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Cu-61	3,32 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Cu-62	9,76 мин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cu	Cu-64	12,8 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Co-58	71,3 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Co-58m	9,2 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
W	Co-60	5,26 лет	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ta-182m	16,5 мин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ta-182	115,1 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pb	Ta-183	5 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	W-181	140 дн	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Pb-203	52,1 час	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pb	Pb-204m	66,9 мин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Co-57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Co-57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

\* Co-57 - дочерний изотоп от Ni-57

При работе вентиляции уменьшение концентрации радионуклида во времени можно оценить, используя эффективное время, за которое она уменьшается в 2 раза [2],

$$T_{1/2 \text{эфф}} = \frac{T_{1/2} \cdot T_{1/2 \text{вент}}}{T_{1/2} + T_{1/2 \text{вент}}}$$

где  $T_{1/2 \text{вент}} = 0,693 T$ , а  $T$  - время, равное отношению объема помещения к объему воздуха, высасываемого из него в единицу времени.

Радиоактивность воды, охлаждающей узлы ускорителя, образуется в результате взаимодействия тормозного излучения с кислородом воды. В таблице 5 приведены активности различных изотопов в насыщении, соответствующие 100% поглощению излучения в воде [2]. Наиболее значимым изотопом является O-15, однако он быстро распадается, и через 0,5-5 часов после остановки ускорителя доминирует излучение C-II. Изотопы Be-7 и H-3 могут накапливаться в замкнутых системах водоохлаждения. При охлаждении воды в открытых водоохлаждающих системах (градирнях) возможно загрязнение радиоактивными изотопами воздушной среды. В охлаждаемых плоскометаллических ловушках пучка доля излучения, поглощенного в воде, составляет ~10% и менее в зависимости от конкретной конструкции [2].

Таблица 5

Нуклид	$T_{1/2}$	$\Gamma$ , $\frac{\text{Р/час}}{\text{Ки} \cdot \text{м}^2}$	Порог, МэВ	Активность в насыщении, Ки/кВт
O-15	123 с	0,59 ( $\beta^+$ )	15,67	9
C-II	20,34 мин	0,59 ( $\beta^+$ )	25,88	0,4
Be-7	53,6 сут	0,029	31,86	0,04
H-3	12,262 лет	( $\beta^-$ )	25,02	0,2

Альbedo тормозного излучения. Коэффициенты дозового токового альbedo для обычного бетона приведены на рис.8 [2,7] для различных граничных энергий тормозного излучения, углов рассеяния  $\theta_s$  и азимутального угла выхода рассеянного излучения  $\theta_0$ . Мощность дозы отраженного излучения рассчитывается по формуле

$$P = \frac{P_0}{d_i^2} \cdot \frac{\alpha \cdot S \cdot \cos \theta_0}{d_s^2}$$

где  $d_i$  - расстояние от источника до рассеивателя;  $d_s$  - расстояние от рассеивателя до места измерения;  $S$  - площадь рассеивателя;  $\theta_0$  - угол падения излучения на рассеиватель;  $\alpha$  - коэффициент альbedo, рис.8.

Значения коэффициента альbedo для одной и той же граничной энергии тормозного излучения могут заметно меняться от вклада низкоэнергетической части спектра тормозного излучения (до 30%), которая наиболее неопределенна в реальных условиях.

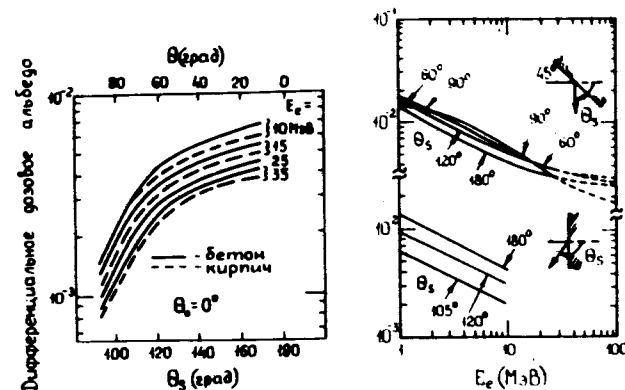


Рис.8. Энергетическая и угловая зависимости коэффициентов дозового альbedo тормозного излучения для обычного бетона.

В таблице 6 предлагаются [2] значения слоев десятикратного ослабления однократного и многократного рассеянного излучения на угол более  $90^\circ$ ,  $\text{г/см}^2$ .

Таблица 6

Материал защиты	Однократное рассеяние	Многократное рассеяние
Обычный бетон	27	21
Баритобетон	29	
Железо	38	
Свинцовое стекло	23	
Свинец	17	3,4

Для однократного рассеянного угла  $90^\circ$  и более тормозного излучения с граничной энергией более 3 МэВ рекомендуется [2] также использовать данные по ослаблению тормозного излучения с граничной энергией 1 МэВ.

#### Литература

1. Radiation protection design guidelines for 0.1-100 MeV particle accelerator facilities. NCRP Report No.51, Washington, 1977.
2. Swanson W.P. Radological safety aspects of the operation of electron linear accelerators, IAEA technical report series No.188, IAEA, Vienna, 1979.

3. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-7834, Дубна, 1974.
4. Tesh K. Particle accelerators, v.9, p.201-206, 1979.
5. Цаппе Д., Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-9481, Дубна, 1976.
6. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-10390, Дубна, 1977.
7. Weise H.-P. In proceedings of the 5-th congress of the radiation protection society on radiation protection, Jerusalem, March, 1980, p.766-769, Pergamon Press, Oxford, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июля 1985 года.

Внимание организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Цовбун В.И. P16-85-549  
Радиационные поля и защита электронных ускорителей на энергии до 100 МэВ.  
Краткие справочные данные

Для целей быстрой оценки радиационной обстановки и защиты электронных ускорителей в форме рекомендаций представлены данные об энергетической и угловой зависимости тормозного излучения, параметры его ослабления в защите; выходы фотонейтронов из мишеней и ослабление их в защите; данные для оценки поля излучения на местности; наведенной радиоактивности мишеней, воздуха, охлаждающей воды; коэффициенты отражения тормозного излучения и параметры ослабления отраженного излучения в защите.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Tsovbnun V.I. P16-85-549  
Radiation Fields and Shielding of Electron Accelerators with Energies up to 100 MeV. Short Reference Data

Information on prompt evaluation of radiation fields and shielding of electron accelerators is presented as recommendations. This is energy and angular dependencies of bremsstrahlung, its shielding attenuation parameters, yields of photoneutrons and its attenuation in shielding, parameters for evaluations of radiation fields near buildings; induced radioactivity of targets, of air, cooling water, albedo coefficients and attenuation parameters for scattered radiation in shielding.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985