

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

В.Г. Баркова, В.Я. Чудаев, Н.С. Шамакина

ОСЛАБЛЕНИЕ МЕСТНЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ЭКРАНАМИ  
ЭКВИВАЛЕНТОЙ ДОЗЫ ПРЯМОГО ПУЧКА  
ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

ИЯФ 2012-16

Новосибирск  
2012

# **Ослабление местными защитными экранами эквивалентной дозы прямого пучка тормозного излучения высокой энергии**

*В. Г. Баркова, В. Я. Чудаев, Н. С. Шамакина*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск, Россия

## **Аннотация**

Выполнены расчётные оценки зависимости ослабления максимальной эквивалентной дозы на оси прямого пучка жёсткого тормозного излучения, испускаемого из мишени толщиной  $\sim 0,2$  радиационной единицы длины, от энергии первичных электронов, материала и толщины защитного экрана – в дистанционированной от экрана точке наблюдения. Для части дозы, обусловленной тормозным излучением первичных электронов, проходящим через экран без взаимодействия, результаты представлены в виде номограмм. Соответствующие расчёты проведены для восьми защитных материалов: свинца, вольфрама, тантала, сплава ВМ-20, меди, железа, алюминия и бетона – до толщин, соответствующих ослаблению в  $10^6 \dots 10^8$  раз при начальных энергиях излучающих электронов  $E_0 = 0,1; 0,51; 2,5$  и  $6,0$  ГэВ. Приводимая информация может быть полезной при проектировании защиты от излучений, генерируемых электронами высокой энергии в веществе.

## **Attenuation of equivalent dose of direct high-energy bremsstrahlung beam by means of local protective screens**

*V.G. Barkova, V.Ya. Chudaev, N.S. Shamakina*

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS  
630090, Novosibirsk, Russia

## **Abstract**

Calculation estimates were carried out for attenuation of maximum equivalent dose on the axis of direct hard bremsstrahlung beam emitted from a target  $\sim 0.2$  radiation lengths thick in dependence on the primary electron energy and material and thickness of the protective screen, the measuring point at some distance from the screen. Data on the dose part due to the primary electron bremsstrahlung passing through the screen without interaction are presented in the form of nomograms. The estimates were made for eight materials of the protective screen: lead, tungsten, tantalum, tungsten-copper alloy, copper, iron, aluminum and concrete, up to screen thicknesses corresponding to  $10^6 \dots 10^8$ -fold attenuation at initial energies of emitting electrons  $E_0 = 0.1, 0.51, 2.5,$  and  $6.0$  GeV. The information presented may be useful in designing protection against radiations generated by high-energy electrons in substances.

© Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

---

Тормозное излучение, испускаемое электронами высокой энергии при взаимодействии с веществом, характеризуется высокой степенью анизотропии. На ускорительных комплексах с пучками высокоэнергетических электронов это обстоятельство требует создания эффективных радиационных защит с высокой кратностью ослабления, перекрывающих направления продолжений осей гибнущего пучка в мишени и/или частичных потерь пучка в ускорительных конструкциях. Если защита выполняется только из бетона, то в таких направлениях требуемая длина пути луча в бетоне может достигать нескольких метров. Существенно уменьшить толщину основных защитных бетонных ограждающих конструкций ускорительных помещений в ряде случаев можно за счёт установки на критических направлениях местных защит из тяжёлых материалов (Pb, Fe и др.) вблизи мишени и/или вблизи областей со значительными потерями пучка. В некоторых случаях роль таких местных защит могут выполнять, по крайней мере, частично, массивные элементы магнитных систем ускорительного комплекса.

В [1] показано, что наибольший выход энергии тормозного излучения в единичный телесный угол в осевом направлении достигается для мишеней толщиной  $\sim 0,2$  радиационной единицы длины, при этом количественное значение этого выхода практически не зависит от материала мишени. Там же приведена методика оценки при отсутствии защиты максимальной эквивалентной дозы  $D_{0\max}$  в осевом направлении на расстояниях от такой мишени, которые можно считать типичными для мест, где персонал может находиться во время работы установки в радиационно-опасном режиме.

Местные защитные экраны обычно размещаются на расстоянии от мишени, которое мало по сравнению с расстоянием от мишени до точки наблюдения, расположенной на оси пучка тормозного излучения в месте возможного нахождения персонала (Рис. 1). Из-за сильной анизотропии первичного тормозного излучения, геометрия его прохождения через экран и регистрации в точке наблюдения, находящейся на продолжении оси, приближается в таких случаях к

геометрии узкого пучка («хорошей геометрии»); при этом поток вторичного ливневого излучения, образующегося и рассеиваемого в экране, заметно расширяется вокруг оси при приближении к точке наблюдения. Можно полагать поэтому, что дозовые факторы накопления по отношению к вкладам первичного тормозного излучения, прошедшего через вещество экрана без взаимодействия, не будут в этом случае слишком большими.

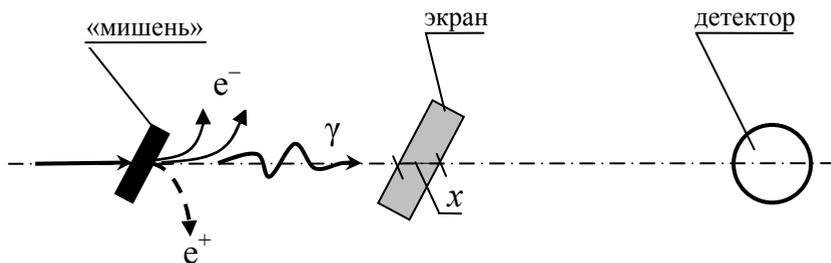


Рис. 1. Геометрия с удалённым от наблюдателя защитным экраном.

Грубую оценку фактора накопления по максимальной эквивалентной дозе для точки наблюдения, расположенной на оси пучка тормозного излучения, можно получить используя упрощённую схематическую модель развития ливня [2] и результаты [1]. Численные оценки для экрана, расположенного в середине промежутка между мишенью и точкой наблюдения, показывают, что в рассматриваемом энергетическом диапазоне факторы накопления даже при кратностях ослабления  $\sim 10^5$  и выше имеют значения  $\approx 2$  и слабо зависят от  $E_0$ , материала экрана и его толщины. Указанные оценки приводятся в предположении, что первичные электроны, теряющие в мишени в среднем  $\approx 20\%$  своей энергии, после выхода из мишени отклоняются от направления первоначально падающего на мишень пучка магнитным полем и практически на участок защитного экрана вблизи оси пучка тормозного излучения не попадают (Рис. 1). Предполагается также, что толщина экрана мала по сравнению с расстоянием от него до точки наблюдения. При фиксированном расстоянии между мишенью и точкой наблюдения фактор накопления уменьшается с приближением экрана к мишени и возрастает с приближением его к детектору.

Полезно также отметить указание в [3], обоснованное экспериментально, о малости фактора накопления в бетоне ( $\leq 2$  даже для ослабления в  $10^5$  раз), которое, правда, сформулировано для более низкоэнергетического диапазона значений  $E_0$  (несколько десятков МэВ) и не сопровождается подробностями геометрии мишень – защита – детектор.

Зависимость кратности  $K$  ослабления эквивалентной дозы  $D_{n-int}$  в пучке высокоэнергетического первичного тормозного излучения, прошедшего сквозь защитный экран без взаимодействия, от энергии первичных электронов, материала и толщины экрана можно оценить в приосевой области пучка с помощью приближённого выражения:

$$K(E_0, Z, x) = \frac{D_{0max}(E_0)}{D_{n-int}(E_0, Z, x)} \approx \frac{\int_0^{E_0} h_m(k) f(E_0, k) dk}{\int_0^{E_0} h_m(k) f(E_0, k) \exp[-\mu(k, Z)\rho x] dk}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – энергия электронов, бомбардирующих мишень;  $Z$  – атомный номер (эффективный) материала экрана;  $x$  – длина пути (Рис. 1) первичных тормозных фотонов в веществе экрана, см;  $D_{0max}(E_0)$  – значение максимальной эквивалентной дозы в приосевой области пучка при отсутствии защитного экрана;  $k$  – энергия тормозного фотона;  $f(E_0, k)$  – энергетическое распределение флюенса приосевых фотонов тормозного излучения, фотонов/(см<sup>2</sup>·МэВ);  $h_m(k)$  – удельная максимальная эквивалентная доза в теле для фотонов энергии  $k$  [4,5], бэр·см<sup>2</sup>/фотон;  $\mu(k, Z)$  – массовый коэффициент ослабления узкого пучка фотонов энергии  $k$  материалом экрана [6,7], см<sup>2</sup>/г;  $\rho$  – плотность материала экрана, г/см<sup>3</sup>.

В области  $k \gtrsim 0,1$  МэВ при наших условиях можно принять:

$$f(E_0, k) \approx \frac{A}{k} (1,6 - 1,2 k / E_0), \quad (2)$$

где  $A$  – нормировочный коэффициент.

При  $k \lesssim 0,1$  МэВ  $f(E_0, k)$  существенно подавляется вследствие самопоглощения излучения в мишени и его ослабления стенками вакуумного объёма, поэтому интегрирование в (1) по энергии с использованием (2) следует выполнять не от нуля, а от  $k_{zp} \approx 0,1$  МэВ, тем более что при больших значениях  $E_0$  сам опускаемый энергетический интервал относительно невелик.

Зависимости кратностей ослабления  $K(E_0, Z, x)$ , рассчитанные в соответствии с вышеописанной процедурой, представлены на рис. 2 – 9 для восьми веществ защитных экранов.

Приведенные кривые демонстрируют более эффективное ослабление дозы высокоэнергетического тормозного излучения по сравнению с ослаблением дозы излучения с меньшим значением  $E_0$ . Относительная разница в эффективности особенно заметна при небольших толщинах экранов из материалов с высоким атомным номером. С увеличением толщины экрана ослабление дозы во всё большей степени определяется фотонами с энергиями близкими к энергии, при которой имеет место минимум в сечении взаимодействия с веществом экрана, поэтому наклон кривых для различных значений  $E_0$  становится практически одинаковым, соответственно относительная разница в эффективности ослабления уменьшается. Для защитных экранов из материалов с небольшим атомным номером эти особенности выражены в меньшей степени, что обусловлено относительно меньшей глубиной минимума в сечении взаимодействия для таких материалов (по отношению к асимптотическому значению сечения при больших энергиях), а также его (минимума) более высокоэнергетическим расположением и большей энергетической шириной.

Ввиду приближённого характера выражения (1) и отсутствия точных значений факторов накопления результаты практических оценок доз и защитных требований с использованием кривых рис. 2 – 9 следует рассматривать как ориентировочные, тем не менее такие оценки окажутся достаточно эффективными для быстрого первичного анализа требований к защите от пучков высокоэнергетического тормозного излучения для наиболее критических направлений их выхода.

Необходимо также отметить, что при толщинах защитных экранов, приближающихся к значениям, соответствующим верхним гра-

ницам рассмотренного диапазона кратностей ослабления, приобретают заметную величину дозовые вклады таких проникающих компонент излучения, как высокоэнергетические нейтроны и мюоны, являющиеся продуктами фотоядерных реакций в самом экране. Если толщины экранов или кратности ослабления превосходят указанные границы, то эти вклады следует учитывать дополнительно [8–10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чудаев В. Я. Радиационные поля и защита в условиях экспериментального электрон-позитронного ускорительно-накопительного комплекса. - Дисс. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1996, 239 с.
- [2] Росси Б. Частицы больших энергий / Пер. с англ.; Под ред. С. З. Беленького. - М.: Гостехтеориздат, 1955. – 636 с.
- [3] Прайс Б. и др. Защита от ядерных излучений / Б. Прайс, К. Хортон, К. Спинни. - М.: ИЛ, 1959. - 490 с.
- [4] Атлас дозовых характеристик внешнего ионизирующего излучения: Справочник / А. И. Вихров, В. Е. Дудкин и др.; Под ред. докт. техн. наук Е.Е. Ковалева. - М.: Атомиздат, 1978. - 60 с.
- [5] Нормы радиационной безопасности НРБ–76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП–72/87 / Минздрав СССР. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 160 с.
- [6] Стомр Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001 – 100 МэВ и элементов с 1 по 100): Справочник / Пер. с англ. В. А. Климанова, Е. Д. Чистова. - М.: Атомиздат, 1973. - 256 с.
- [7] J.H. Hubbell. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV. NSRDS-NBS, N29, US Government Printing Office, Washington, D.C. 20402, 1969.
- [8] Приходько В. П., Чудаев В. Я. Некоторые оценки доз и защиты от излучений электронов высокой энергии. - Новосибирск, 1974. - 44 с. - (Препринт /Ин-т ядерн. физики СО АН СССР; 74-35).
- [9] Swanson W. P. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators. - Vienna: IAEA, 1979. - 327 p.
- [10] Баркова В. Г., Чудаев В. Я. Ослабление бетонной защитой эквивалентной дозы ливневого фотонного излучения и фотонейтронов, испускаемых из массивной железной мишени. - Новосибирск, 1989. - 54 с. - (Препринт / Ин-т ядерн. физики СО АН СССР; 89-105).

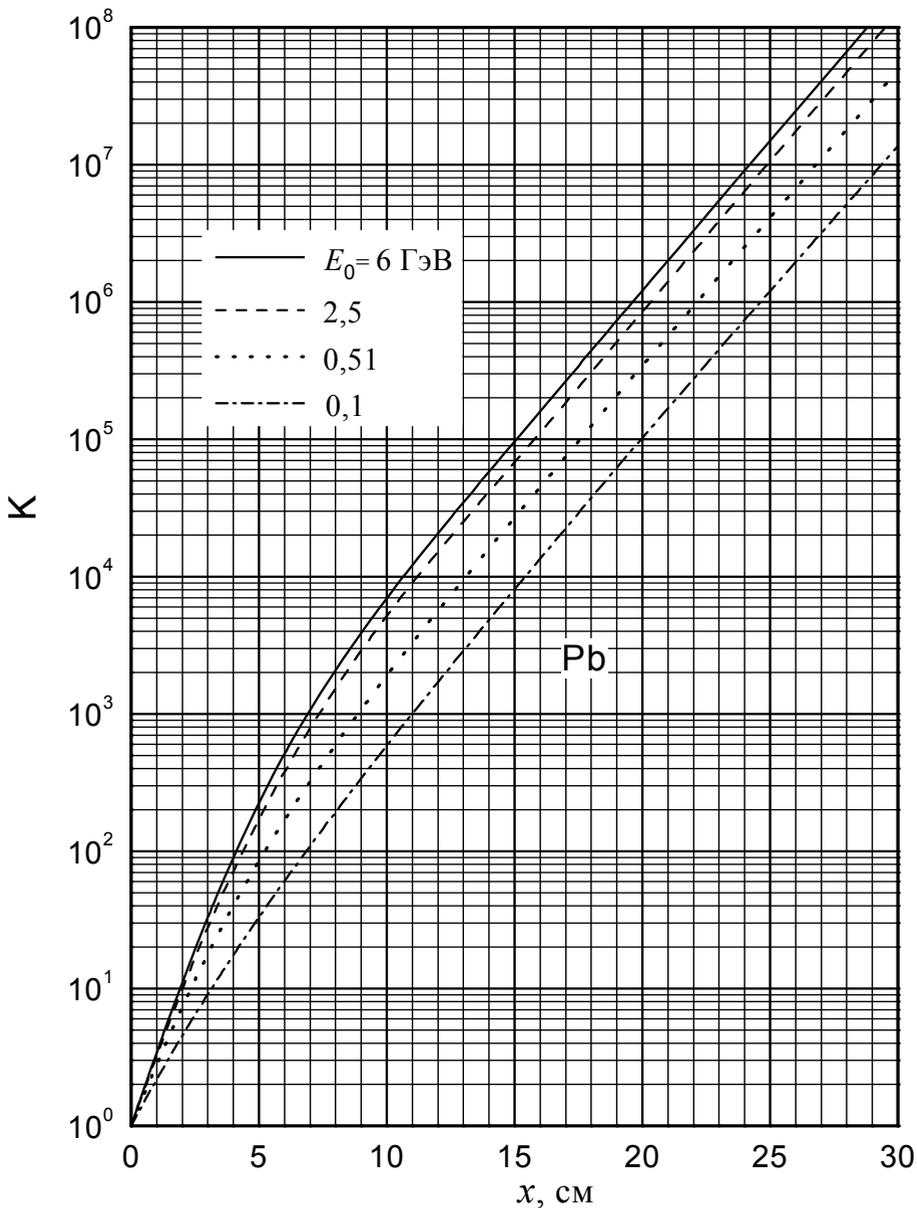


Рис. 2. Кратности ослабления эквивалентной дозы первичных приосевых тормозных фотонов, прошедших путь  $x$  в экране из свинца ( $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$ ) без взаимодействия.

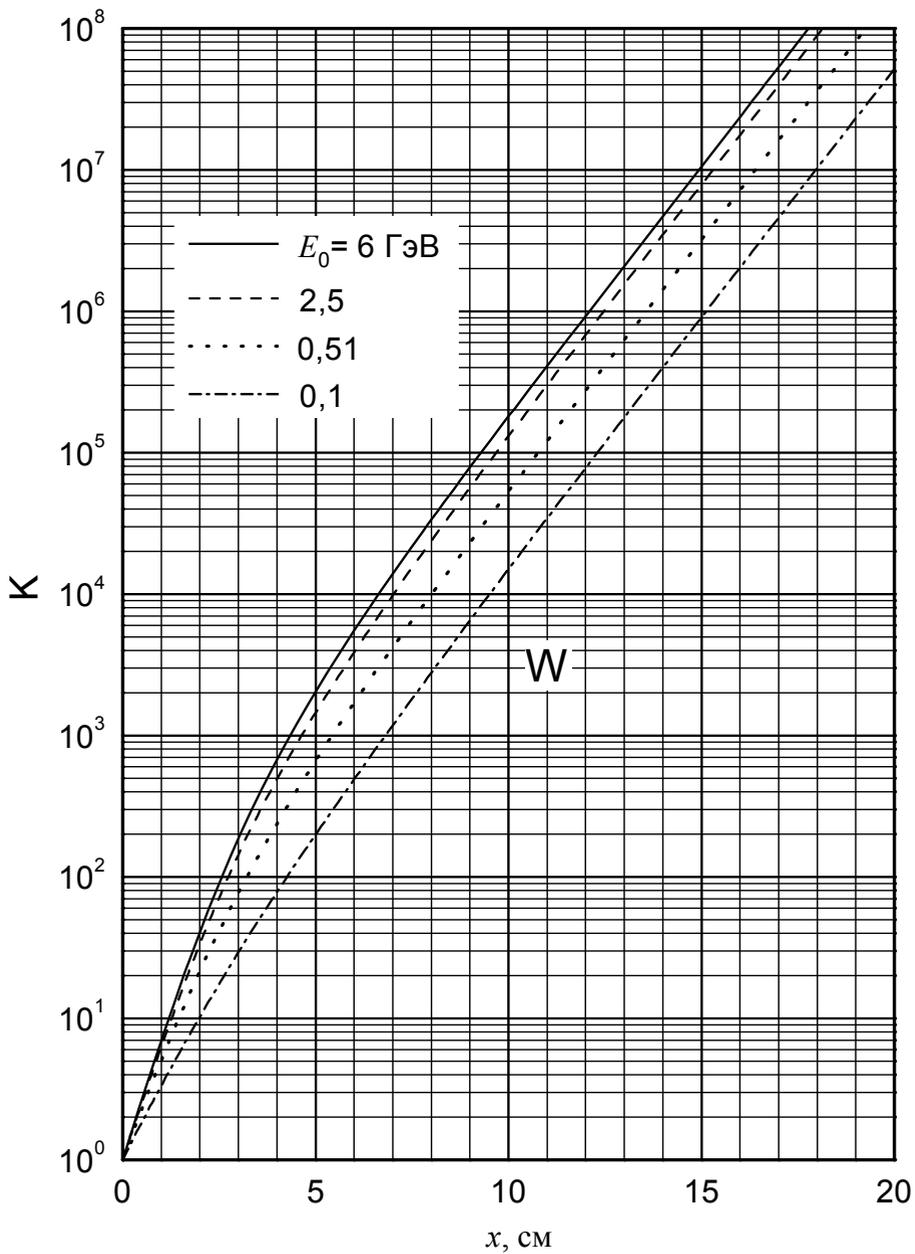


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для экрана из вольфрама ( $\rho = 19,3 \text{ г/см}^3$ ).

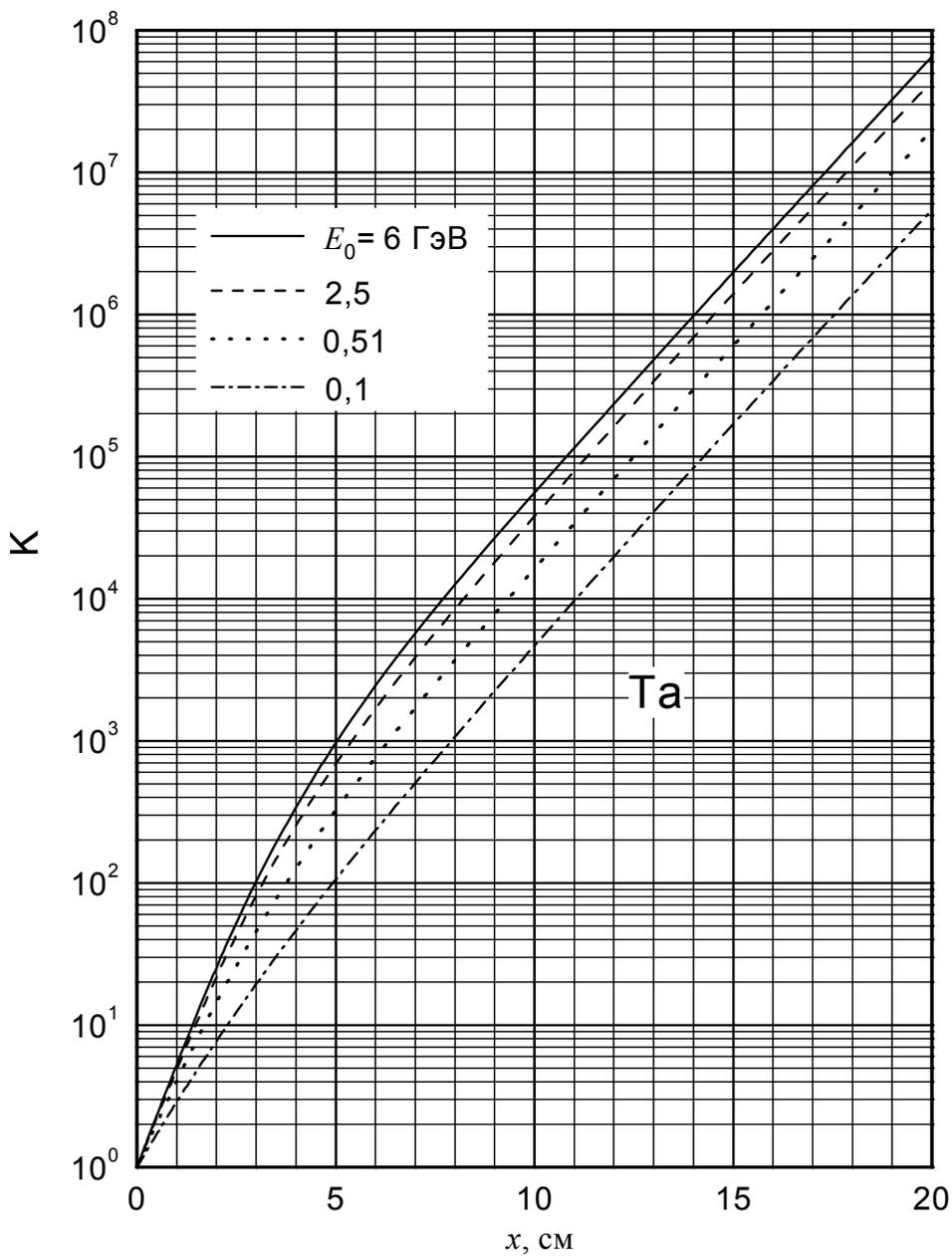


Рис. 4. То же, что на рис. 2 для экрана из тантала ( $\rho = 16,6 \text{ г/см}^3$ ).

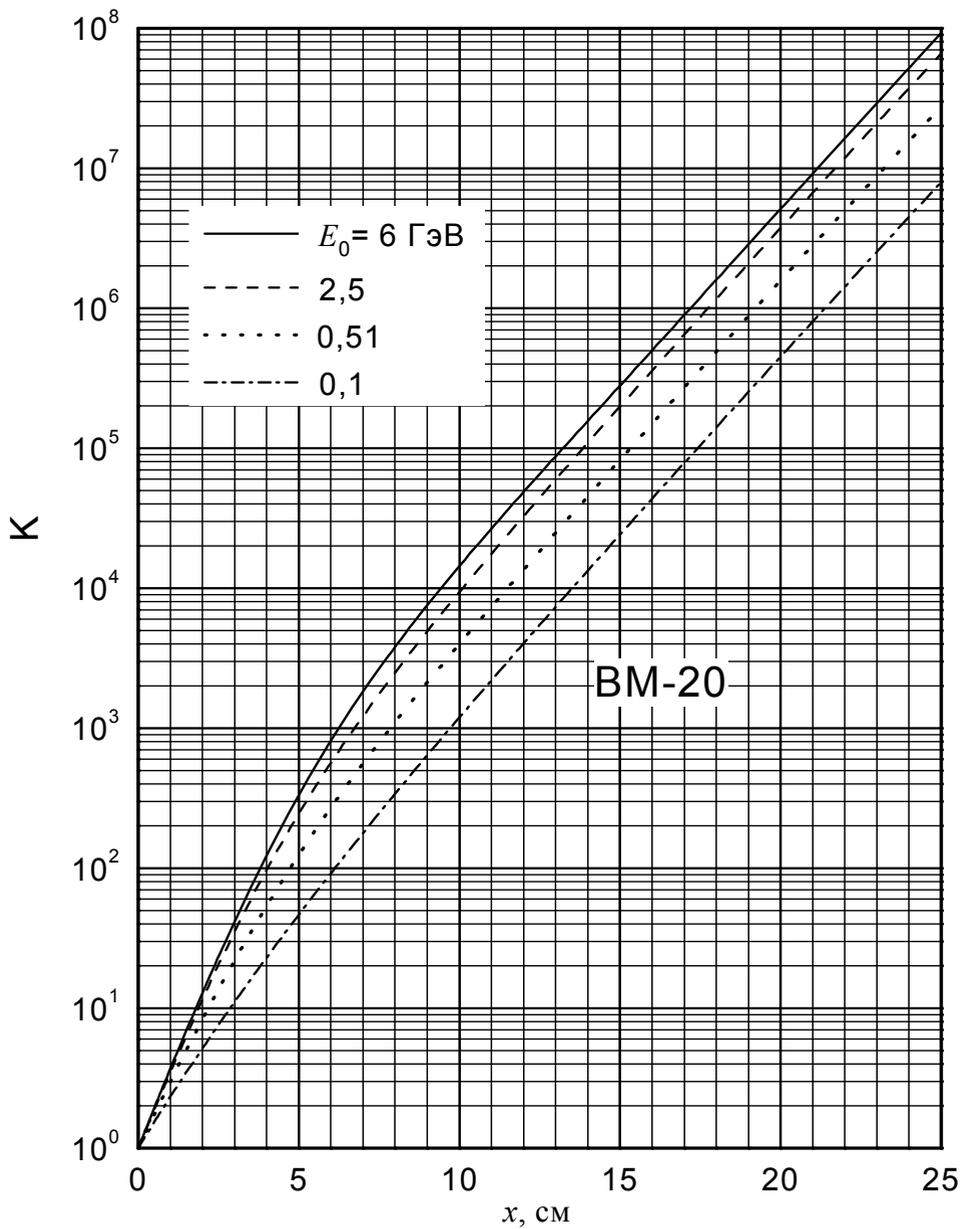


Рис. 5. То же, что на рис. 2 для экрана из BM-20 ( $\rho = 14,2 \text{ г/см}^3$ ; 80% W+20% Cu).

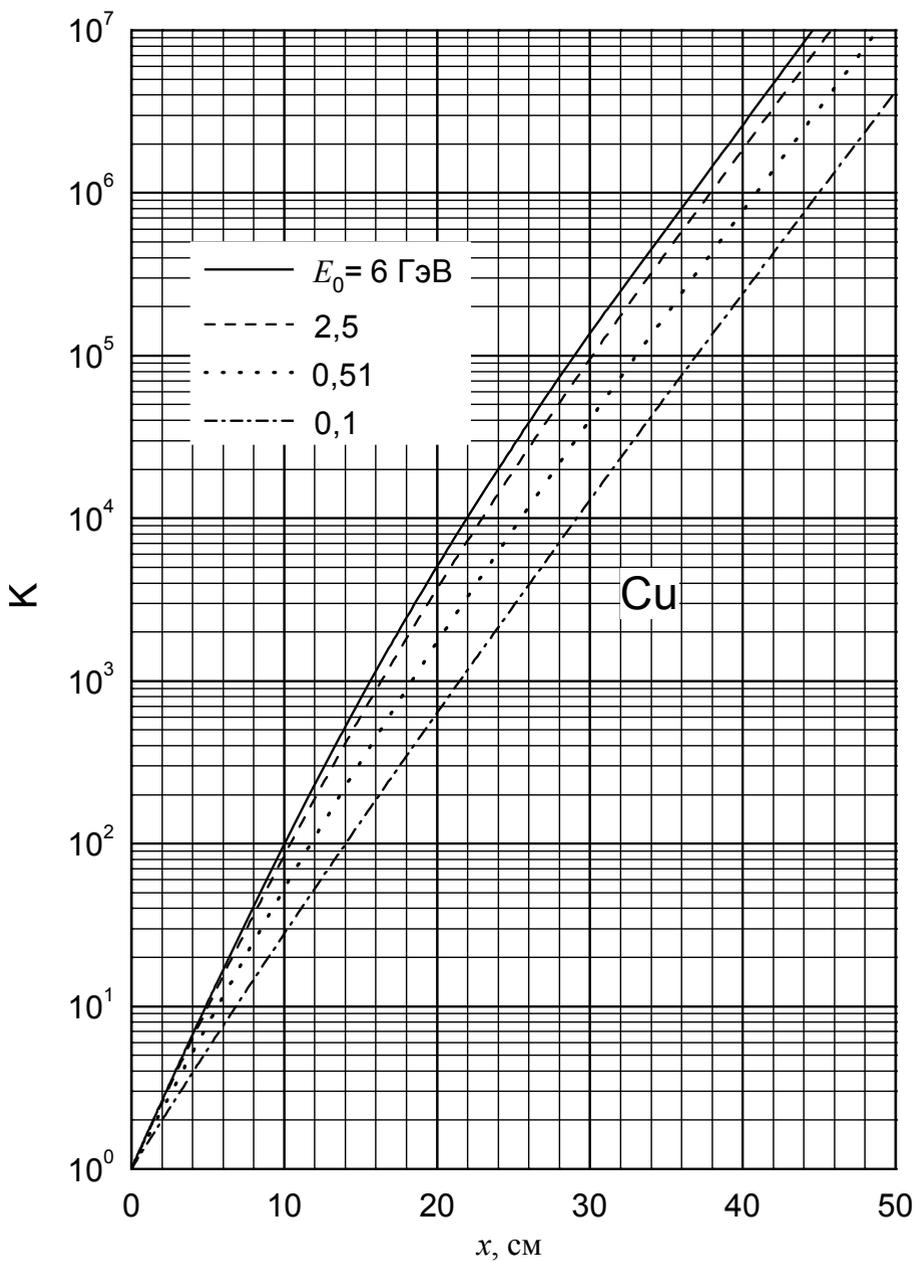


Рис. 6. То же, что на рис. 2 для экрана из меди ( $\rho = 8,93 \text{ г/см}^3$ ).

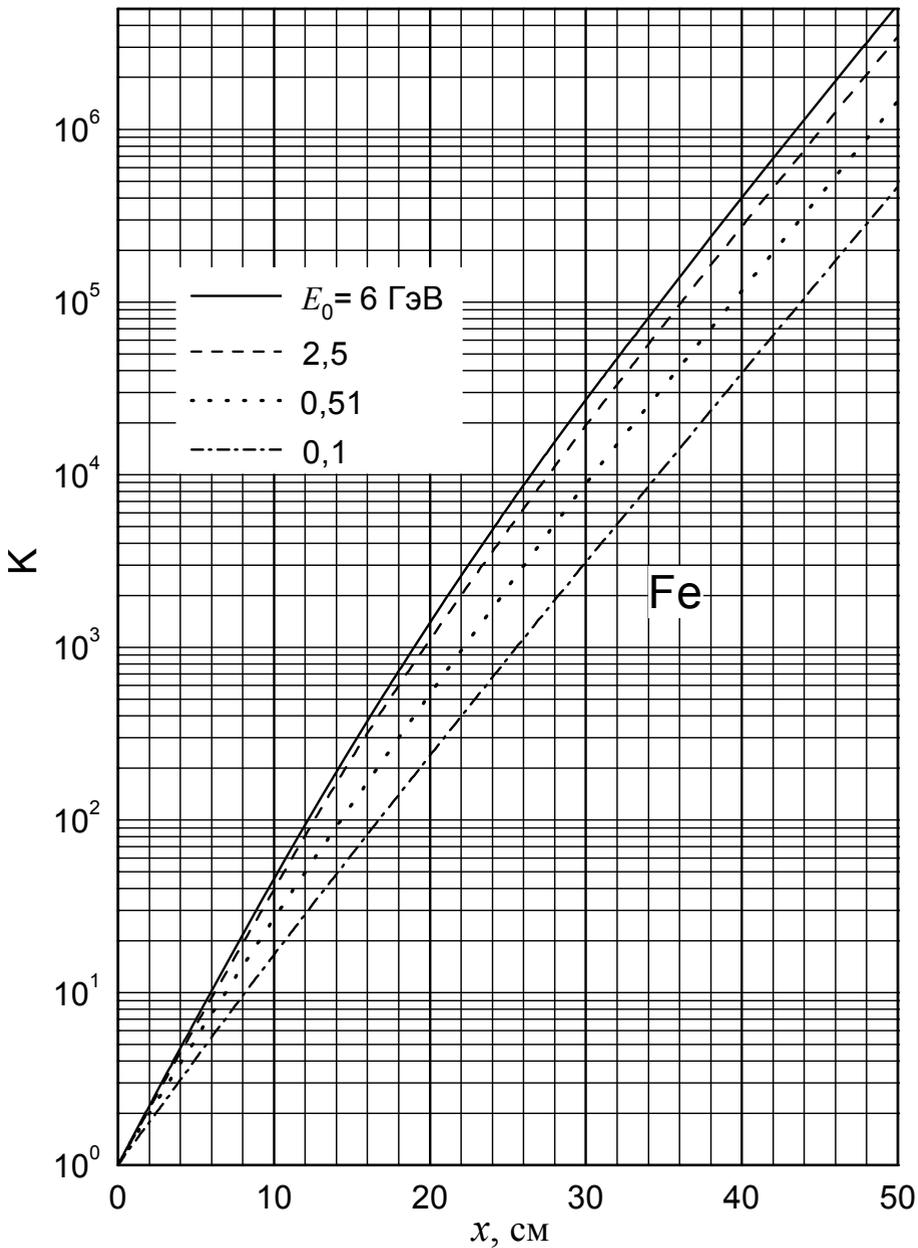


Рис. 7. То же, что на рис. 2 для экрана из железа ( $\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$ ).

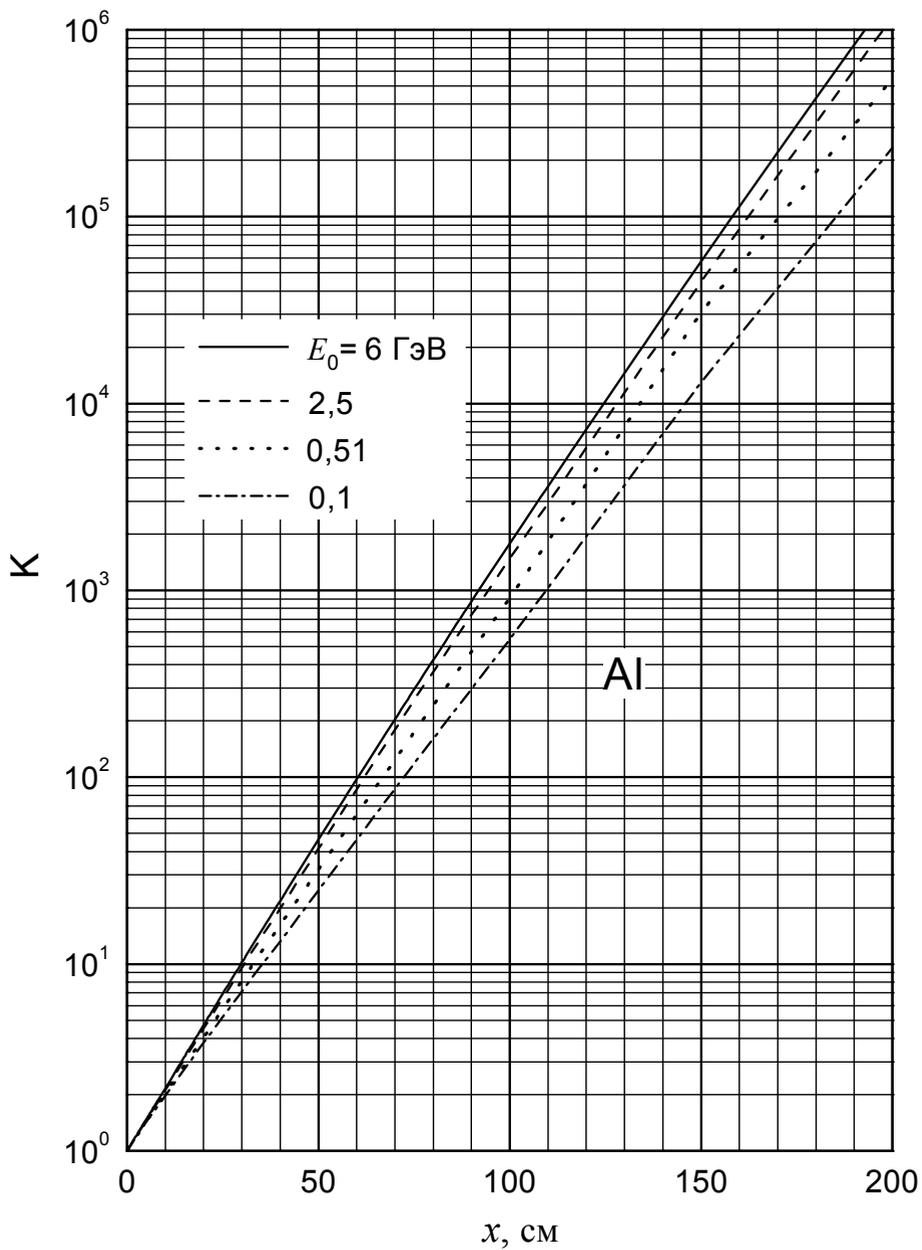


Рис. 8. То же, что на рис. 2 для экрана из алюминия ( $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>).

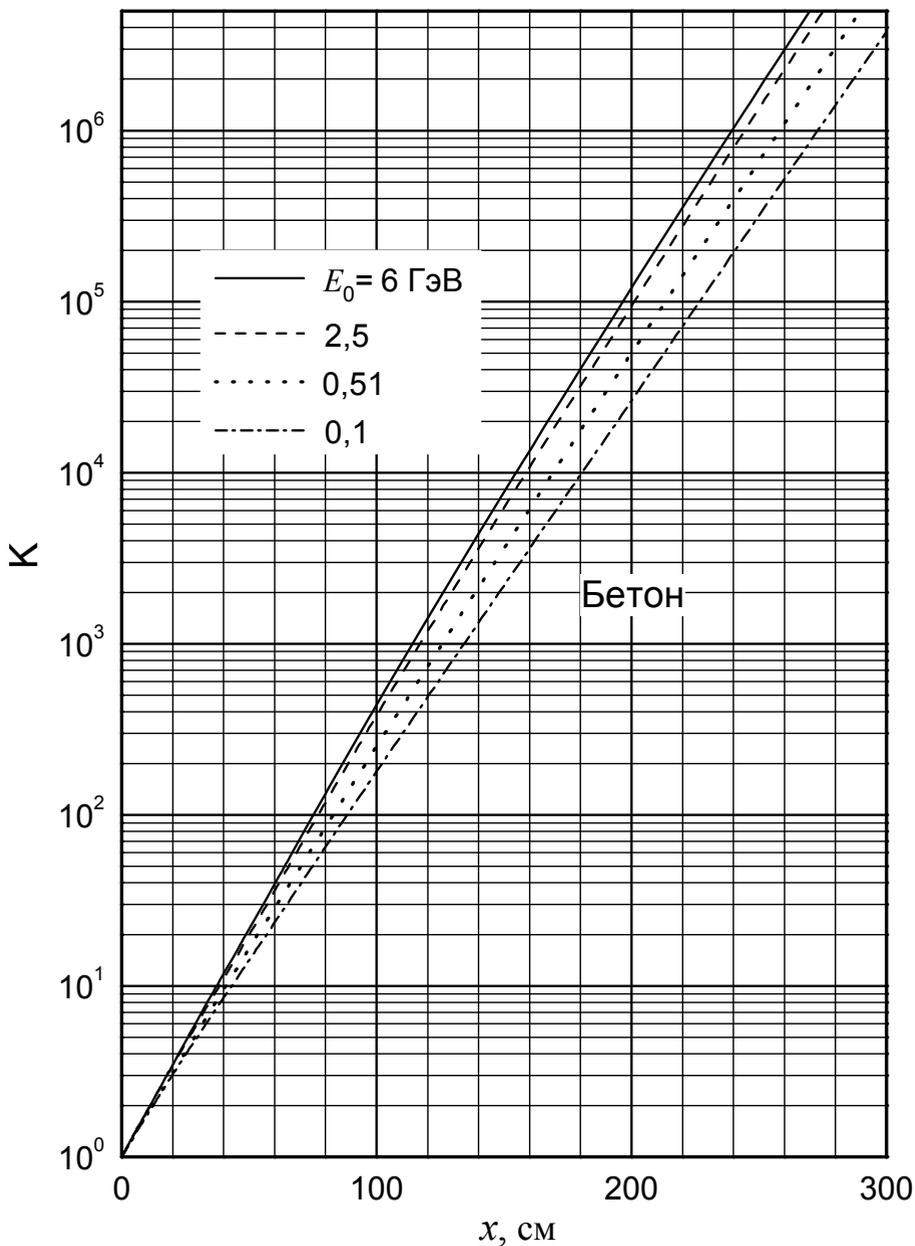


Рис. 9. То же, что на рис. 2 для экрана из бетона ( $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$ ).

*В.Г. Баркова, В.Я. Чудаев, Н.С. Шамакина*

**Ослабление местными защитными экранами эквивалентной дозы  
прямого пучка тормозного излучения высокой энергии**

*V.G. Barkova, V.Ya. Chudaev, N.S. Shamakina*

**Attenuation of equivalent dose of direct high-energy bremsstrahlung beam  
by means of local protective screens**

ИЯФ 2012-16

Ответственный за выпуск А.В. Васильев  
Работа поступила 13.06. 2012 г.

---

Сдано в набор 14.06. 2012 г.

Подписано в печать 14.06. 2012 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 16

---

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