

И Н С Т И Т У Т ⁴²
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 68

В.П.Приходько, В.Я.Чудаев

ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ
НА ВЭПП - 4

Новосибирск

1976

А Н Н О Т А Ц И Я

В настоящей работе приведено краткое описание размещения и защиты ускорительного комплекса ВЭШ-4, предназначенного для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках с энергией 2×7 ГэВ; выполнены оценки выходов наиболее проникающих видов излучений, сопутствующих работе комплекса; приведены парциальные и суммарные оценки доз для различных помещений и окружающей территории.

В в е д е н и е

Необходимым условием организации эффективной работы на ускорительных установках является наличие надежных представлений о радиационной опасности во всех режимах работы. Такие представления необходимы для правильной ориентации персонала установок, для обоснованного выбора размещения и конструкции новых узлов и защитных сооружений, а также для определения характера и объема дозиметрического контроля. Кроме того, информация об уровнях излучений в помещениях и на территории ускорительной установки нужна для согласования проектов размещения и защиты с органами санитарного надзора.

При анализе радиационных проблем на комплексе ускорительных установок со встречными электрон-позитронными пучками с энергией 2×7 ГэВ (ВЭШ-4) мы основывались, главным образом, на данных, приведенных в [2].

Большинство защитных сооружений комплекса ВЭШ-4 предназначено также для размещения накопителя протонов и антипротонов с энергией до 20 ГэВ. Этим обстоятельством обусловлены значительные, в ряде случаев, запасы в толщине защиты, являющиеся излишними для электрон-позитронного накопителя (например, верхние защиты кольца ВЭШ-4 и здания № 15).

СОСТАВ И РАЗМЕЩЕНИЕ КОМПЛЕКСА ВЭШ-4

Комплекс ускорительных установок ВЭШ-4 предназначен для проведения физических экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках с энергией до 7 ГэВ в каждом, а также на выведенных пучках синхротронного излучения.

Установка ВЭШ-4 состоит из накопительного кольца с жесткой фокусировкой и электронно-оптического канала. Накопительное кольцо ВЭШ-4 состоит из двух полуколец радиусом около 45 м, разделенных двумя прямолинейными промежутками длиной по 40 м каждый.

При работе комплекса ВЭШ-4 используются частицы, ускоренные в накопительном кольце существующего комплекса ускорительных установок ВЭШ-3 [1].

Общий план размещения установки ВЭШ-4 приведен на рис.1. Накопительное кольцо располагается на территории ИЯФ СО АН СССР в подземном железобетонном туннеле сечением 3×3 м, пол которого как и пол здания № 13, заглублен на 6,2 м ниже поверхности земли. Над туннелем насыпана земляная защита толщиной около 3,5 м (рис.2).

Прямолинейные промежутки размещены в зданиях № 13 и 15. Промежуток, размещенный в здании № 13, защищен двумя разборными железобетонными стенами толщиной 1 м и высотой не менее 5 м. В стенах предусмотрены лабиринты для прохода людей (рис.3).

В здании № 15 размещен второй прямолинейный промежуток. Здание заглублено в землю на 8 м. Стены и крыша выполнены из железобетона толщиной $1 + 1,2$ м. Над зданием № 15 насыпан слой земли толщиной около 2 м (рис.4). Дверные проемы здания перекрываются откатными защитными дверями из стали толщиной 30 см.

Электронно-оптический канал в основном размещен в помещениях комплекса ВЭШ-3 и здании № 15. Часть канала пересекает защищенное помещение, расположенное ниже уровня земли между зданиями № 13 и 15 (рис.1).

Здание № 15 имеет собственную систему вытяжной вентиляции производительностью $90 \text{ тыс. м}^3/\text{час}$ с выбросом отработанного воздуха за пределы здания на высоту около 15 м над поверхностью земли. Поступление воздуха происходит по кольцевым туннелям из

здания № 13. На рис. I стрелками показано направление движения воздуха.

Охлаждение магнитов ВЭШ-4 производится дистиллированной водой по замкнутому циклу.

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ВЭШ-4

Электроны или позитроны с энергией порядка 1,8 Гэв, накопленные в установке ВЭШ-3, инжектируются по каналу в установку ВЭШ-4. Увеличение магнитного поля в накопительном кольце ВЭШ-4 позволяет поднять энергию частиц до 7 Гэв. Максимальное число электронов, которое может быть накоплено, порядка 10^{12} . Время жизни накопленного пучка ожидается порядка 10000 секунд при вакууме $\sim 10^{-8}$ торр. Из-за ограничений, накладываемых эффектами встречи, интенсивность накопленного позитронного пучка не может превышать интенсивности пучка электронов. Учитывая возможности ВЭШ-3 как инжектора, можно принять, что количество накапливаемых позитронов будет составлять 10-20% от числа электронов.

С точки зрения радиационной опасности целесообразно выделить следующие режимы работы комплекса ВЭШ-4:

Режим 1 (случайные потери накопленного пучка). Весь накопленный пучок (10^{12} частиц при $E_0 = 7$ Гэв) гибнет локально в любом месте кольца ВЭШ-4. Можно полагать, что в среднем за неделю таких сбросов будет не более десяти. Следовательно, средняя интенсивность потерь составит порядка $0,7 \cdot 10^8$ электронов в секунду.

Режим 2 (наладочный). Энергия $E_0 = 1,5$ Гэв, число накопленных частиц порядка $7 \cdot 10^{10}$. В этом режиме возможен сброс пучка электронов в любом месте кольца ВЭШ-4 до 80 раз в неделю. Следовательно, средняя интенсивность потерь составит порядка $4 \cdot 10^7$ электронов в секунду.

Режим 3 (рабочий). Работа с накопленными пучками при проведении физических экспериментов, $E_0 = 7$ Гэв. Число накопленных частиц порядка 10^{12} . Можно полагать, что за неделю будет производиться

примерно 15 циклов накопления пучков. Средняя интенсивность потерь составит порядка $0,7 \cdot 10^8$ электронов в секунду. Можно считать, что в этом режиме работы потери пучка происходят равномерно по периметру кольца ВЭШ-4.

ОЦЕНКА ДОЗ НА ТЕРРИТОРИИ ВЭШ-4

Размещение комплекса ВЭШ-4 таково, что наиболее опасным в радиационном отношении является прямолинейный промежуток, расположенный в здании № 13.

Оценку доз проведем для нескольких точек, указанных на рис. 1, 2, 3, 4, 14. Точка А расположена непосредственно за бетонной защитой в здании № 13 на расстоянии около 7 м от оси пучка. Точка В расположена на высоте около 1 м над поверхностью земли за бетонной стеной толщиной 60 см на переходе через прямолинейный промежуток здания № 13. Точки С и Д расположены на поверхности земляной защиты кольца и здания № 15 соответственно. Оценки доз проведем также для точки Е, расположенной на территории здания № 2, ближайшего к комплексу ВЭШ-4, точки Е', симметричной точке Е относительно оси зд. 13, и точки F, расположенной в помещении между зданиями № 13 и № 15 (см. рис. 1).

При оценке доз мы будем, преимущественно пользоваться формулами, выведенными в [2].

Ускоренные электроны (позитроны) могут входить в стенки вакуумной камеры накопителя в основном только под очень малыми углами к ее поверхности. Поэтому можно считать, что развитие электронно-фотонного каскада заканчивается в металлических деталях установки и на защиту падает уже сильно рассеянное излучение.

Как показано в работе [2], в случае гашения пучка электронов с $E_0 = 7$ Гэв в металлических деталях накопителя толщиной порядка одной радиационной единицы длины максимальный вклад в эквивалентную дозу внутри защищенного помещения создается тормозным излучением в области углов к направлению пучка $\theta \leq 30^\circ$ и заряженными частицами ливня в области больших углов. За бетонной защитой толщиной от нескольких см до толщин порядка метра в пе-

реднем полупространстве основная радиационная опасность обусловлена тормозным излучением. Для обратного полупространства в этой области толщин защиты вклад нейтронов гигантского резонанса сопоставим с вкладом тормозного излучения или даже превышает его.

При больших толщинах защиты все большую роль начинают играть нейтроны высокой энергии, а в области $\vartheta \leq 30^\circ$ и мюоны.

Методику оценки доз подробно проиллюстрируем на примере точки А, находящейся за метровой бетонной защитой на расстоянии $\rho \sim 7$ м от оси пучка в прямолинейном промежутке ВЭШ-4 (рис.5).

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (Т.И.). Доза тормозного излучения $D_{Tu}(\vartheta, R)$ на расстоянии R м от места локальной гибели накопленного пучка электронов с $E_0 = 7$ ГэВ под углом ϑ к оси пучка может быть рассчитана по формуле:

$$D_{Tu}(\vartheta, R) = N \frac{D_{oi}(\vartheta) e^{-M_{эф}(\vartheta) \frac{d}{\sin \vartheta}}}{R^2(\vartheta)} \cdot B, \quad (I)$$

где $D_{oi}(\vartheta)$ - доза на расстоянии 1 м от железной мишени радиусом порядка 1 рад.ед.длины под углом ϑ к оси пучка в расчете на один гибнущий электрон с $E_0 = 7$ ГэВ (см.рис.5 в [2]);

d - толщина бетонной защиты;

B - фактор накопления;

N - число гибнущих электронов;

$M_{эф}$ - эффективный коэффициент ослабления тормозного излучения в бетоне в геометрии узкого пучка.

Мы примем, в отличие от [2], $M_{эф}$ равным $M(E_m)$, а не $M(E_m/2)$, ввиду сравнительно большой толщины защиты; E_m - энергия электронов и позитронов ливня, дающих максимальный вклад в интенсивность тормозного излучения под углом ϑ . E_m вычислялось по следующим формулам [2]:

$$E_m = \begin{cases} E_s / \vartheta \sqrt{6} & \text{при } E_s / E_0 \leq \vartheta \leq 0,6 E_s / E_{кр} \\ \frac{E_s^2}{2 E_{кр} \vartheta^2} & \text{при } \vartheta \geq 0,6 E_s / E_{кр} \end{cases} \quad (2)$$

где $E_s = 21$ МэВ;

$E_{кр}$ - критическая энергия.

Использованные в расчете величины E_m , $M_{эф}$, $D_{oi}(\vartheta)$ и B приведены в таблице I.

Таблица I

ϑ°	E_m , МэВ	$M_{эф}$, см ² /г	$D_{oi}(\vartheta)$, рад/э	B
30°	13,6	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-12}$	3,2
35°	11,6	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-12}$	3,5
40°	10,2	$2,30 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$	3,6
45°	9,0	$2,35 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	3,7
50°	8,0	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	3,8
55°	7,4	$2,57 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	3,9
60°	6,8	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	3,9
65°	5,6	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	4,4
70°	4,8	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	4,9
75°	4,4	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-12}$	5,1
90°	3,0	$3,48 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-12}$	7,8
105°	2,1	$4,26 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-12}$	13,0

Значения $D_{oi}(\vartheta)$ для углов 75° , 90° и 105° приведены без учета вклада аннигиляционного излучения.

Результаты вычислений дозы тормозного излучения в расчете на один гибнущий электрон $D_{Tu}(\vartheta, R)$ по формуле (I) для точки А представлены на рис.6.

Как видно из приведенной кривой, максимальный выход тормозного излучения за бетонной защитой толщиной 1 метр получается при потерях накопленного пучка в точке, которая соответствует углу $\vartheta \sim 65^\circ$.

В случае равномерной (равновероятной) гибели пучка электронов в пределах прямолинейного промежутка доза тормозного излучения за бетонной защитой (за большой промежуток времени) мо-

жет быть оценена по соотношению:

$$\bar{D}_{Tu} = \int_0^{\ell} N \frac{D_{Tu}(\vartheta, R)}{\ell} dx \quad (3)$$

где ℓ — длина промежутка, на котором могут гибнуть электроны. В наших условиях ($\ell > \rho$);

$$\bar{D}_{Tu} \approx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N}{\ell} dx \cdot D_{Tu}(\vartheta, R).$$

Переходя к переменной ϑ , имеем:

$$\bar{D}_{Tu} = \frac{NP}{\ell} \int_0^{\pi} \frac{d\vartheta}{\sin^2 \vartheta} D_{Tu}(\vartheta, R). \quad (4)$$

Используя значения $D_{Tu}(\vartheta, R)$, приведенные на рис. 6, и выполняя численное интегрирование, получаем:

$$\bar{D}_{Tu} = \frac{NP}{\ell} \cdot 0,58 \cdot 10^{-16} \text{ рад}. \quad (5)$$

В случае равномерной (равновероятной) гибели пучка в пределах прямолинейного промежутка ($\ell = 40$ м, $\rho = 7$ м):

$$\bar{D}_{Tu} \approx 1 \cdot 10^{-17} N \text{ рад} \quad (6)$$

В случае равномерной гибели электронов по всему периметру кольца ВЭШ-4 ($\ell \approx 360$ м):

$$\bar{D}_{Tu} = 1,1 \cdot 10^{-18} N \text{ рад}. \quad (7)$$

Результаты вычислений для точки А доз тормозного излучения по формулам (1), (6) и (7) и соответствующие им значения средних мощностей доз в режимах 1+3 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} e^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 65^\circ$)	63	16	0,95	1,9	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	10	2,5	0,15	0,3	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	1,1	0,28	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,03	0,28

Величины, указанные в первой строке таблицы, соответствуют максимально-возможному выходу тормозного излучения за защитой из бетона толщиной 1 м ($\vartheta = 65^\circ$).

Величины, приведенные для режима 2, рассчитывались с поправкой на отношение энергий 1,5/7.

НЕЙТРОНЫ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ. Доза от нейтронов высокой энергии (НВЭ) $D(\vartheta, R)$ на расстоянии R см от места локальной гибели накопленного пучка электронов с $E_0 = 7$ ГэВ под углом ϑ к оси пучка может быть рассчитана по формуле:

$$D(\vartheta, R) = 2 \cdot 10^{-3} E_0 N \frac{f(\vartheta)}{R^2} \cdot e^{-\frac{d}{\sin \vartheta \cdot \lambda_{\text{НВЭ}}}} \frac{[P]}{[\Phi_{\text{НВЭ}}]}, \quad (8)$$

где $f(\vartheta)$ — угловое распределение НВЭ, приведенное в [2];
 $\lambda_{\text{НВЭ}}$ — длина релаксации НВЭ в бетоне (~ 50 см);
 $[P]$ — предельно-допустимая мощность эквивалентной дозы НВЭ ($0,7 \cdot 10^{-6}$ бэр/сек);
 $[\Phi_{\text{НВЭ}}]$ — предельно-допустимая плотность потока НВЭ (~ 16 нвэ/см²·сек);

$2 \cdot 10^{-3} E_0$ - выход НВЭ из массивной железной мишени при гашении в ней электронно-фотонного ливня с энергией E_0 Гэв [2].

Результаты расчетов по (8) для точки А в расчете на один гибнущий электрон приведены на рис. 7. Максимальная доза от НВЭ наблюдается при $\vartheta = 60^\circ$.

Доза от НВЭ в случае равномерной (равновероятной) гибели пучка электронов на некотором промежутке может быть по аналогии с тормозным излучением записана в виде:

$$\bar{D}_{НВЭ} = \frac{NP}{c} \int_0^\pi \frac{d\vartheta}{\sin^2 \vartheta} \cdot D(\vartheta, R). \quad (9)$$

Численное интегрирование дает:

$$\bar{D}_{НВЭ} = 1,1 \cdot 10^{-17} \frac{NP}{c} \text{ Бэр}. \quad (10)$$

В случае равномерной (равновероятной) гибели пучка в пределах прямолинейного промежутка:

$$\bar{D}_{НВЭ} = 1,9 \cdot 10^{-18} N \text{ Бэр}. \quad (11)$$

В случае равномерной гибели электронов по всему периметру кольца

$$\bar{D}_{НВЭ} = 0,2 \cdot 10^{-18} N \text{ Бэр}. \quad (12)$$

Результаты вычислений для точки А доз НВЭ по формулам (8), (11), (12) и соответствующие им значения средних мощностей доз в режимах 1 + 3 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} e^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкБэр	Ср. мощн. дозы мкБэр/час	Доза за сброс мкБэр	Ср. мощн. дозы мкБэр/час	Мощность дозы мкБэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 60^\circ$)	7,3	1,8	0,11	0,22	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	1,9	0,48	0,03	0,06	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	0,2	0,05	0,003	0,006	0,05

Величины, указанные в первой строке таблицы соответствуют максимально возможному выходу НВЭ за защитой из бетона толщиной 1 м под углом $\vartheta = 60^\circ$. Величины, приведенные для режима 2, рассчитывались с поправкой на отношение энергий 1,5/7.

НЕЙТРОНЫ ГИГАНТСКОГО РЕЗОНАНСА. Доза от нейтронов гигантского резонанса (НГР) $D(\vartheta, R)$ на расстоянии R см от места локальной гибели накопленного пучка электронов с $E_0 = 7$ Гэв под углом ϑ к оси пучка может быть рассчитана по формуле:

$$D(\vartheta, R) = 0,1 E_0 \frac{N}{4\pi R^2} e^{-\frac{d}{\sin \vartheta \cdot \lambda_{НГР}}} \frac{[P]}{[\Phi_{НГР}]}, \quad (13)$$

где $0,1 E_0$ - выход НГР из железной мишени при гашении в ней электронно-фотонного ливня с энергией E_0 Гэв, [2].

$\lambda_{НГР}$ - длина релаксации НГР в бетоне (0,15 м),
 $[\Phi_{НГР}]$ - предельно-допустимая плотность потока НГР (20 нгр/см².сек).

Угловое распределение НГР изотропно.

Результаты расчетов по формуле (I3) для точки А для одного гибнущего электрона приведены на рис.8.

Максимальная доза от НГР наблюдается при $\vartheta = 90^\circ$.

Доза от НГР при гибели электронов в некотором промежутке (случай протяженного источника) может быть записана в виде:

$$\bar{D}_{нгр} = \frac{NP}{\ell} \int_0^\pi \frac{d\vartheta}{\sin^2 \vartheta} \cdot D(\vartheta). \quad (I4)$$

Интегрирование дает:

$$\bar{D}_{нгр} = 4,6 \cdot 10^{-18} \frac{NP}{\ell} \text{ Бэр}. \quad (I5)$$

В случае равномерной (равновероятной) гибели электронов в прямолинейном промежутке ВЭП-4 ($\ell = 40$ м):

$$\bar{D}_{нгр} = 0,8 \cdot 10^{-18} N \text{ Бэр/}e^-. \quad (I6)$$

В случае равномерной гибели электронов по всему периметру кольца ($\ell = 360$ м):

$$\bar{D}_{нгр} \approx 0,1 \cdot 10^{-18} N \text{ Бэр/}e^-. \quad (I7)$$

Результаты вычислений доз от НГР для точки А по формулам (I3), (I6) и (I7) и соответствующие им значения средних мощностей доз в режимах I+3 приведены в таблице 4.

Величины, указанные в первой строке таблицы, соответствуют максимально-возможному выходу НГР за защитой из бетона толщиной 1 м под углом 90° .

Величины, приведенные для режима 2, рассчитывались с поправкой на отношение энергий 1,5/7.

Таблица 4

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} e^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкБэр	Ср. мощн. дозы мкБэр/час	Доза за сброс мкБэр	Ср. мощн. дозы мкБэр/час	Мощность дозы мкБэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 90^\circ$)	4,9	1,2	0,074	0,15	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	0,8	0,2	0,012	0,025	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	0,1	0,025	0,0015	0,0031	0,025

МЮНЫ. Дозу от мюонов, возникающих при локальной гибели пучка электронов, можно оценить по формуле [2]:

$$D(\vartheta, R, d, X) = \frac{N}{R^2} \left(\frac{d\varphi_1}{d\Omega} + \frac{X}{10} \frac{d\varphi_2}{d\Omega} \right) \frac{[P]}{[ФМ]}, \quad (I8)$$

где $\frac{d\varphi_1}{d\Omega}$ — число парных мюонов, образуемых фотонами высокой энергии в кулоновом поле ядер мишени, в единичном телесном угле, энергия которых достаточна для прохождения защиты толщиной d (в расчете на один электрон), $M/\text{стер.}e^-$.

$\frac{d\varphi_2}{d\Omega}$ — число мюонов, образующихся при распаде пионов на пути $X=10$ м между мишенью и защитой в единичном телесном угле, энергия которых достаточна для прохождения защиты толщиной d (в расчете на один электрон). $M/\text{стер.}e^-$.

$[Ф_M]$ – предельно-допустимая плотность потока мюонов,
 $\mu / \text{см}^2 \cdot \text{сек}$ ($\sim 20 \frac{\text{шт}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$).

В интересующих нас диапазонах углов, толщин защиты и пролетных расстояний (точка А):

$$\frac{d\vartheta_1}{d\Omega} \ll \frac{x}{10} \frac{d\vartheta_2}{d\Omega} \quad (19)$$

Для железной мишени

$$\frac{d\vartheta_2}{d\Omega} \approx 0,6 \cdot 10^{-4} E_0 \sin \vartheta_{\text{max}} / \vartheta, \quad (20)$$

где $\vartheta_{\text{max}} = 1,3/2 E_{\text{мин}}$. $E_{\text{мин}}$ – минимальная энергия мюонов, достаточная для прохождения защиты толщиной d , ГэВ.

Результаты расчетов дозы от мюонов по формуле (18) с учетом (19) и (20) представлены на рис.9.

Максимальная доза от мюонов наблюдается при $\vartheta = 35-40^\circ$.

В случае гибели электронов пучка на прямолинейном промежутке l доза может быть записана в виде:

$$D_M = \frac{NP}{l} \int_{\vartheta_{\text{мин}}} \frac{d\vartheta}{\sin^2 \vartheta} D(\vartheta, R, d, x). \quad (21)$$

В этом случае интегрирование ведется не от нуля, а от $\vartheta_{\text{мин}} \sim 10^\circ$, т.к. вклад меньших углов существенно подавляется ядерным поглощением первичных пионов в магнитах кольца ВЭПП-4.

Численное интегрирование дает:

$$D_M = 0,25 \cdot 10^{-16} \frac{NP}{l} \text{ бэр} \quad (22)$$

что в случае равномерных потерь пучка в прямолинейном промежутке составляет:

$$D_M = 4,4 \cdot 10^{-18} N \text{ бэр} \quad (23)$$

Результаты вычислений доз от мюонов для точки А для разных режимов работы приведены в таблице 5.

Таблица 5

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} e^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 e^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} e^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 e^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 37,5^\circ$)	6,0	1,5	$\approx 0,09$	$\approx 0,2$	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	4,4	1,1	$\leq 0,06$	$\leq 0,13$	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	0,48	0,12	$\leq 0,007$	$\leq 0,014$	0,12

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при равномерном сбросе пучка в пределах промежутка дозы от мюонов лишь на 27% ниже, чем при локальном сбросе пучка в наилучших условиях, т.е. при $\vartheta \sim 37,5^\circ$.

СУММАРНАЯ ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЙ, ПРОШЕДШИХ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТУ. Зависимость суммарной дозы от излучений, прошедших через защиту, от угла ϑ показана на рис.10. Видно, что максимальные дозы при локальном сбросе создаются тормозным излучением. Однако, в области малых и больших ϑ суммарная доза в основном определяется мюонами и НГР соответственно.

В случае равномерного сброса пучка электронов в пределах прямолинейного промежутка суммарная доза в 4,4 раза меньше максимально-возможной (при $\vartheta \sim 65^\circ$). При этом вклад мюонов составляет порядка 25%.

Суммарные дозы в точке А для излучений, прошедших через бетонную защиту при различных режимах работы приведены в таблице 6.

Таблица 6

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 \text{ e}^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 65^\circ$)	75	19	1,1	2,3	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	17,1	4,3	0,25	0,52	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	1,9	0,48	0,03	0,05	0,48

Величины, приведенные в таблице (в случае распределенных потерь пучка), по порядку величины близки к уровню естественного фона. Однако, ввиду отсутствия защитного перекрытия над прямолинейным промежутком (при значительной толщине боковой защиты) необходимо сделать оценку дозы от излучений, рассеянных потолком здания № 13.

РАССЕЯННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Учитывая, что до защиты основной вклад в эквивалентную дозу создается тормозным излучением и нейтронами гигантского резонанса [2], при расчете дозы рассеянного излучения достаточно ограничиться оценкой вклада только этих двух видов излучений. Кроме того, учитывая, что корректные расчеты доз рассеянного излучения с применением дифференциального альbedo чрезвычайно трудоемки, мы ограничимся упрощенными оценками с использованием интегрального токового альbedo.

Для случая локальной гибели пучка электронов в прямолинейном промежутке количество энергии тормозного излучения, отраженное единицей поверхности потолка, $dE_{\text{расс}}/ds$ (Мэв/м²) может быть записано в виде:

$$\frac{dE_{\text{расс}}}{ds} \approx \alpha(\vartheta) \frac{dE_{\text{над}}}{ds}, \quad (24)$$

где $\alpha(\vartheta)$ — эффективное интегральное токовое энергетическое альbedo тормозного излучения, испущенного под углом ϑ к оси пучка, для бетонной поверхности потолка здания;

$\frac{dE_{\text{над}}}{ds}$ — энергия тормозного излучения, испущенная под углом ϑ к оси пучка и падающая на единицу поверхности потолка, (Мэв/м²).

В формуле (24) принято, что угол между направлением падения излучения на потолок и плоскостью потолка приближенно равен ϑ .

Учитывая, что численные значения энергетического и дозового альbedo мало отличаются друг от друга, воспользуемся для вычисления величины $\alpha(\vartheta)$ формулой для дозового альbedo, приведенной в [3]:

$$\alpha(\vartheta) = \frac{3,2}{E_{\text{эф}}} \cdot \frac{1}{\sin \vartheta} \cdot \frac{\rho}{Z^2}, \quad * \quad (25)$$

где $E_{\text{эф}}$ — эффективная энергия падающего ТИ, Мэв;

ρ — плотность рассеивателя (бетон, $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$);

Z — порядковый номер рассеивателя (для бетона 13).

Подставляя численные значения ρ и Z имеем:

$$\alpha(\vartheta) \approx \frac{0,051}{E_{\text{эф}} \cdot \sin \vartheta}. \quad (26)$$

Величина $dE_{\text{над}}/ds$ может быть записана в следующем виде:

$$\frac{dE_{\text{над}}}{ds} = \gamma(\vartheta) \frac{d\Omega}{ds} \quad (27)$$

* В работе [3] вместо $\sin \vartheta$ используется косинус дополнительного до $\pi/2$ угла.

где $\gamma(\theta)$ — энергия тормозного излучения, испускаемая в единичный телесный угол под углом θ к оси пучка, Мэв/стер;

$d\Omega$ — телесный угол, в котором виден единичный элемент площади потолка ds с места гибели пучка (под углом θ к оси пучка).

Из рис. II видно, что

$$d\Omega = \frac{ds \cdot \sin \theta}{R^2} = \frac{ds \cdot \sin^3 \theta}{h^2}. \quad (28)$$

Подставляя в (24) величины из (26) и (27), с учетом (28) получим:

$$\frac{dE_{\text{расс}}}{ds} = \frac{0,051}{E_{\text{эф}}} \gamma(\theta) \frac{\sin^2 \theta}{h^2}. \quad (29)$$

Результаты расчетов $dE_{\text{расс}}/ds$ с использованием численных значений $E_{\text{эф}}$ и $\gamma(\theta)$ в расчете на один электрон с $E_0 = 7$ Гэв из [2] приведены в таблице.

θ°	$E_{\text{эф}}, \text{ Мэв}$	$\gamma(\theta), \text{ Мэв/стер}$	$dE_{\text{расс}}/ds, \text{ Мэв/м}^2$
30°	6,8	350	$3,0 \cdot 10^{-3}$
60°	3,4	45,5	$2,3 \cdot 10^{-3}$
90°	1,5	17,5	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Среднее значение:			$\sim 2,7 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы видно, что величина $dE_{\text{расс}}/ds$ практически не зависит от θ и, следовательно, для переднего полупространства ее можно приближенно считать постоянной в пределах "горячего пятна" на потолке (по крайней мере для наихудшего случая гибели пучка в начале прямолинейного промежутка).

Рассматривая приближенно "горячее пятно" как изотропный

(в телесном угле 2π) источник рассеянного излучения, можно записать для интенсивности в точке наблюдения следующее выражение:

$$\gamma_{\text{расс}} \approx \frac{S_{hs}}{2\pi R_s^2} \frac{\overline{dE_{\text{расс}}}}{ds}, \quad (30)$$

где $\frac{\overline{dE_{\text{расс}}}}{ds}$ — средняя величина энергии тормозного излучения, отраженной единицей площади потолка ($\sim 2,7 \cdot 10^{-3}$, Мэв/м²·е);

S_{hs} — площадь "горячего пятна" на потолке (60x36 м²);

R_s — расстояние от эффективного центра "горячего пятна" до точки наблюдения.

Численные оценки проведем для точки A' , находящейся несколько дальше от оси пучка, чем точка A (на 14 м), но отличающейся тем; что из нее видно все "горячее пятно" на потолке. Для A' $R_s \sim 26$ м.

Подставляя численные значения в (30), получим в расчете на один гибнущий электрон с $E_0 = 7$ Гэв:

$$\gamma_{\text{расс}} \approx \frac{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 36}{2\pi \cdot 26^2 \cdot 10^4} = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ Мэв/см}^2.$$

Величина дозы рассеянного излучения $D_{\text{расс}}$ может быть вычислена умножением $\gamma_{\text{расс}}$ на эффективный коэффициент поглощения энергии $\chi(E_{\text{расс,эф}})$. Принимая $\chi(E_{\text{расс,эф}}) \approx 0,028 \text{ см}^2/\text{г}$ для $E_{\text{расс,эф}} \sim 0,5 \div 1$ Мэв, получим:

$$D_{\text{расс}} = \frac{1,35 \cdot 10^{-7} \cdot 0,028}{6,25 \cdot 10^7} = 0,6 \cdot 10^{-16} \text{ рад/е}, \quad (31)$$

где $6,25 \cdot 10^7 \text{ Мэв/г} = 1 \text{ рад}$.

В случае равномерного сброса пучка в промежутке доза рассеянного тормозного излучения будет примерно вдвое меньше.

Рассмотрим рассеяние нейтронов гигантского резонанса. Для случая локальной гибели электронов с $E_0 = 7$ Гэв в прямолинейном промежутке доза от НГР, рассеянных потолком, в расчете на один электрон может быть записана в виде:

$$D_{\text{расс}} = \alpha \left(\frac{0,1 E_0}{4\pi R^2} \right) \frac{S_{hs}}{2\pi R_s^2} \frac{[P]}{[\Phi_{\text{НГР}}]}, \quad (32)$$

где α - дозовое токовое альbedo для НГР; при углах падения НГР на бетон близких к нормальному можно принять $\alpha \sim 0,3$ [3].

Принимая $R \sim 20$ м, $R_s \approx 26$ м получим:

$$D_{\text{расс}} \leq 0,74 \cdot 10^{-16} \text{ бэр/е}^- \quad (33)$$

Суммарная доза в точке А от рассеянного излучения составит при локальном сбросе в промежутке менее $1,3 \cdot 10^{-16}$ бэр/электрон, а при равномерном сбросе в пределах промежутка величину порядка $0,8 \cdot 10^{-16}$ бэр на один электрон с $E_0 = 7$ ГэВ. Таким образом доза от рассеянного излучения при локальном сбросе в 1,7 раза превышает максимальную дозу от прямого излучения, прошедшего через защиту, а при равномерном сбросе - примерно в 4,5 раза.

Суммарные дозы в точке А от рассеянного излучения для разных режимов работы приведены в таблице 7.

Таблица 7

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ е}^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 \text{ е}^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ е}^-/\text{сек}$
	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке	130	33	2,0	4,0	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке	80	20	1,2	2,5	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца	9	2,2	0,13	0,28	2,2

В таблице 8 приведены суммарные дозы в точке А с учетом как рассеянного излучения, так и излучений, прошедших через защиту.

Таблица 8

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ е}^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 \text{ е}^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ е}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ е}^-/\text{сек}$
	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке	210	52	3,1	6,3	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке	97	24	1,5	3,0	-
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца	11	2,7	0,16	0,33	2,7

Из таблицы видно, что ожидаемые мощности доз в точке А в 20 и более раз ниже предельно-допустимых величин, предусматриваемых ОСП-72 при профессиональном облучении [4].

ОЦЕНКА ДОЗ В ТОЧКЕ В. Расчет доз в точке В выполняется по формулам аналогичным формулам для точки А, с той лишь разницей, что необходимо принимать во внимание косое расположение защитной стены по отношению к направлению пучка, а также близость точки В к оси пучка, вследствие чего необходимо учитывать излом траектории пучка ($16,5^\circ$) в середине прямолинейного промежутка.

Результаты вычислений доз для точки В от всех излучений, прошедших через бетонную защиту толщиной 50 см при локальной гибели пучка в прямолинейном промежутке, в расчете на один гибнущий электрон, представлены на рис.13. Видно, что радиационная опасность в точке В в основном определяется тормозным излучением и только в случае потери пучка вблизи точки В ($\theta > 90^\circ$) доминирующей

компонентой возможно становятся нейтроны гигантского резонанса.

Суммарные дозы от всех видов излучений для различных режимов работы приведены в таблице 9.

Таблица 9

Режим работы	Режим 1.		Режим 2.		Режим 3.
	$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{сек}$		$E_0 = 1,5 \text{ ГэВ}$ $N = 7 \cdot 10^{10} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 4 \cdot 10^7 \text{ e}^-/\text{сек}$		$E_0 = 7 \text{ ГэВ}$ $N = 10^{12} \text{ e}^-$ $\bar{n} = 0,7 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{сек}$
Характер потерь пучка	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Доза за сброс мкбэр	Ср. мощн. дозы мкбэр/час	Мощность дозы мкбэр/час
Локальный сброс пучка в прямолинейном промежутке ($\vartheta \sim 10^\circ$)	$6,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	98	201	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка в прямолинейном промежутке.	$2,8 \cdot 10^3$	$0,7 \cdot 10^3$	43	86	—
Равномерный (равновероятный) сброс пучка по периметру кольца.	$0,3 \cdot 10^3$	80	4,8	9,6	80

Из таблицы видно, что в наихудшем случае систематического локального сброса в промежутке при $\vartheta \sim 10^\circ$ мощность дозы может достигать величины $\sim 1,6$ мбэр/час, что можно считать допустимым, т.к. на проходе нет рабочих мест (для помещений с временем пребывания персонала менее 18 часов в неделю ОСП-72 предусматривают в качестве предельно-допустимой мощности дозы величину 2,4 мбэр/час).

ОЦЕНКА ДОЗ В ТОЧКЕ С. Из рис.8-10 в [2] видно, что при толщине защиты свыше 3,5 м грунта (см.рис.2) достаточно проанализировать вклад в дозу только нейтронов высокой энергии и мюонов.

Оценки показывают, что в наихудшем случае (систематическая локальная гибель пучка на кольце при $\vartheta \sim 72^\circ$) доза за сброс от НВЭ составляет $\sim 0,1$ мкбэр, а средняя мощность дозы $\sim 0,02$ мкбэр/час.

Корректная оценка вклада мюонов затруднена в силу неприменимости формул, приведенных в [2], из-за значительной фильтрации и больших значений углов к оси пучка (формулы приводят к нулевым результатам). Дополнительное рассмотрение показывает, что с достаточной уверенностью можно принять, что ни при каких режимах работы доза за сброс не превысит величины ~ 1 мкбэр (соответственно мощность дозы $\sim 0,2$ мкбэр/час).

ОЦЕНКА ДОЗ В ТОЧКЕ Д. Результаты, приведенные для точки С, могут быть перенесены на точку Д, поскольку верхняя защита здания № 15 эквивалентна защите полуколец ВЭШ-4.

ОЦЕНКА ДОЗ В ТОЧКЕ Е. Точка Е выбрана на верхнем этаже здания № 2 в силу того, что с этого уровня виден участок крыши здания № 13 над прямолинейным промежутком ВЭШ-4, являющийся источником рассеянного излучения (см.рис.14).

Точный расчет дозы от рассеянного крышей излучения с детальным учетом его углового распределения представляет собой громоздкую задачу. Однако для наших целей можно ограничиться приближенной оценкой, используя достаточно консервативное предположение об изотропности интенсивности рассеянного излучения в телесном угле 2π на наружной поверхности крыши:

$$J_{\text{расс}}(\alpha) = C \quad (34)$$

Здесь $J_{\text{расс}}(\alpha)$ — интенсивность рассеянного излучения, проходящего в единицу телесного угла под углом α к нормали к поверхности крыши, Мэв/см².стер.

Величина константы С находится из условия нормировки на полную интенсивность рассеянного излучения:

$$\int_0^{\pi/2} C \cdot 2\pi \cdot \sin \alpha \, d\alpha = I_0 e^{-M d} \cdot (B-1), \quad (35)$$

где I_0 — интенсивность излучения, падающая на внутреннюю поверхность крыши;
 M — эффективный коэффициент ослабления излучения материалом крыши;

d — толщина крыши вдоль направления распространения излучения;

B — фактор накопления.

Вычисляя интеграл и разрешая (35) относительно C , с учетом (34), получаем:

$$I_{\text{расс}}(\alpha) = \frac{1}{2\pi} I_0 e^{-\mu d} \cdot (B-1). \quad (36)$$

Количество энергии рассеянного излучения, испускаемое с единицы площади крыши под углом α к нормали в единичный телесный угол есть

$$\sigma(\alpha) = I(\alpha) \cos \alpha = \frac{1}{2\pi} I_0 \cos \alpha \cdot e^{-\mu d} \cdot (B-1). \quad (37)$$

На расстояниях R_s , больших по сравнению с размерами "горячего пятна" на крыше, полная интенсивность рассеянного излучения может быть записана в виде:

$$I_{\text{расс}} \sim \frac{\sigma(\alpha) \cdot S}{R_s^2} = \frac{1}{2\pi R_s^2} I_0 \cos \alpha \cdot S \cdot e^{-\mu d} \cdot (B-1), \quad (38)$$

где S — площадь "горячего пятна" на крыше.

Для перехода к мощности дозы умножим обе части равенства на коэффициент поглощения энергии рассеянного излучения $\gamma_{\text{расс}}$, а правую часть равенства, кроме того, умножим и разделим на эффективный коэффициент поглощения энергии прямого излучения γ_0 . В результате получим:

$$P_{\text{расс}} = I_{\text{расс}} \cdot \gamma_{\text{расс}} = \frac{\gamma_{\text{расс}}}{\gamma_0} P_0 \frac{S \cdot \cos \alpha}{2\pi R_s^2} \cdot e^{-\mu d} \cdot (B-1), \quad (39)$$

где $P_0 = I_0 \gamma_0$ — мощность дозы прямого излучения, падающего на внутреннюю поверхность крыши.

Аналогичное выражение может быть записано для дозы от рассеянного излучения:

$$D_{\text{расс}} = \frac{\gamma_{\text{расс}}}{\gamma_0} D_0 \frac{S \cdot \cos \alpha}{2\pi R_s^2} \cdot e^{-\mu d} \cdot (B-1). \quad (40)$$

Величину дозы D_0 на внутренней поверхности крыши здания № 13 при локальном сбросе пучка в прямолинейном промежутке в расчете на один электрон можно оценить из соотношения:

$$D_0(\vartheta) = \frac{P_1(\vartheta)}{10^{11} R^2} \text{ рад/}e^-, \quad (41)$$

где $P_1(\vartheta)$ — мощность дозы тормозного излучения (рад/сек) на расстоянии l м от мишени, под углом ϑ к оси пучка в расчете на 10^{11} электронов/сек с энергией $E_0 = 7$ Гэв (см. рис. 5 в [2]);

$R = \frac{H}{\sin \vartheta}$ — расстояние от места гибели пучка до эффективно-го центра видимой из точки E части "горячего пятна" на крыше здания № 13.

$H = 14,5$ м — средняя высота крыши здания № 13 на уровне орбиты.

В таблице 10 приведены результаты расчетов величины для трех значений ϑ :

Таблица 10

ϑ°	$D_0(\vartheta), \text{ рад/}e^-$
30°	$0,9 \cdot 10^{-14}$
60°	$0,6 \cdot 10^{-14}$
90°	$0,4 \cdot 10^{-14}$

Видно, что значения $D_0(\vartheta)$ не слишком резко зависят от места гибели пучка в промежутке. Поэтому для дальнейшего можно принять для D_0 величину $\sim 0,7 \cdot 10^{-14}$ рад/е⁻. Подставляя в (40) значения:

$$D_0 \sim 0,7 \cdot 10^{-14} \text{ рад/}e^-,$$

$$R_s \sim 60 \text{ м},$$

$$S \sim 1000 \text{ м}^2,$$

$$\mu d \sim 1 \text{ (крыша выполнена из бетона толщиной } \sim 25 \text{ г/см}^2\text{),}$$

$$B \sim 2$$

$$\cos \alpha = 1/8$$

и полагая $\gamma_{\text{расс}}/\gamma_0 \sim 1$, получим:

$$D_{\text{расс}} = 1,4 \cdot 10^{-17} \text{ Зэп/е}^- \quad (42)$$

При сбросе $N = 10^{12}$ электронов доза от рассеянного излучения в точке Е составит 14 мкбэр, а мощность дозы в режиме I ~ 4 мкбэр/час.

В точке Е, симметричной точке Е относительно оси здания № 13 (в направлении на институты физики полупроводников и теоретической и прикладной механики), средняя мощность дозы будет менее 4 мкбэр/час поскольку на участок крыши, видимый из этой точки, может падать излучение, образующееся либо при гибели позитронного пучка (интенсивность которого на порядок меньше интенсивности пучка электронов), либо при гибели пучка электронов с $\vartheta \gg 90^\circ$.

ОЦЕНКА ДОЗ В ТОЧКЕ F. Сначала оценим вклад тормозного излучения ускоряющих резонаторов (частота 180,9 МГц) ВЭП-4, размещаемых в количестве 10 штук вдоль всего прямолинейного промежутка в здании № 15. Резонаторы работают в непрерывном режиме с амплитудным напряжением до 2 МВ. Они являются мощными источниками излучения, т.к. из-за большой величины ускоряющего напряжения электроны автоэмиссии, появляющиеся в вакуумном зазоре, могут ускоряться до значительных энергий.

Выход тормозного излучения, возникающего в стенках резонаторов при торможении в них ускоренных электронов автоэмиссии, в основном, определяется количеством этих электронов, которое в свою очередь зависит от целого ряда факторов, таких как материал и конструкция электродов, количество микроострий на них, чистота обработки, степень загрязненности и т.д. Поскольку зазор между электродами в резонаторе имеет значительную величину (0,5 м), при точном расчете выхода тормозного излучения необходимо учитывать как зависимость величины тока эмиссии от фазы напряжения на электродах, так и зависимость максимальной набранной энергии тормозящихся в стенках электронов от фазы в момент их эмиссии. Соответствующие расчеты выполнены в [7]. Выход тормозного излучения из одного резонатора на расстоянии $R \sim 1$ м при напряжении 2 МВ с

учетом поглощения в обечайке из нержавеющей стали толщиной 3 см оценивается величиной порядка 6000р/час. Определяющий вклад в дозу тормозного излучения создается электронами, ускоренными до энергий 0,5–0,94 Мэв. Среднее расстояние от резонаторов до точки F порядка 24 м. Таким образом, мощность дозы в точке F от 10 резонаторов без учета защиты составляет:

$$P = \frac{6000 \cdot 10}{24^2} \sim 100 \text{ р/час}$$

Бетонная стена здания № 15 по данным [7] обеспечивает ослабление $\sim 10^6$. Следовательно, мощность дозы в точке F составит:

$$P \sim 0,1 \text{ мр/час}$$

Технологические проемы в стене здания № 15 перекрываются свинцовой защитой толщиной 15 см, а дверной проем – стальной откатной дверью толщиной 30 см, что по защитной эффективности эквивалентно стене здания № 15 (по тормозному излучению).

Оценим далее вклад в дозу в точке F от излучения, возникающего вследствие потерь электронов при прохождении пучка по каналу ВЭП-3 – ВЭП-4. Средняя интенсивность пучка электронов, проходящего по каналу, составляет $\sim 0,8 \cdot 10^8$ электронов/сек. В рабочем режиме потери в канале не превысят 10%. Оценки доз от тормозного излучения и нейтронов гигантского резонанса на наружной поверхности свинцового экрана толщиной $d = 5$ см, находящегося на расстоянии $\rho = 1,3$ м от оси канала были выполнены по формулам, аналогичным (I) и (I3). Ввиду незначительной толщины экрана по сравнению с длинами релаксации нейтронов в свинце, а также малости выхода нейтронов высокой энергии учитывать вклад последних в дозу нет необходимости. В расчетах длина релаксации нейтронов гигантского резонанса в свинце принималась равной 15 см. Максимальная суммарная доза наблюдается под углом $\vartheta \sim 60^\circ$. С учетом вклада резонаторов доза в точке F не превысит величины 1,1 мбэр/час.

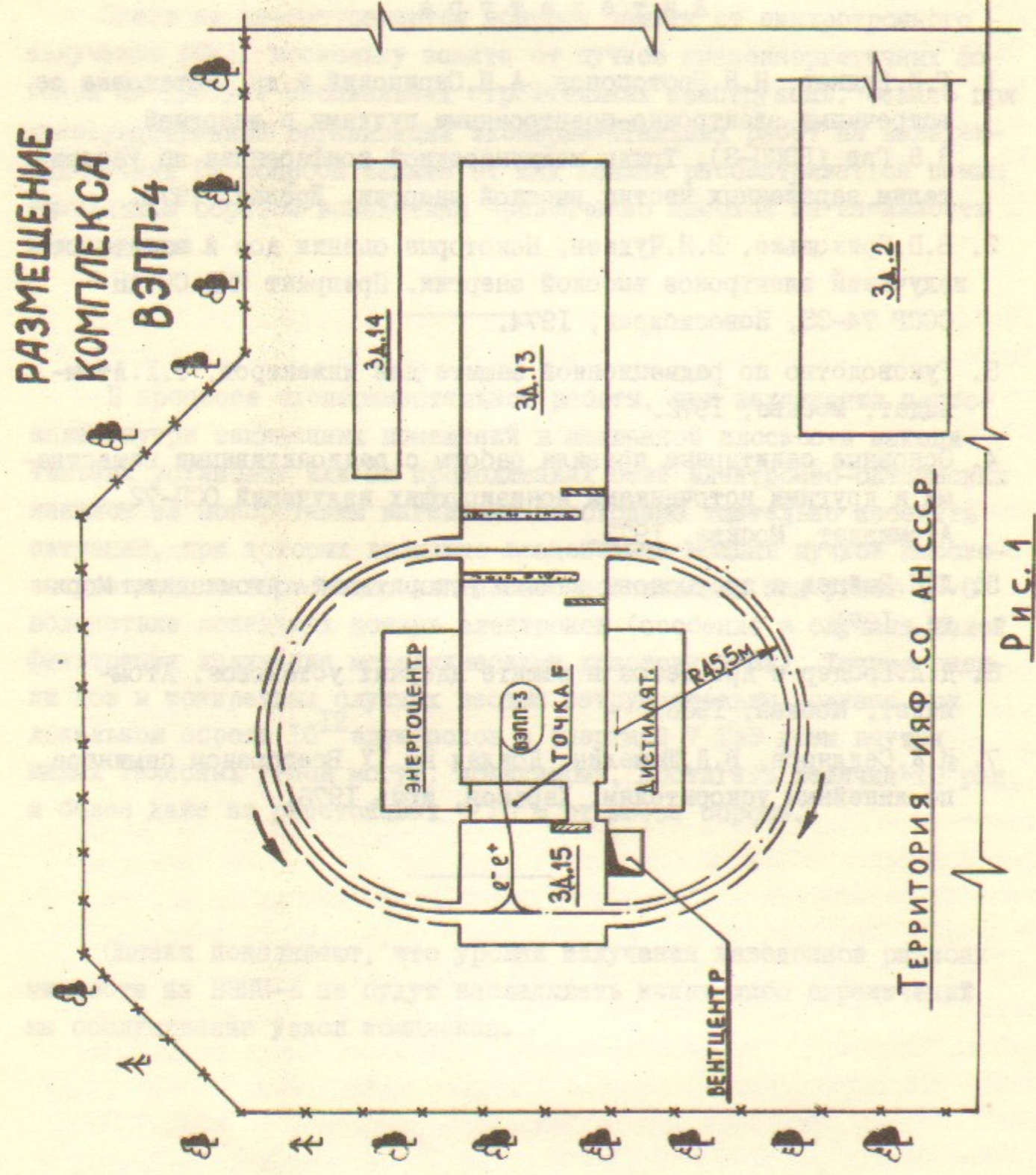
Здесь не рассматриваются вопросы защиты от синхротронного излучения (СИ), поскольку защита от пучков низкоэнергетичных фотонов не требует специальных строительных конструкций. Однако при непосредственной организации экспериментальных работ на выведенных пучках СИ вопросы защиты от них должны рассматриваться самым тщательным образом вследствие чрезвычайно высокой интенсивности этих пучков.

В процессе экспериментальной работы, при нахождении персонала внутри защищенных помещений в медианной плоскости накопительных установок или на продолжениях осей электронно-оптических каналов за поворотными магнитами необходимо тщательно избегать ситуаций, при которых возможно воздействие мощных пучков высокоэнергетичного тормозного излучения, возникающих под углом $\theta \sim 0^\circ$ вследствие локальных потерь электронов (особенно в случаях малой фильтрации излучения металлическими конструкциями). Точные оценки доз в конкретных случаях весьма затруднительны, однако при локальном сбросе 10^{12} электронов с энергией 7 ГэВ дозы внутри малых телесных углов могут, по видимому, достигать величин $\sim 10^3$ рад и более даже на расстояниях ~ 10 м от места сброса.

Оценки показывают, что уровни излучения наведенной радиоактивности на ВЭП-4 не будут накладывать каких-либо ограничений на обслуживание узлов комплекса.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский и др. Установка со встречными электронно-позитронными пучками с энергией 3,5 Гэв (ВЭП-3). Труды международной конференции по ускорителям заряженных частиц высокой энергии. Ереван, 1970.
2. В.П.Приходько, В.Я.Чудаев. Некоторые оценки доз и защиты от излучений электронов высокой энергии. Препринт ИЯФ СО АН СССР 74-35, Новосибирск, 1974.
3. Руководство по радиационной защите для инженеров, т.1. Атомиздат, Москва, 1972.
4. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72. Атомиздат, Москва, 1973.
5. Л.Н.Зайцев и др. Основы защиты ускорителей. Атомиздат, Москва, 1971.
6. Д.Л.Бродер и др. Бетон в защите ядерных установок. Атомиздат, Москва, 1966.
7. И.К.Седляров, В.Д.Шемелин. Доклад на IV Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям. Харьков, июль 1976.



СЕЧЕНИЕ ТУННЕЛЯ ВЭПП-4

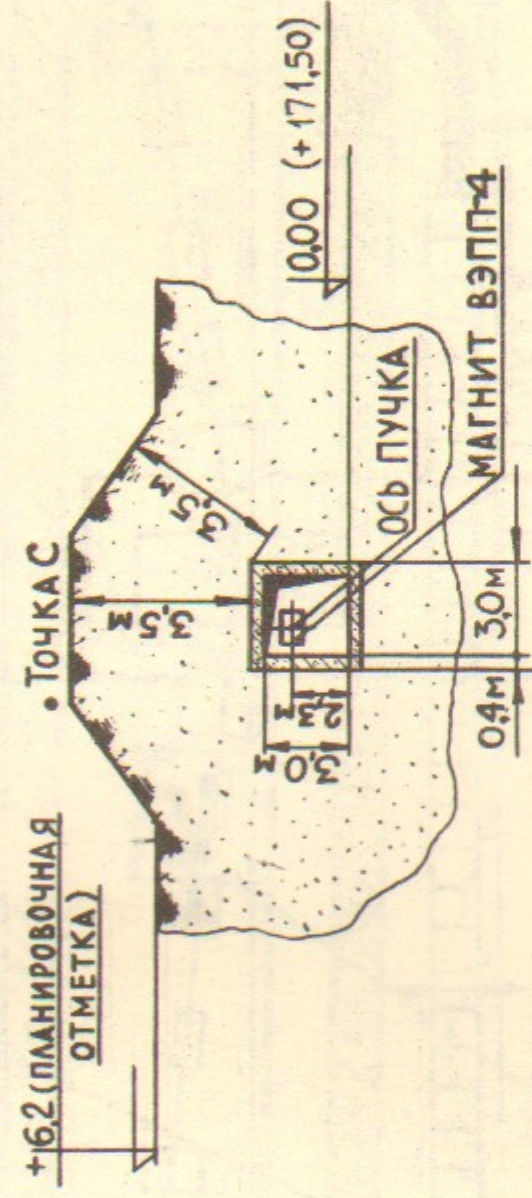


Рис. 2

ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ ПРОМЕЖУТОК ВЭПП-4

В ЗД. 13

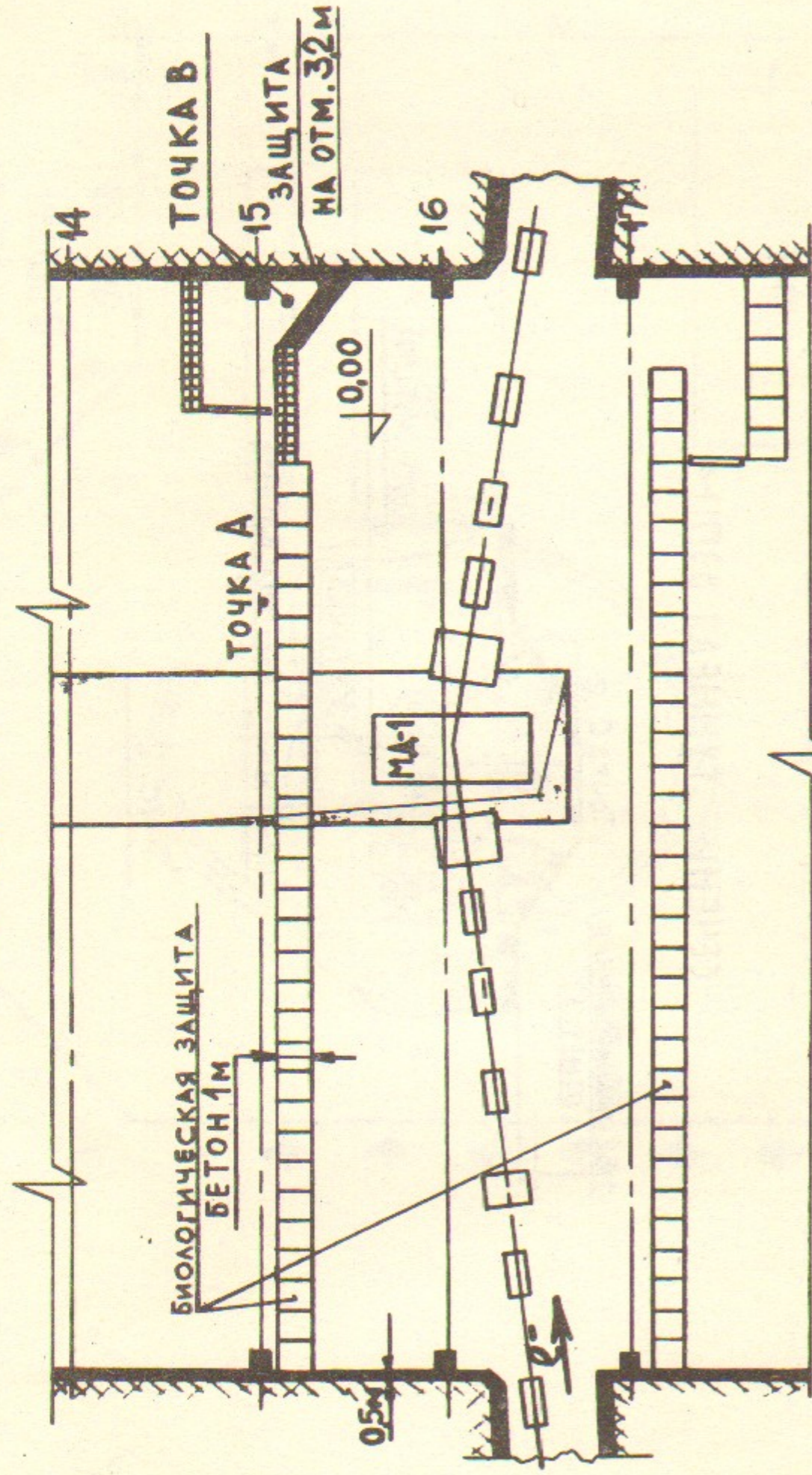


Рис. 3

СЕЧЕНИЕ ЗДАНИЯ 15

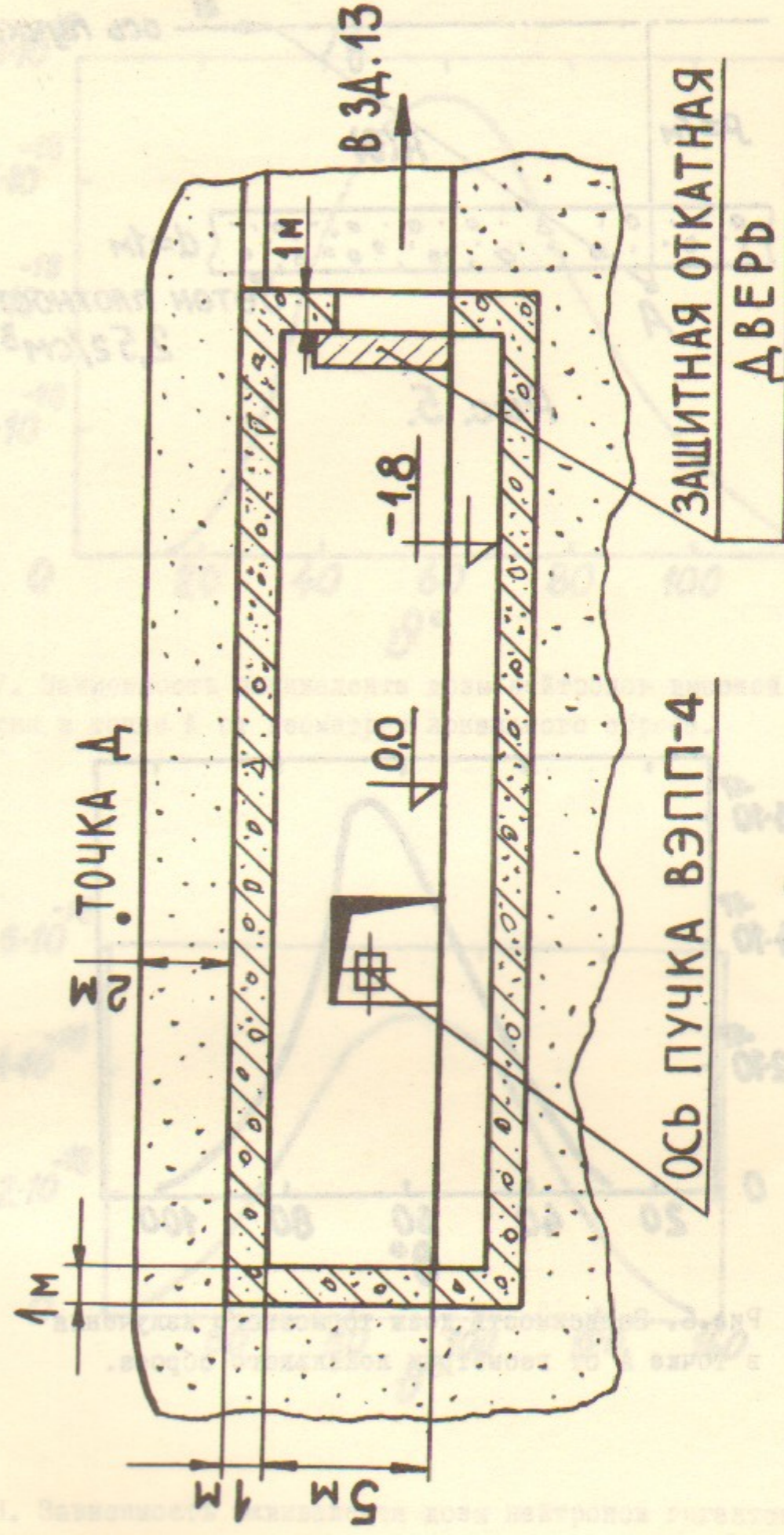


Рис. 4

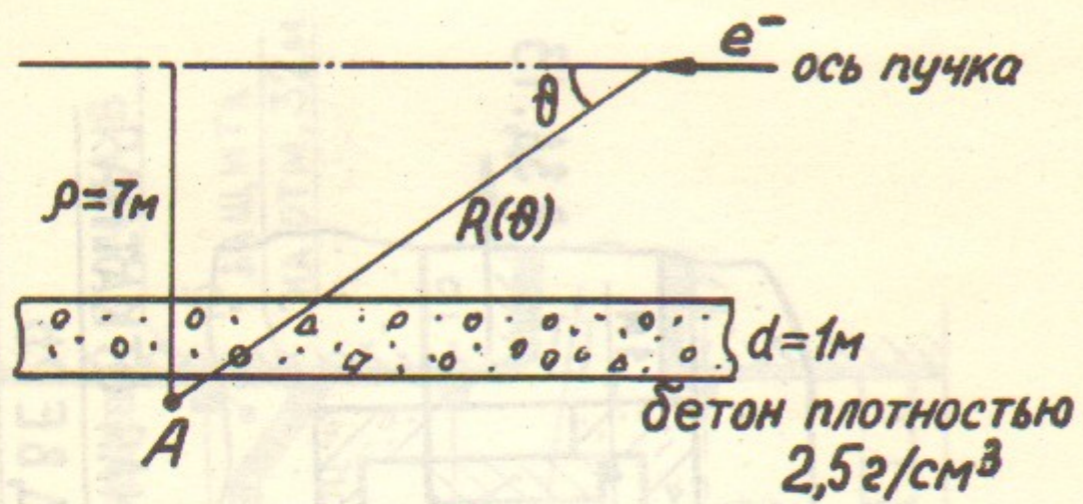


Рис. 5.

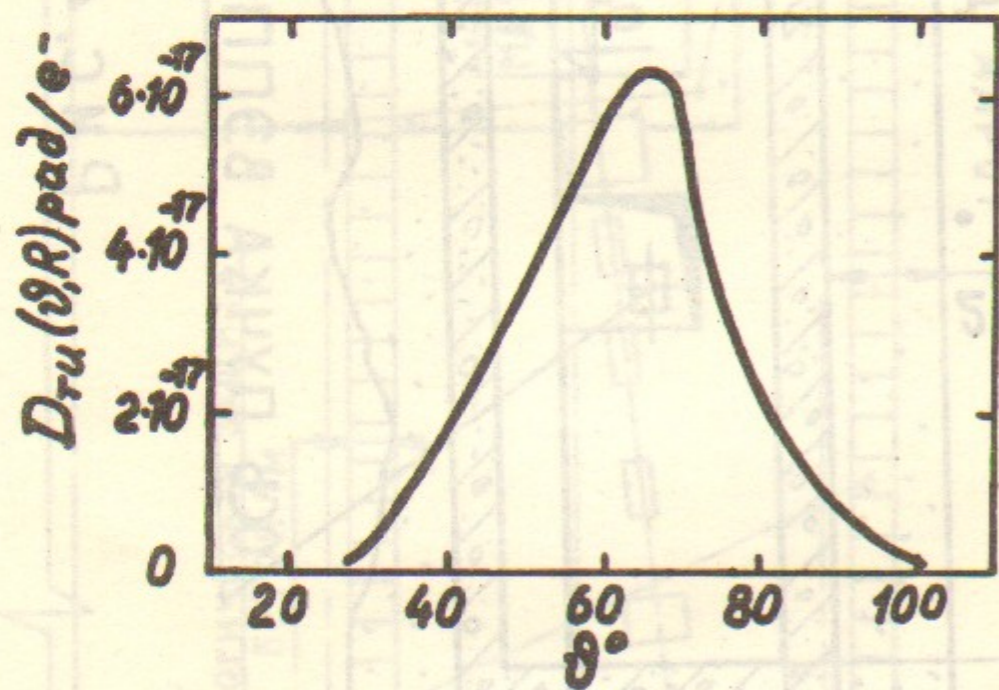


Рис. 6. Зависимость дозы тормозного излучения в точке А от геометрии локального сброса.

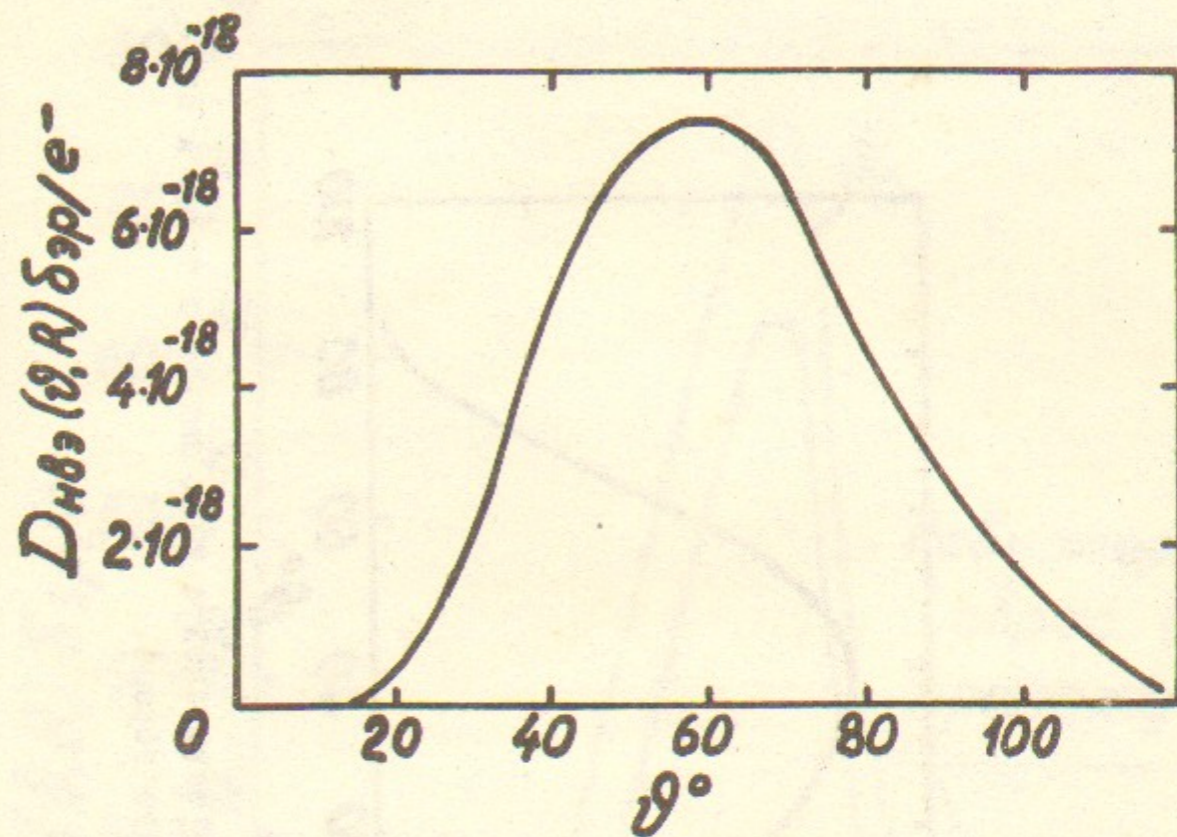


Рис. 7. Зависимость эквивалента дозы нейтронов высокой энергии в точке А от геометрии локального сброса.

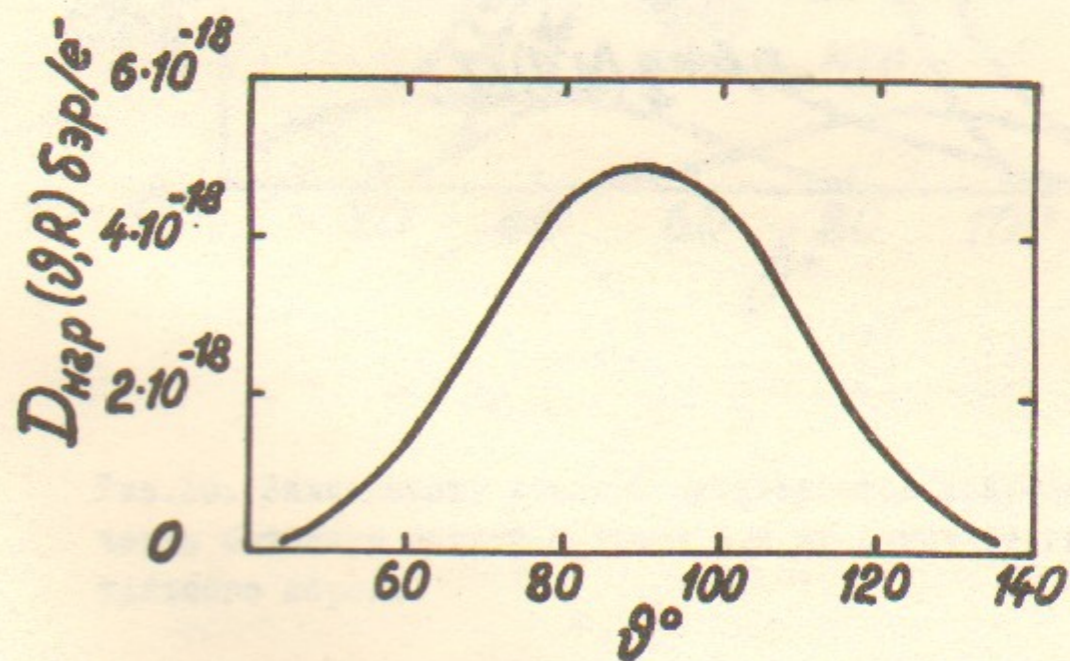


Рис. 8. Зависимость эквивалента дозы нейтронов гигантского резонанса в точке А от геометрии локального сброса.

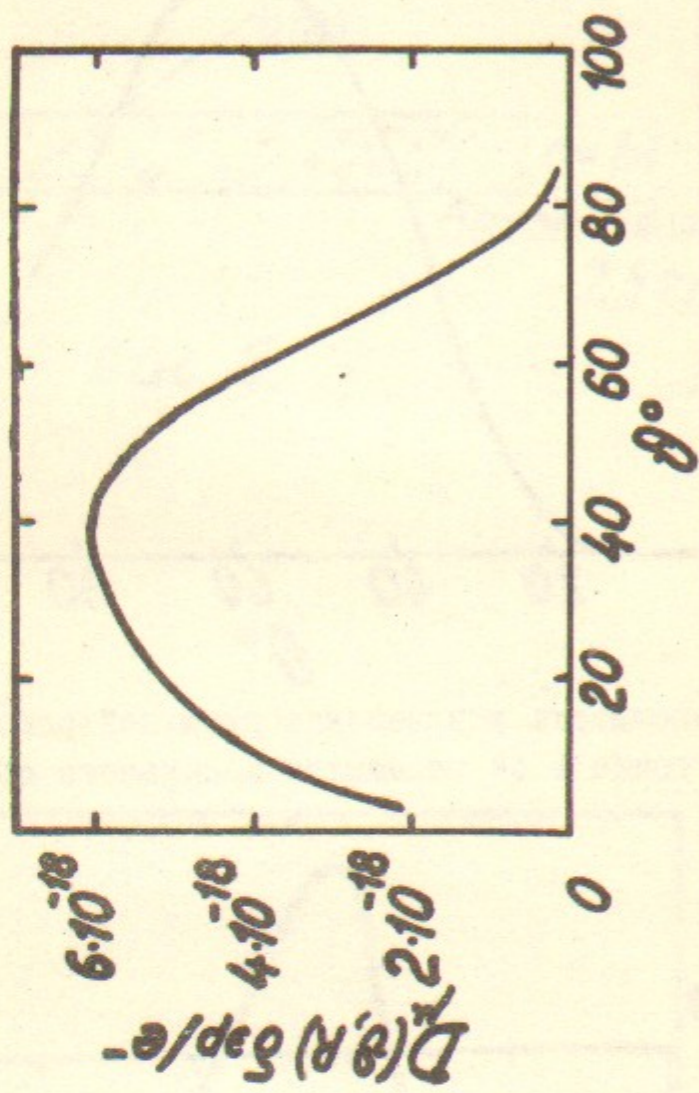


Рис.9. Зависимость эквивалента дозы мюонов в точке А от геометрии локального сброса.

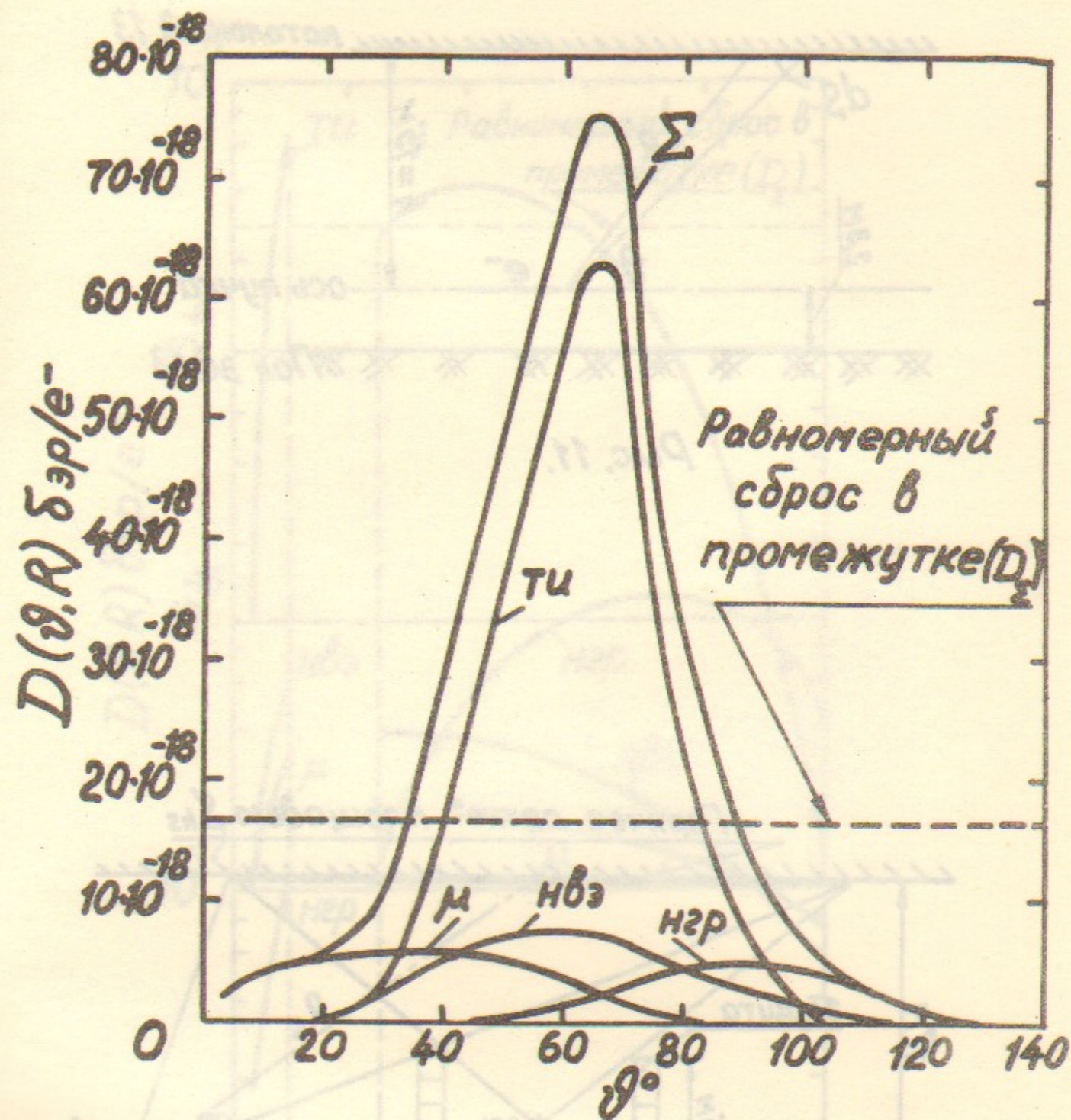


Рис.10. Зависимости дозовых эквивалентов излучений, прошедших через бетонную защиту в точку А, и их суммы от геометрии локального сброса.

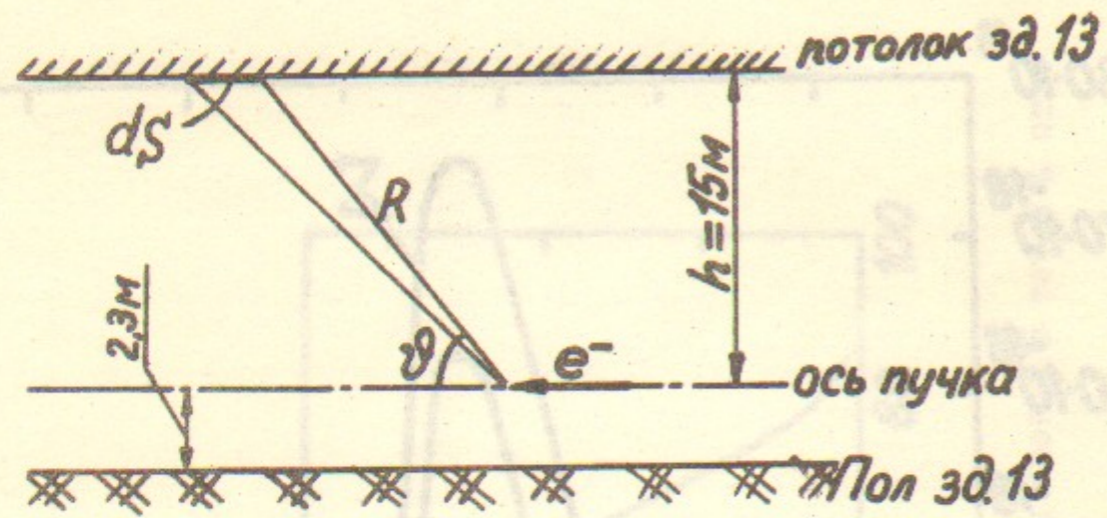


Рис. 11.

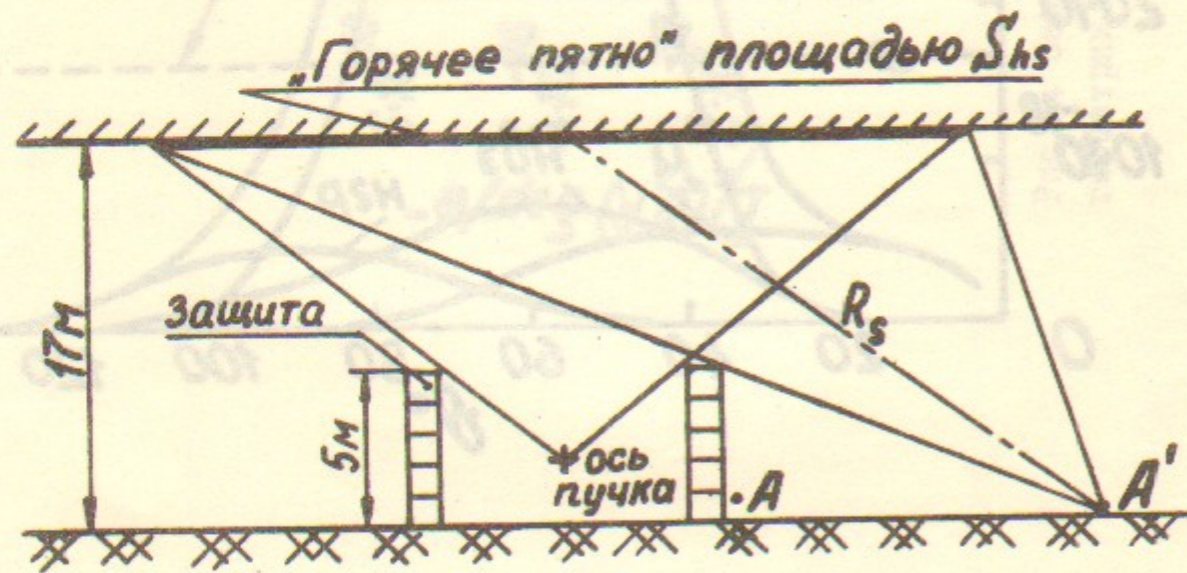


Рис. 12.

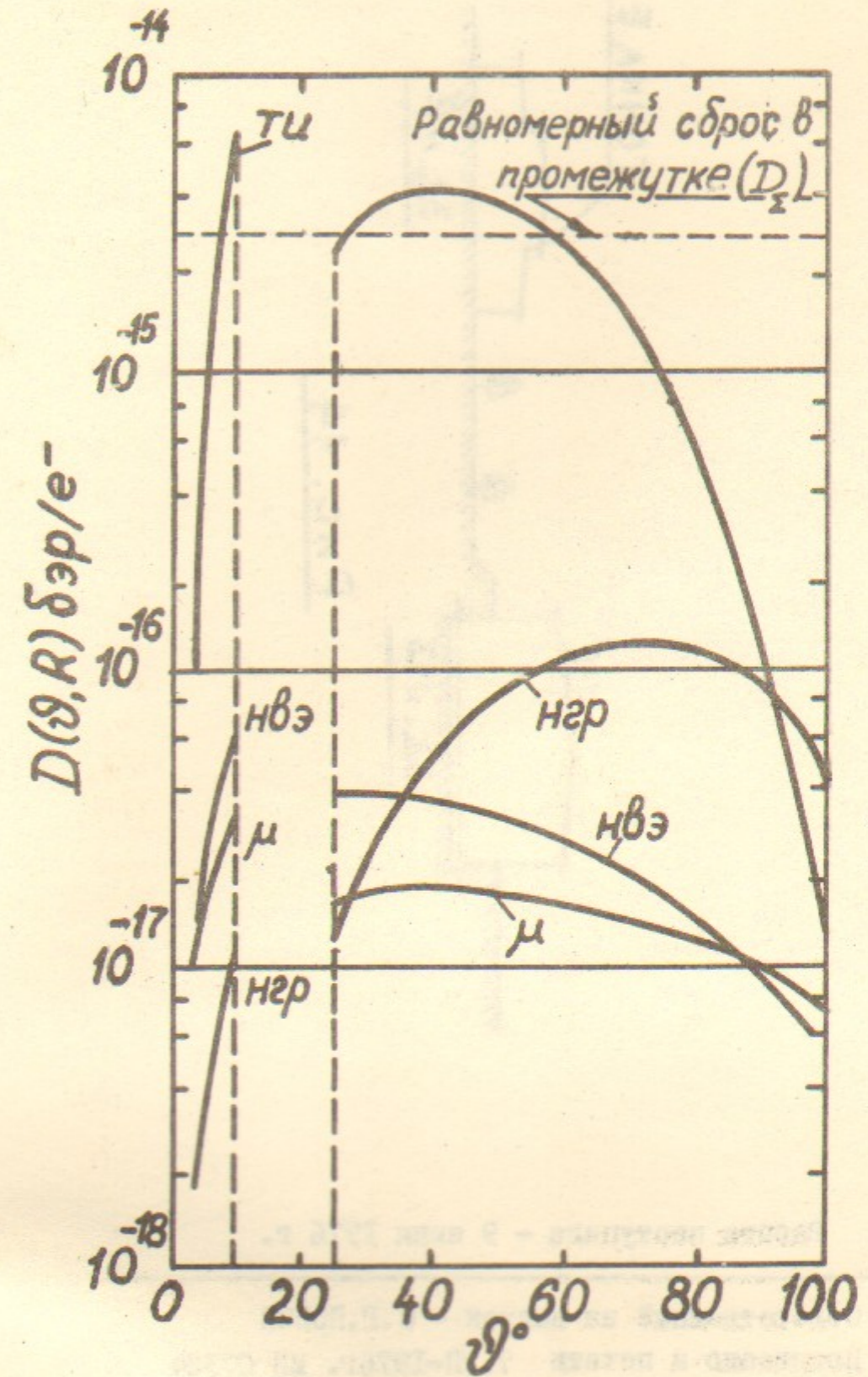


Рис. 13. Зависимости дозовых эквивалентов излучений, прошедших в точку В через бетонную защиту, от геометрии локального сброса.

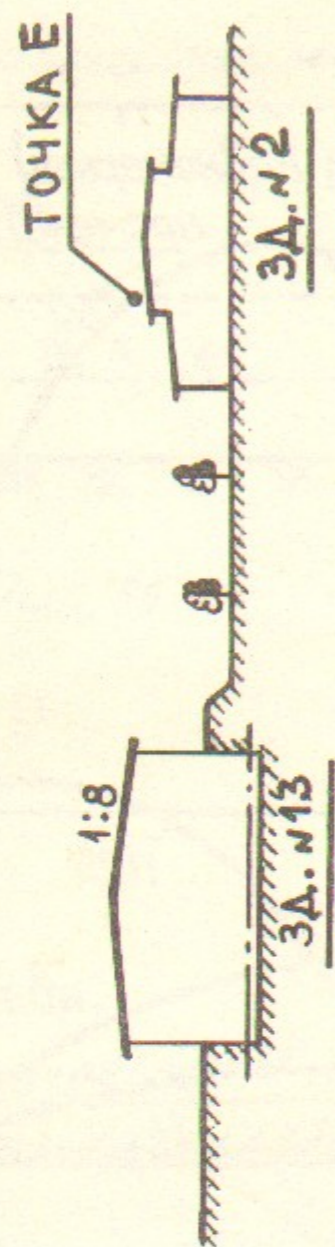


Рис. 14

Работа поступила - 9 июня 1976 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 7.УП-1976г. МН 07384
Усл. 2,5 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 68.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР