

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В. Г. Баркова, А. В. Киселев, В. Я. Чудаев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕТОННОЙ ЗАЩИТЫ
ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 5 МЭВ ЭЛЕКТРОНОВ
ПРИ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ РАБОТАХ НА УСКОРИТЕЛЕ ИЛУ-10

ИЯФ 2009-17

НОВОСИБИРСК
2009

**Оценка эффективности бетонной защиты
от тормозного излучения 5 МэВ электронов
при пуско-наладочных работах на ускорителе ИЛУ-10**

В. Г. Баркова, А. В. Киселев^{)}, В. Я. Чудаев*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090 Новосибирск

Аннотация

Представлены некоторые результаты анализа эффективности бетонной защиты от тормозного излучения электронов с энергией 5 МэВ с учётом энергетическо-углового распределения этого излучения, выходящего из мишени, и наклонного его прохождения в бетоне. Исходные энергетическо-угловые распределения фотонного излучения из алюминиевой, железной и вольфрамовой мишеней получены прямым Монте-Карло моделированием основных взаимодействий с использованием программного пакета SCIN_PC. Далее величина кермы в воздухе и ослабление ее бетонной защитой оценивалась аналитически с использованием доступной справочной информации.

Выполнены оценки мощности кермы в контрольных точках за бетонной защитой существующего испытательного стенда, предназначенного в основном для наладки и испытаний ускорителей электронов меньших энергий. Сформулированы рекомендации и ограничения для проведения стендовых испытаний ускорителя ИЛУ -10.

**Evaluation of efficiency of concrete shielding against bremsstrahlung
of 5 MeV electrons at pre-commissioning of the accelerator ILU-10**

V.G. Barkova, A.V. Kiselev^{)}, V.Ya. Chudaev*

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

The paper presents some results of analysis of efficiency of concrete shielding against 5 MeV electron bremsstrahlung with due account of the angle-energy distribution of radiation from a target and slant penetration of radiation in the concrete. The initial angle-energy distributions of photon radiation from aluminum, iron and tungsten targets have been obtained by direct Monte-Carlo simulation of main interactions with the use of the program package SCIN_PC. Then the kerma value in the air and its attenuation by the concrete shielding were estimated analytically using the available reference information.

Kerma rate values at checkpoints beyond the concrete shielding of the existing bench, which is intended mainly for electron accelerators of smaller energy, have been estimated. Recommendations and restrictions for bench adjustment and tests of the ILU-10 accelerator have been stipulated.

^{*)} email: A.V.Kiselev@inp.nsk.su

1. Краткая характеристика ускорителя ИЛУ-9 и условий его размещения на испытательном стенде

ИЛУ-10 представляет собой высокочастотный ускоритель электронов со следующими характеристиками ускоренного пучка:

- энергия электронов5 МэВ
- средний ток пучка электронов10 мА
- средняя мощность пучка электронов50 кВт
- направление пучка электроновсверху - вниз

Ожидаемое среднее время работы с пучком электронов на стенде составляет около 20 час в неделю.

Стены и перекрытия защищённого зала испытательного стенда выполнены из монолитного бетона с облицовкой бетонными плитами. Входной проём в защищённый зал оборудован сдвоенными защитными стальными дверями суммарной толщиной 36 см (рис. 1 и 2). Для гашения пучка используются приёмники с атомным номером не выше 13.

Как видно из рис. 2, зона торможения пучка ускоренных электронов находится значительно ниже поверхности земли. Поэтому при оценках прохождения тормозного излучения через бетонные защитные стены здания в контрольные точки на нулевой и на более высоких отметках необходимо адекватно учитывать эффект наклонного падения фотонов на защиту и их исходное энергетическо-угловое распределение в обратном от мишени полупространстве.

2. Общая схема оценки дозы фотонного излучения, выходящего из мишени, и её ослабления защитой

Для инженерных оценок эффективности защиты с точностью, приемлемой для большинства практических потребностей, можно ограничиться анализом ослабления защитой кермы в воздухе.

Мощность воздушной кермы (дозы) фотонного излучения, МэВ/(г·с), на не слишком малом расстоянии R см от мишени с атомным номером z после прохождения в защите не взаимодействовавшими с её веществом фотонами пути длиной x см, может быть выражена следующим образом:

$$\dot{D}_k(T_0, \dot{n}, z, \vartheta_0, z_3, \vartheta_3, x, R) \approx \frac{\dot{n}}{R^2} \int_0^{T_0} \gamma(k) \frac{d^2 I(z, T_0, \vartheta_0, k)}{dk d\Omega} e^{-\mu x} B(\mu x, z_3, \vartheta_3, k) dk, \quad (1)$$

где T_0 – кинетическая энергия первичных электронов, падающих на мишень, определяющая верхнюю границу спектра тормозных фотонов $E_0 = T_0$;

\dot{n} – количество электронов, сбрасываемых на мишень в 1 с;

k – энергия фотона, МэВ;

ϑ_0 – угол между направлением пучка электронов и направлением из мишени в точку наблюдения;

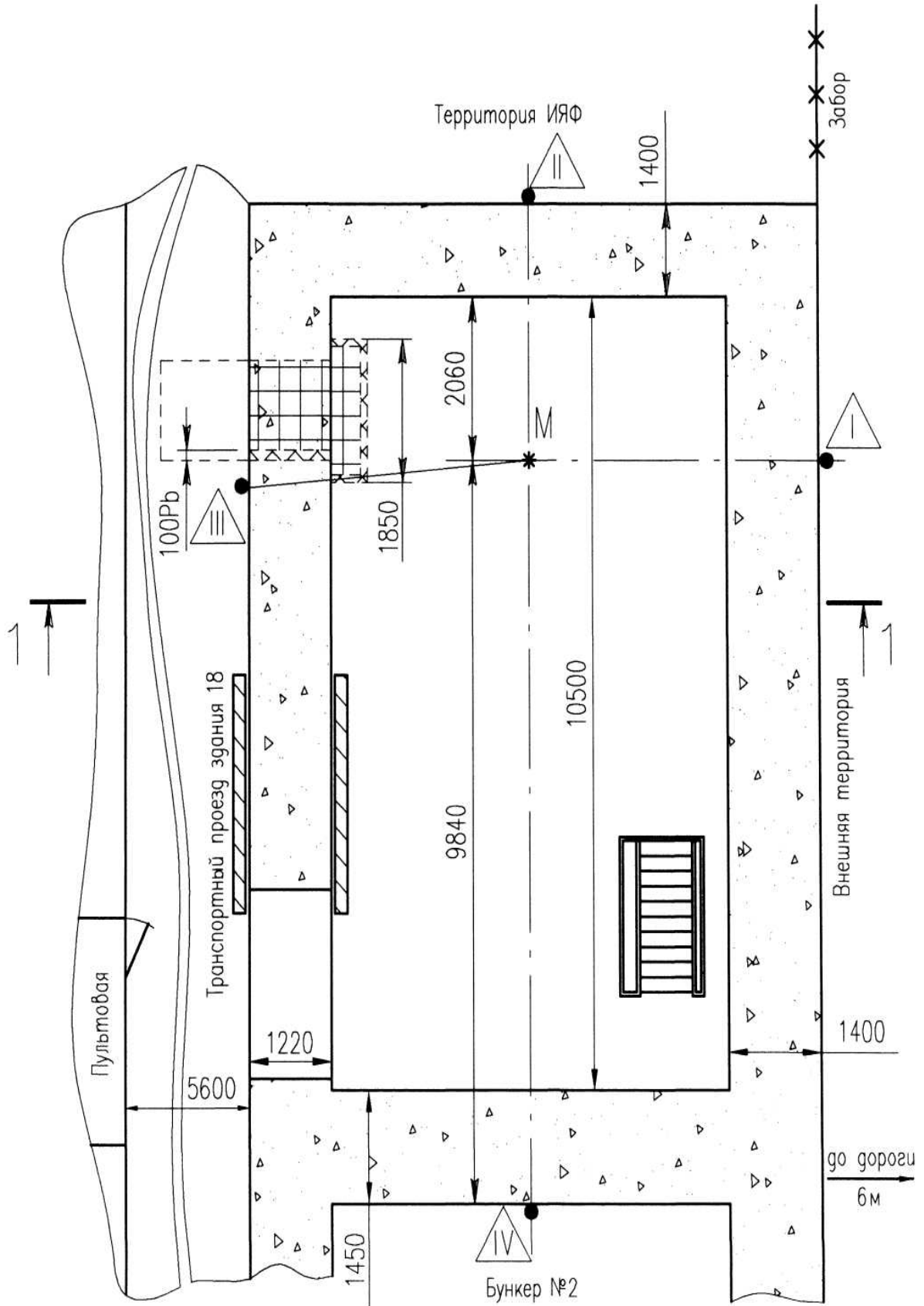


Рис. 1. БУНКЕР № 1 здания 18
(план, отметка 0.0).

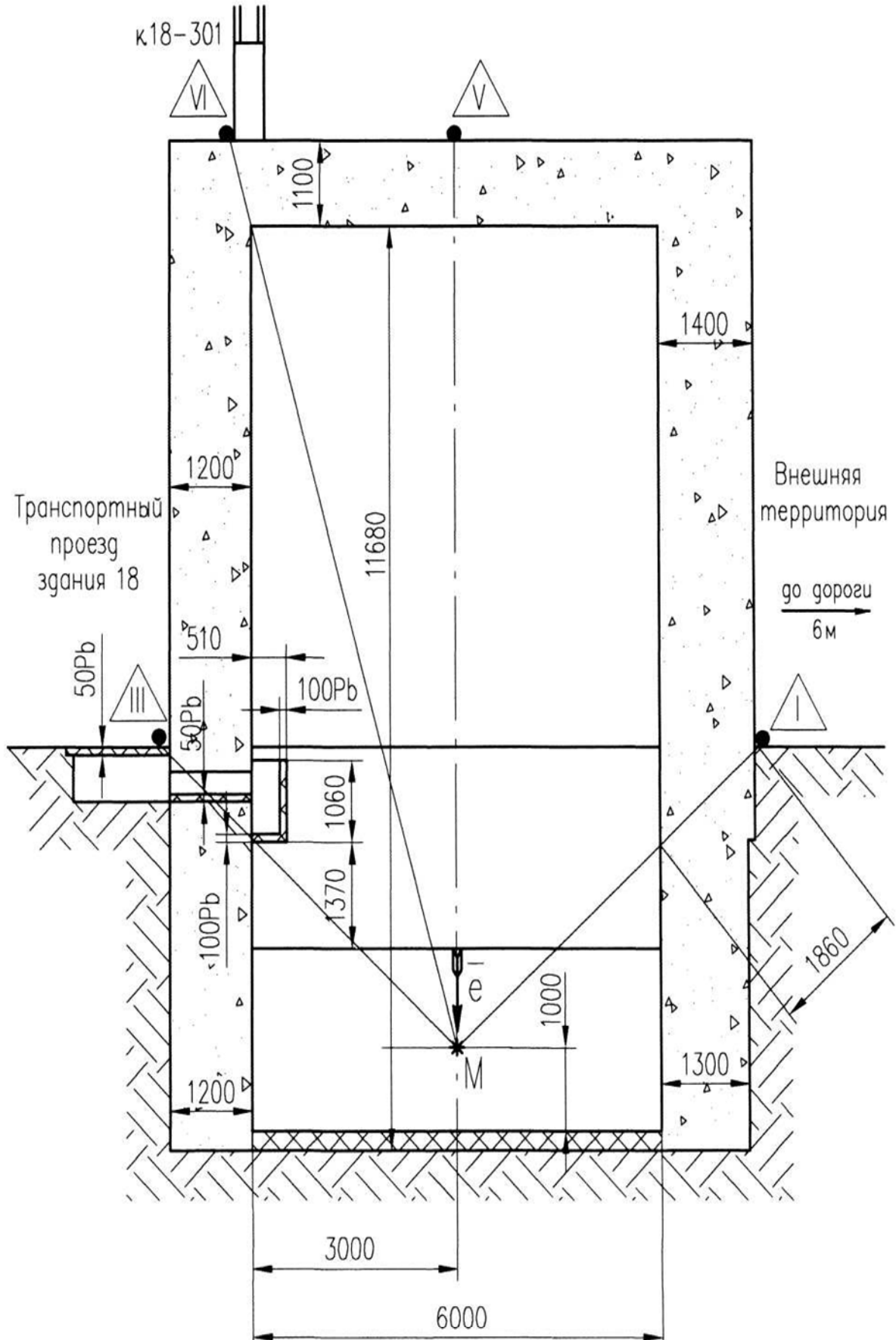


Рис. 2. БУНКЕР № 1 здания 18

(разрез 1-1).

$\frac{d^2 I}{dk d\Omega}$ – энергетическо-угловое распределение энергии фотонного излучения, выходящего из мишени, $(\text{ср} \cdot \text{е}^-)^{-1}$;

$\gamma(k)$ – массовый коэффициент передачи энергии фотонами с энергией k для воздуха;

$\mu = \mu(k, z_3)$ – линейный коэффициент ослабления в веществе защиты с эффективным атомным номером z_3 для фотонов энергии k , см^{-1} ;

\mathcal{G}_3 – угол падения излучения на защиту;

B – фактор накопления.

Фактор накопления, входящий в (1), помимо энергии фотонов, материала и толщины защиты зависит также от углового распределения фотонов, испускаемых из мишени, геометрии защиты и взаимного расположения мишени, защиты и детектора. В нашем случае защитные ограждающие конструкции находятся на достаточно большом удалении от мишени, и для инженерных оценок ослабления воздушной кермы можно воспользоваться значениями факторов накопления, извлечёнными из информации, представленной в [1] для плоского мононаправленного источника в бесконечной бетонной среде.

3. Монте-карловские расчёты энергетическо-угловых распределений фотонного излучения, сравнение с экспериментом

Энергетическо-угловые распределения фотонного излучения, выходящего из мишеней, были получены прямым Монте-Карло моделированием основных взаимодействий с помощью модифицированного программного пакета SCIN_PC [2], разработанного ранее для *расчетов по конвертору медленных позитронов*. Доработка пакета состояла в серьёзном улучшении генератора случайных чисел для обеспечения **корректности** статистического набора при моделировании порядка миллиарда историй с расходом 300...20000 случайных чисел на одну историю.

На рис. 3 сопоставлены с экспериментальными данными [3] результаты монте-карловского моделирования для Al мишени при $T_0 = 2$ МэВ. На гистограммах вертикальные размеры затенённых прямоугольников, характеризующие степень статистической неопределённости полученных монте-карловских результатов, принимались исходя из выражения $\bar{J}(1 \pm 1/\sqrt{N})$, где $\bar{J} = \Delta I / (\Delta k \cdot \Delta \Omega)$, а N – число фотонов, зарегистрированных в элементе $\Delta k \cdot \Delta \Omega$ при счёте.

Поскольку измерения в [3] выполнялись в *малых элементах телесного угла* $\Delta \Omega = 1,31 \cdot 10^{-4}$ ср с интервалом изменения \mathcal{G}_0 около $0,7^\circ$ в их пределах, то измеренные значения практически представляют собой $\frac{d^2 I}{d\Omega dk}$. Проведенное же моделирование

даёт значения $\frac{d^2 I}{d\Omega dk}$, усреднённые по интервалам $\Delta \mathcal{G}_0 = 11,25^\circ$ и по довольно широким энергетическим интервалам, в основном по 0,2 МэВ-ным.

С указанным обстоятельством в значительной мере связано некоторое «провисание» экспериментальных результатов для $\mathcal{G}_0 = 120^\circ$ и 150° по сравнению с расчётом для охватывающих эти значения интервалов \mathcal{G}_0 . В обратном полупространстве область углов, меньших экспериментальных значений \mathcal{G}_0 внутри принятых расчётных интервалов $\Delta \mathcal{G}_0$ (рис. 3), занимает значительную долю телесного угла интервалов. Вместе с быстрым уменьшением выхода излучения с ростом \mathcal{G}_0 это обуславливает превышение расчётных усреднённых значений $\frac{d^2 I}{d\Omega dk}$ над показанными

экспериментальными результатами [3] для $\vartheta_0 = 120^\circ$ и 150° . Обратная же ситуация с превышением экспериментальных результатов при $\vartheta_0 = 0^\circ$ над расчётными для $0^\circ \dots 11,25^\circ$ объясняется аналогично. Высокие значения выхода излучения в ближайшей малой окрестности $\vartheta_0 = 0^\circ$ не дают существенного вклада в усреднённое для $0^\circ \dots 11,25^\circ$ значение выхода из-за незначительной доли околонулевых углов в полном телесном угле расчётного интервала, поэтому расчётные усреднённые результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для $\vartheta_0 = 10^\circ$.

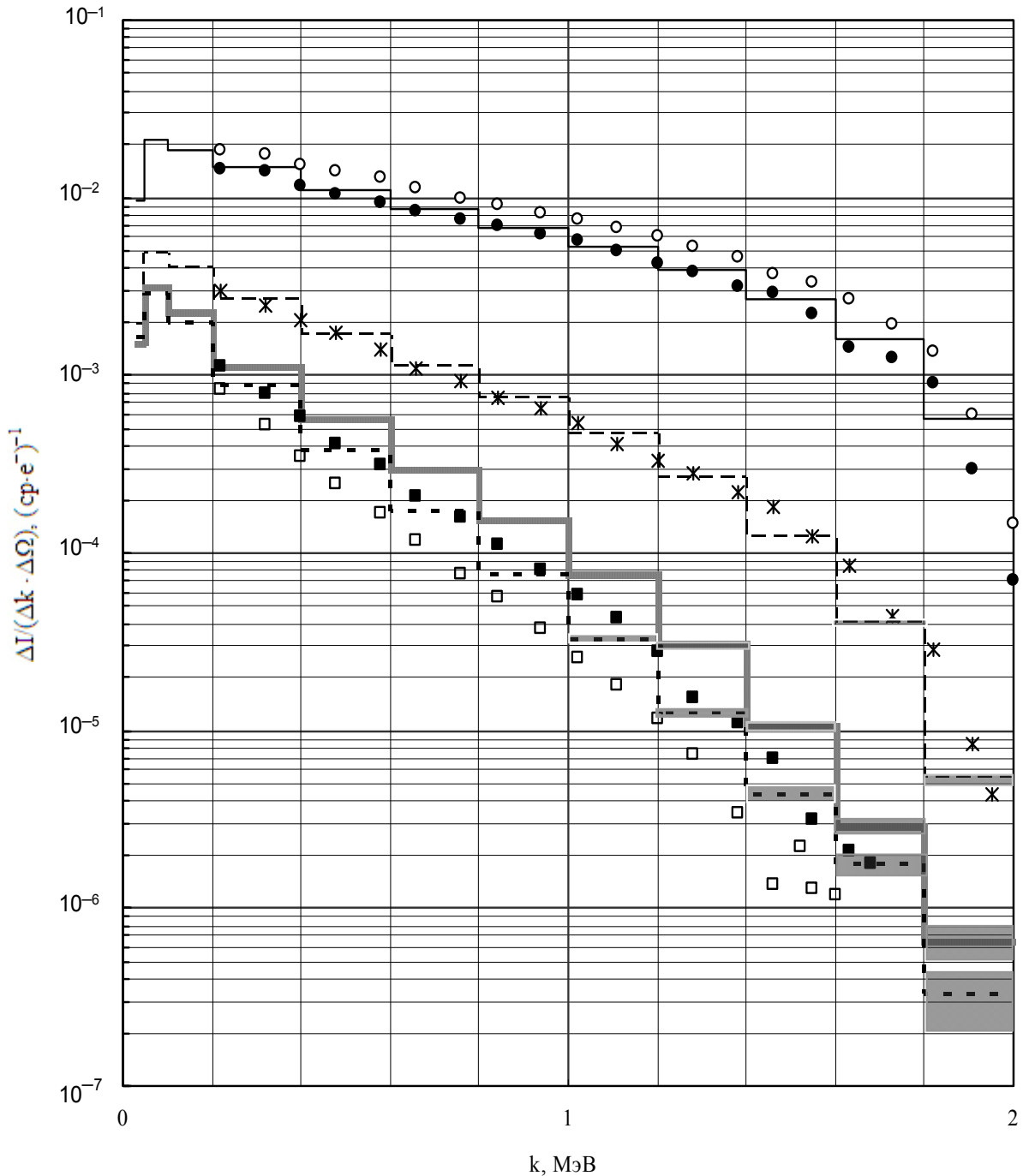


Рис. 3. К сравнению результатов расчёта угловых спектров фотонного излучения из алюминиевой мишени при $E_0 = 2$ МэВ с экспериментальными данными [3]:

- | | | | | | |
|---------|-------------------------------------|---------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| — | $0^\circ \dots 11,25^\circ$; | - - - - | $56,25^\circ \dots 67,50^\circ$; | ▨ | $112,50^\circ \dots 123,75^\circ$ |
| - - - - | $146,25^\circ \dots 157,50^\circ$; | ○ | 0° ; | ● | 10° ; |
| × | 60° ; | ■ | 120° ; | □ | 150° . |

С учётом сказанного, соответствие результатов моделирования экспериментальным данным (рис. 3) можно считать удовлетворительным, и пакет SCIN_PC был использован для расчётов энергетическо-угловых распределений фотонного излучения из различных мишеней при кинетической энергии первичных электронов 5 МэВ.

Расчетные мишени имели форму цилиндрической таблетки с радиальным и продольным размерами, близкими к пробегу электрона с энергией 5 МэВ, и подвергались осевой бомбардировке тонким пучком электронов со стороны верхней торцевой поверхности.

На рис. 4 в качестве иллюстрации приведены усреднённые в угловом интервале $123.75^\circ < \vartheta_0 < 135^\circ$ энергетические распределения фотонного излучения для мишеней из алюминия, железа и вольфрама. Сглаженные кривые, проведенные через значения средних энергий фотонов в элементах $\Delta k \cdot \Delta \Omega$ средствами Excel, приводятся для удобства практического использования полученных результатов.

Рис. 5 иллюстрирует угловую зависимость формы энергетического распределения фотонного излучения в случае алюминиевой мишени.

4. Расчёты удельного фотонного керма-эквивалента алюминиевой мишени и ослабления кермы бетоном

На рис. 6 для алюминиевой мишени представлена угловая зависимость её удельного фотонного керма-эквивалента

$$d_k = \dot{D}_k R^2 / i, \quad (2)$$

где i – ток электронов на мишень, мА; расчёт d_k выполнялся с помощью (1) при $x \approx 0,6$ см бетона плотностью $2,3 \text{ г/см}^3$ для случая нормального падения излучения на слой такой толщины (что приблизительно соответствует начальной фильтрации 5 мм Al).

Кратности ослабления кермы бóльшими толщинами бетона оценивались далее в соответствии с отношением:

$$K \simeq \dot{D}_k (T_0, \dot{n}, z, \vartheta_0, z_3, \vartheta_3, 0.6, R) / \dot{D}_k (T_0, \dot{n}, z, \vartheta_0, z_3, \vartheta_3, x, R). \quad (3)$$

Рис. 7 иллюстрирует ослабление бетоном кермы тормозного излучения с $E_0 = 5 \text{ МэВ}$ из алюминиевой мишени для четырёх различных геометрических ситуаций.

5. Анализ эффективности бетонной защиты испытательного стенда

В соответствии с [4–6], при работе ускорителя в радиационно-опасном режиме в среднем 20 часов в неделю можно принять в контрольных точках в качестве проектных следующие значения мощности эквивалентной дозы:

- Внешняя сторона стены защищенного зала со стороны дороги за территорией ИЯФ – **0,6 мкЗв/час** (точка I на рис. 1 и 2) ;
- Внешняя сторона торцевой стены здания 18 – **2,7 мкЗв/час** (точка II) ;
- Внешняя сторона защиты со стороны транспортного проезда и со стороны бункера № 2 – **24 мкЗв/час**, (точки III и IV) ;
- Комнаты постоянного пребывания людей – **12 мкЗв/час** (точка VI) .

Оценку мощности дозы (кермы) за защитой при работе ИЛУ-10 на алюминиевую мишень рассмотрим на примере **контрольной точки I** (рис. 1 , 2). Для этой точки $\vartheta_0 = 131^\circ$, $\vartheta_3 = 41^\circ$, $R = 5,97 \text{ м}$, $x = 1,86 \text{ м}$.

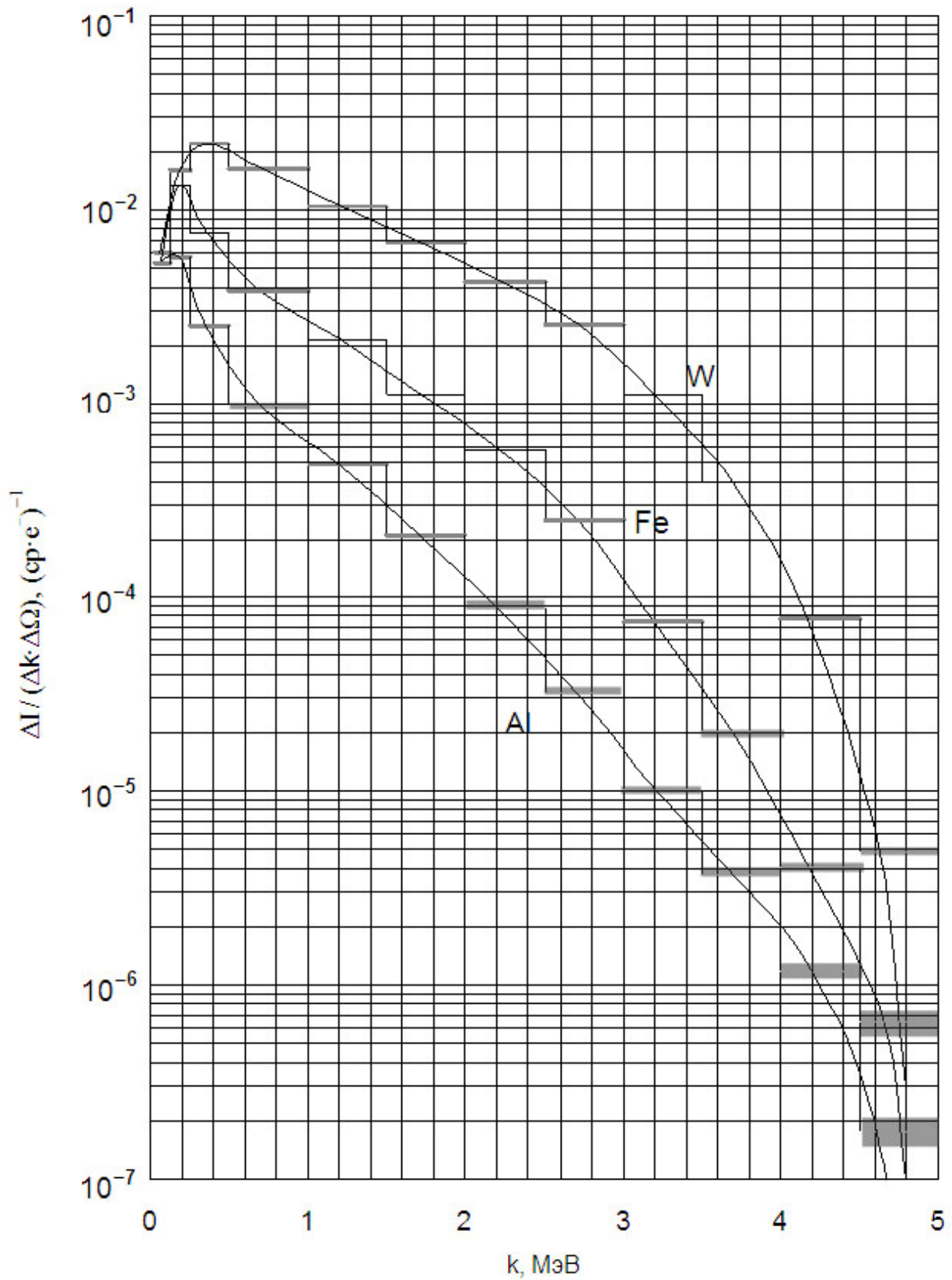


Рис. 4. Энергетические распределения выхода фотонного излучения в интервале углов вылета $123,75^\circ \dots 135^\circ$ из Al, Fe и W мишеней при энергии первичных электронов 5 МэВ.

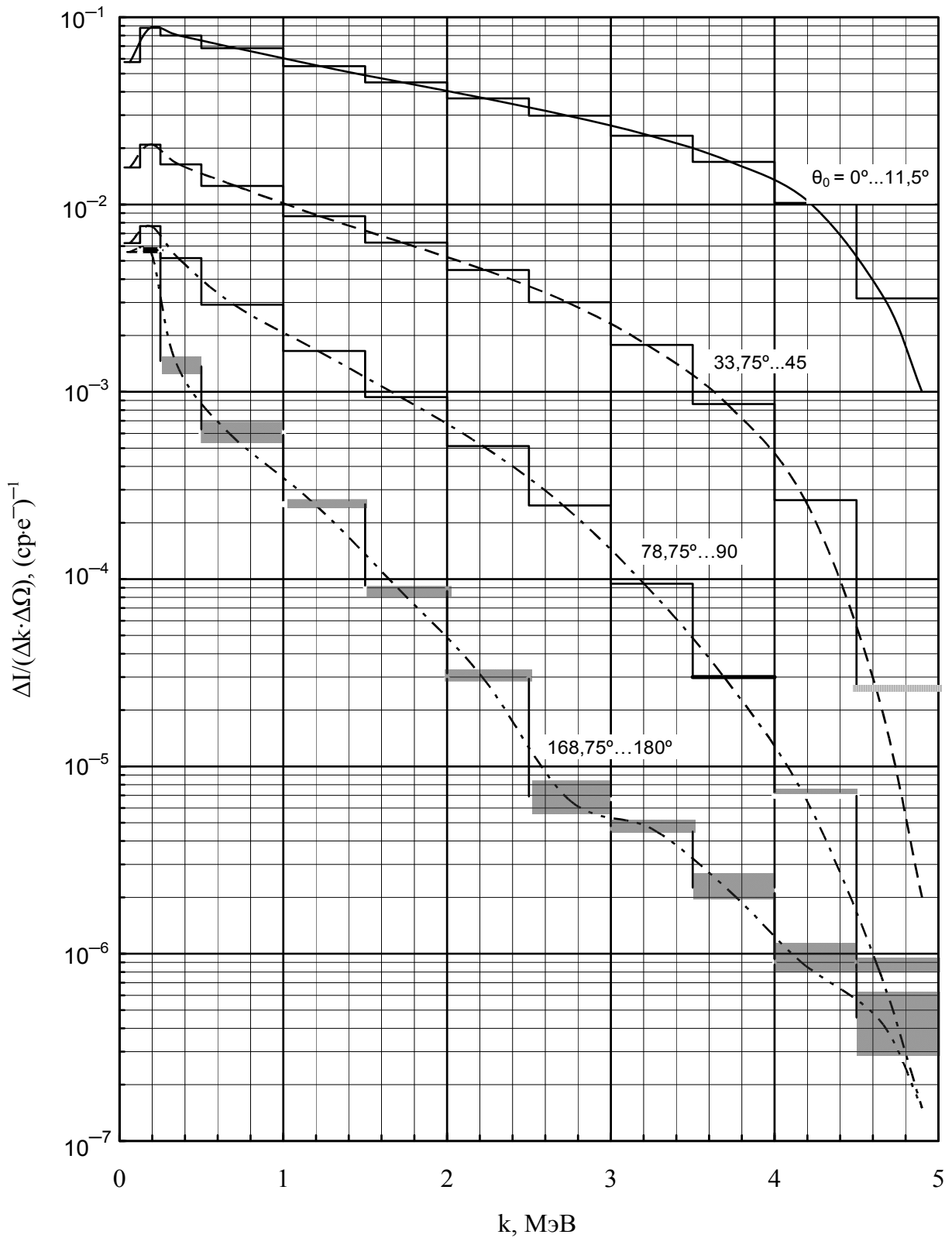


Рис. 5. Усреднённые спектры фотонного излучения из Al мишени для четырёх угловых интервалов при $E_0 = 5 \text{ МэВ}$.

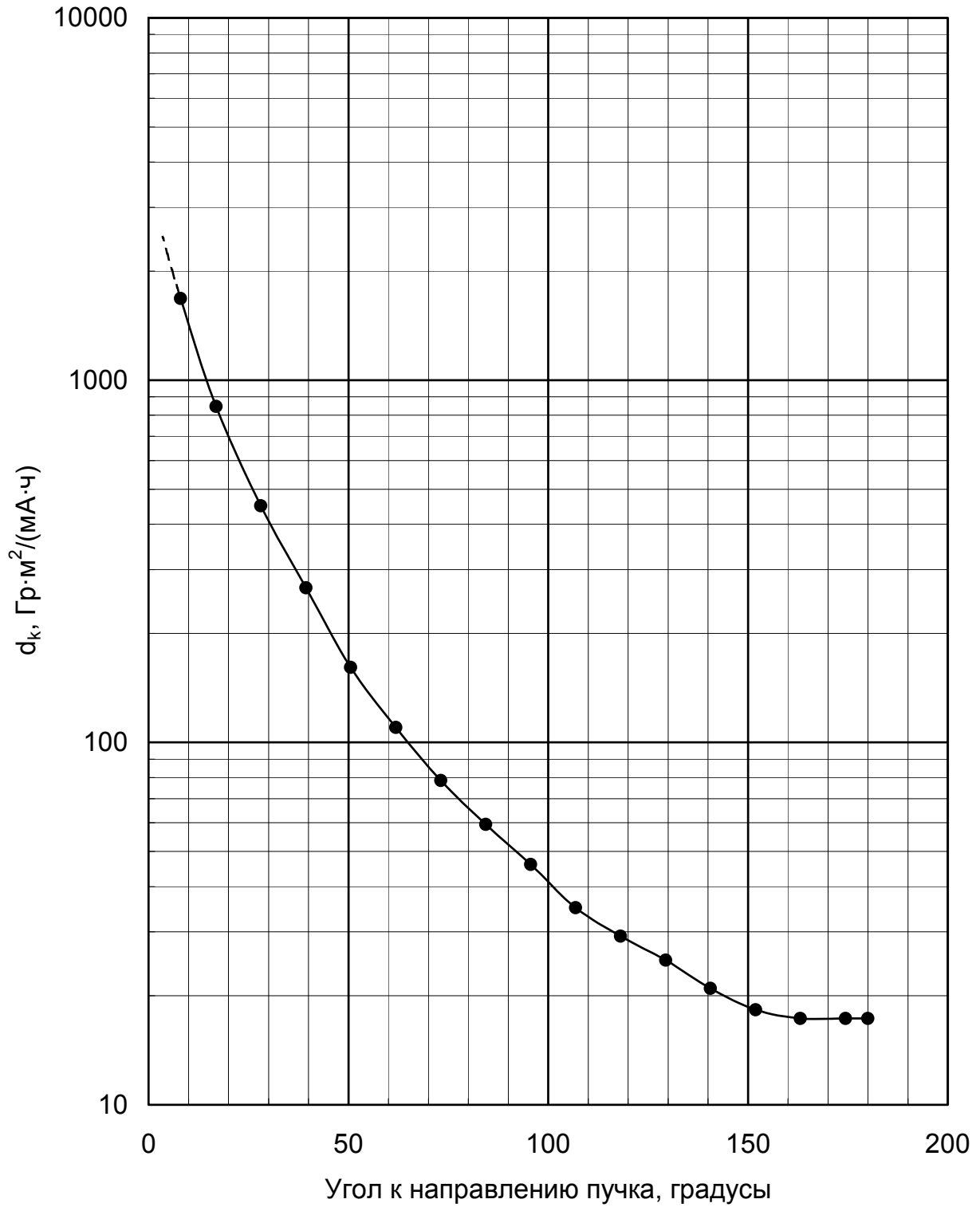


Рис. 6. Угловая зависимость удельного фотонного керма-эквивалента алюминиевой мишени при $E_0 = 5 \text{ МэВ}$.

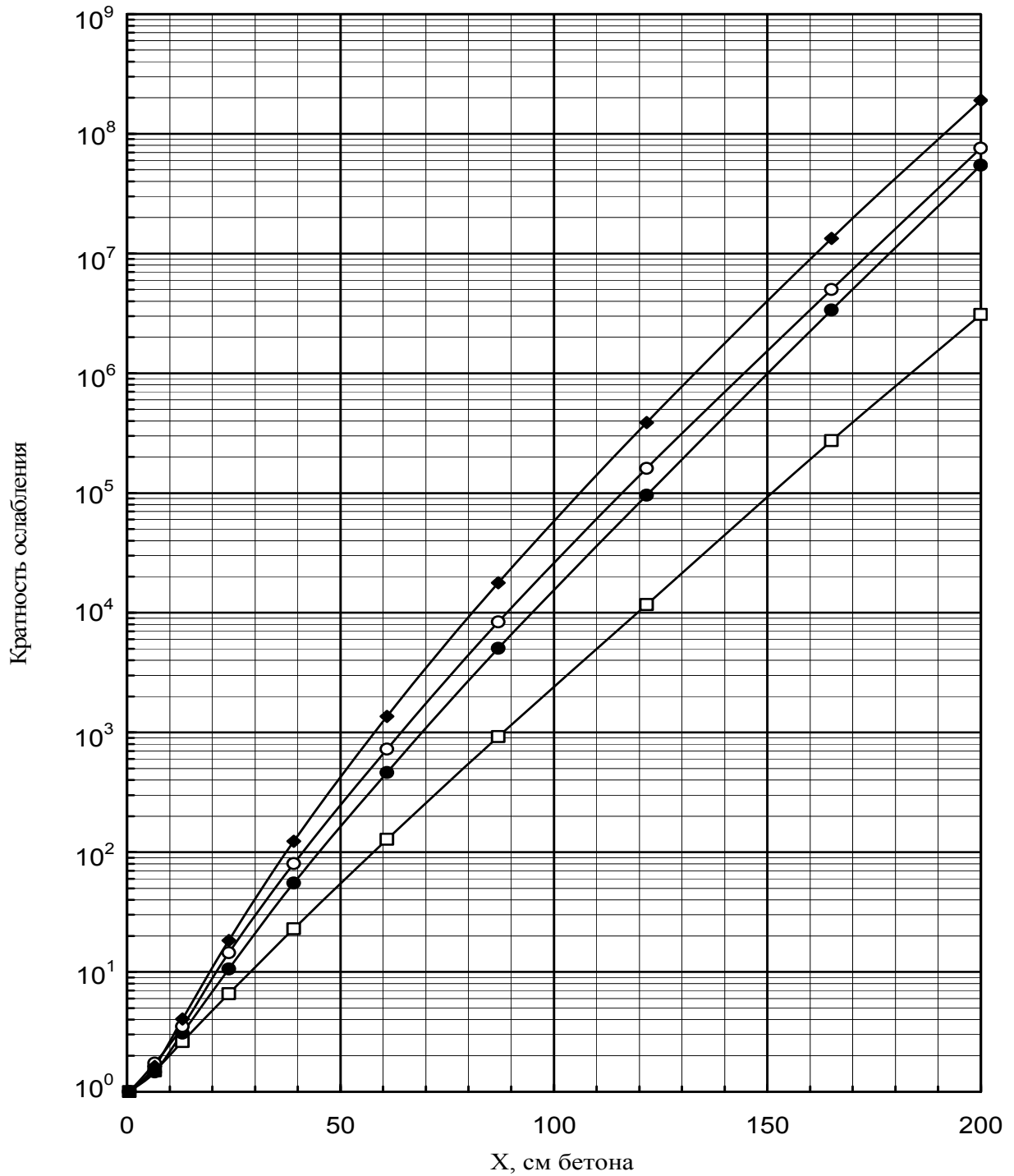


Рис. 7. Ослабление бетоном воздушной кермы фотонного излучения из алюминиевой мишени при $E_0 = 5$ МэВ:

- угол к направлению пучка электронов 10° , нормальное падение на защиту;
- угол к направлению пучка электронов 90° , нормальное падение на защиту;
- угол к направлению пучка электронов 131° , угол падения на защиту 41° ;
- ◆— угол к направлению пучка электронов 180° , нормальное падение на защиту.

Из рис. 6 имеем:

$$\dot{D}_k = \dot{D}_k R^2 / i = 24 \text{ Гр}\cdot\text{м}^2/(\text{мА}\cdot\text{час}),$$

откуда находим мощность дозы **в точке I без защиты** при $i = 10 \text{ мА}$:

$$\dot{D}_k = 24 \cdot 10 / 5,97^2 = 6,7 \text{ Гр/час.}$$

При $x = 1,86 \text{ м}$ кратность ослабления бетонной защитой $K \approx 2,5 \cdot 10^7$ (рис. 7). Таким образом, с учётом бетонной **защитной** стены мощность дозы **в точке I** составит:

$$\dot{D}_{kз} = 6,7 / (2,5 \cdot 10^7) = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ Гр/час} = 0,27 \text{ мкГр/час.}$$

Результаты расчётов для других контрольных точек сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Контроль- ная точка (рис. 1, 2)	ϑ_0	$R, \text{ м}$	$\dot{D}_k R^2 / i,$ $\frac{\text{Гр}\cdot\text{м}^2}{\text{мА}\cdot\text{час}}$	$\dot{D}_k,$ Гр/ча с	ϑ_3	$x, \text{ м}$	K	$\dot{D}_{kз},$ $\frac{\text{мкГр}}{\text{час}}$	Проектное значение $[\dot{D}_{kз}],$ мкГр/час
I	131°	5,97	24	6,7	41°	1,86	$2,5 \cdot 10^7$	0,27	0,6
II	139°	5,23	20	7,3	49°	2,12	$8,3 \cdot 10^7$	0,088	2,7
III	133°	5,77	21,5	6,5	43°	1,67	$4 \cdot 10^6$	1,6	24
IV	90°	9,89	50	5,1	0°	1,45	$6,5 \cdot 10^5$	7,9	24
V	180°	11,5	17,3	1,3	0°	1,10	$1,4 \cdot 10^5$	9,3	(24)
VI	164°	11,96	17,3	1,2	16°	1,14	$2,1 \cdot 10^5$	5,8	12

Как видно из таблицы, расчётные уровни излучения в наиболее критичных контрольных точках I, IV, VI укладываются в допустимые проектные нормы примерно с двойным запасом.

Если, однако, возникнет необходимость работы ускорителя на тяжёлые мишени (Ta, W), то при отсутствии дополнительного усиления защиты можно ожидать возрастания уровней излучения в рассмотренных контрольных точках в 50...100 раз. На этот случай возможны следующие защитные меры (по отдельности, либо в комплексе):

- Монтаж на бетонных стенах внутри защищённого зала в наиболее напряжённых направлениях дополнительных защитных экранов из тяжёлых материалов (Fe, Pb).
- Оборудование зоны торможения пучка локальной защитой из тяжёлых материалов.
- Сокращение времени работы с такими мишенями.

Авторы благодарны И. В. Горнакову и А. В. Репкову за помощь в подготовке графических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Spenser L.V., Lamkin J.C. *Slant penetration of γ -rays in concrete*: NBS report 6591. – 1959. – 61 p.
- [2] А.В. Киселев. Моделирование по Монте-Карло источника медленных позитронов на базе установки SPring-8. – Новосибирск, 1999. – 31 с. – (Препринт / ИЯФ СО РАН; 99-42).
- [3] *Bremsstrahlung produced in thick aluminum and iron targets by 0.5 to 2.8 MeV electrons* / W.E. Dance, D.H. Rester, B.J. Farmer e. a. // *J. Appl. Phys.* – 1968. – Vol. 39, No 6. –P.2881 – 2889.
- [4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99.
- [5] Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1.799-99.
- [6] Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. МУ 2.6.1.2117 – 06. – М., 2006. – 43 с.

В.Г. Баркова, А.В. Киселев, В.Я. Чудаев

**Оценка эффективности бетонной защиты
от тормозного излучения 5 МэВ электронов
при пуско-наладочных работах на ускорителе ИЛУ-10**

V.G. Barkova, A.V. Kiselev, V.Ya. Chudaev

**Evaluation of efficiency of concrete shielding against bremsstrahlung
of 5 MeV electrons at pre-commissioning of the accelerator ILU-10**

ИЯФ 2009-17

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 10.06. 2009 г.

Сдано в набор 10.06. 2009 г.

Подписано в печать 11.06. 2009 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 17

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11