

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

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

ОСЛАБЛЕНИЕ БЕТОННОЙ ЗАЩИТОЙ  
ВОЗДУШНОЙ КЕРМЫ  
ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ИЗ ТОЛСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ МИШЕНЕЙ  
Наклонное падение на защиту

$E_0 = 0,5; 1,0; 2,0; 2,8$  МэВ

ИЯФ 2009-37

НОВОСИБИРСК  
2009

**Ослабление бетонной защитой воздушной кермы  
тормозного излучения из толстых алюминиевых мишеней.**

**Наклонное падение на защиту**

$$E_0 = 0,5; 1,0; 2,0; 2,8 \text{ МэВ}$$

*В.Г. Баркова, В.Я. Чудаев<sup>\*)</sup>, Н.С. Шамакина*

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

**Аннотация**

Выполнены аналитические оценки ослабления бетоном воздушной кермы тормозного излучения, испускаемого из толстых алюминиевых мишеней при их бомбардировке электронами с энергией 0,5...2,8 МэВ, при наклонном падении излучения на защиту. Полученные результаты представлены в графическом виде. В расчётах в качестве исходной информации использованы доступные из литературы экспериментальные данные об энергетическо-угловых распределениях тормозного излучения из таких мишеней и расчётные данные по ослаблению воздушной кермы для моноэнергетических фотонов при их наклонном падении на защиту.

Представленные результаты могут быть полезны при проектировании и анализе эффективности защитных сооружений из бетона, предназначенных для размещения ускорителей электронов на энергии в рассмотренном диапазоне.

**Concrete-shield attenuation of the air kerma of bremsstrahlung  
from thick aluminum targets at off-normal incidence  
of bremsstrahlung onto the shield**

$$E_0 = 0.5; 1.0; 2.0; 2.8 \text{ MeV}$$

*V.G. Barkova, V.Ya. Chudaev<sup>\*)</sup>, N.S. Shamakina*

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract**

Concrete-shield attenuation of the air kerma of bremsstrahlung emitted from thick aluminum targets bombarded with 0.5...2.8 MeV electrons was estimated for bremsstrahlung striking the shield at an oblique angle. The obtained results are presented graphically. Experimental data available in literature on angle-energy distributions of bremsstrahlung from such targets and design data on attenuation of air kerma for monoenergetic photons at their off-normal incidence onto the shield (also available in literature) were used as source information in the computations.

The presented results can be useful in designing and analysis of efficiency of concrete protective structures intended to comprise electron accelerators for energies in the above-indicated range.

---

<sup>\*)</sup>email: V.Ya.Chudaev@inp.nsk.su

Для рассматриваемого энергетического диапазона расчёты ослабления кермы тормозного излучения из лёгких мишеней были выполнены авторами [1] при условии нормального падения излучения на защиту. Реальные же защитные конструкции ускорительных установок, как правило, таковы, что только небольшая доля полного потока излучения падает на защитные барьеры по направлениям, близким к нормали. Поэтому оценка эффективности защиты при наклонном на неё падении тормозного излучения может также приобретать достаточную практическую значимость [2, 3].

В работе [3] выполнена обширная серия расчётов ослабления дозы тормозного излучения бетоном методом «конкурирующих линий» для ускорителей электронов с энергиями 0,5...10 МэВ при углах падения излучения на защиту от 0 до 70° с шагом 10°. Однако результаты этой работы относятся, главным образом, к тяжёлым мишеням (Sn, W, Au), а выходные данные для простоты представлены приближённо в виде слоёв десятикратного ослабления.

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 непротиводействовавшими с её веществом фотонами пути длиной x см (рис. 1), может быть в достаточно общем виде выражена следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{D}_k(T_0, \dot{n}, z, \theta_0, z_{sh}, \theta_{sh}, x, R) = \\ = \frac{\dot{n}}{R^2} \int_0^{T_0} \gamma(k) \frac{d^2 I(z, T_0, \theta_0, k)}{dk d\Omega} e^{-\mu x} B(\mu x, z_{sh}, \theta_{sh}, k) dk, \quad (1) \end{aligned}$$

- 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;
- $\theta_0$  – угол между направлением пучка электронов и направлением из мишени в точку наблюдения;
- $\frac{d^2I}{dk d\Omega}$  – энергетическо-угловое распределение энергии фотонного излучения, выходящего из мишени,  $(\text{ср}\cdot\text{с}^{-1})^{-1}$ ;
- $\gamma(k)$  – массовый коэффициент передачи энергии фотонами с энергией  $k$  для воздуха,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;
- $\mu = \mu(k, z_{\text{sh}})$  – линейный коэффициент ослабления в веществе защиты с эффективным атомным номером  $z_{\text{sh}}$  для фотонов энергии  $k$ ,  $\text{см}^{-1}$ ;
- $\theta_{\text{sh}}$  – угол падения излучения на защиту;
- $V$  – фактор накопления.

В настоящей работе в качестве исходной информации по энергетическо-угловым распределениям тормозного излучения, как и в [1], использовались экспериментальные данные Данса, Рестера и др. [4], полученные с помощью двухкристального скинтилляционного спектрометра для алюминиевых мишеней, толщина которых слегка превышала значение среднего пробега бомбардирующих электронов. В [1] во всех расчётах предполагалось также наличие начальной фильтрации 5 мм Al (примерно эквивалентно 0,6 см обычного бетона плотностью 2,3 г/см<sup>3</sup>). Для рассматриваемого энергетического диапазона энергетическо-угловые распределения фотонного излучения, покидающего мишень, существенно не искажаются фильтром столь малой толщины, за исключением того, что подавляются самые низкоэнергетические участки спектров ( $\leq 40$  кэВ). Поэтому, в

настоящей работе кратность ослабления кермы при  $x \gg 0,6$  см бетона рассчитывалась в соответствии с соотношением:

$$K \simeq \dot{D}_k(T_0, \dot{n}, z, \theta_0, z_{sh}, 30^\circ, 6 \cdot 10^{-1}, R) / \dot{D}_k(T_0, \dot{n}, z, \theta_0, z_{sh}, \theta_{sh}, x, R). \quad (2)$$

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. Если защитный бетонный барьер находится на достаточно большом удалении от мишени, то для приближённых оценок ослабления воздушной кермы можно воспользоваться значениями факторов накопления, извлечёнными из информации, представленной в [5] для плоского мононаправленного источника в бесконечной бетонной среде (и интерполированными).

В настоящей работе расчёты кратностей ослабления воздушной кермы обычным бетоном с помощью (1) и (2) проведены для энергий  $T_0$ , равных 0,5; 1,0; 2,0 и 2,8 МэВ. При каждом значении  $T_0$  кратности ослабления просчитывались для 5–8 значений угла выхода излучения из мишени  $\theta_0$  при углах падения на защиту  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$  и  $70^\circ$ .

Масштабы эффекта наклонного падения наглядно иллюстрируются результатами расчётов, представленными на рис. 2 – 26 в графическом виде. Для рассматриваемого энергетического диапазона относительное влияние наклонности падения проявляется в большей степени в области малых энергий. Так, для  $K = 10^6$  усреднённые по  $\theta_0$  отношения значений «косых» толщин защиты при углах падения  $70^\circ$  и  $30^\circ$  в зависимости от энергии  $T_0$  получились следующими:

$T_0$ , МэВ	0,5	1,0	2,0	2,8
$\overline{\chi(70^\circ) / \chi(30^\circ)}$	1,96(±0,01)	1,86(±0,03)	1,72(±0,04)	1,61(±0,06).

В скобках здесь указаны максимальные отклонения отношений  $\chi(70^\circ) / \chi(30^\circ)$  от  $\overline{\chi(70^\circ) / \chi(30^\circ)}$  при отдельных значениях угла  $\theta_0$ .

Сопоставление с соответствующими данными для нормального падения [1] при  $K = 10^6$  даёт следующие значения отношения  $\overline{x(30^\circ)/x(0^\circ)}$  в зависимости от  $T_0$ :

$T_0, \text{МэВ}$	0,5	1,0	2,0	2,8
$\overline{x(30^\circ)/x(0^\circ)}$	1,10	1,08	1,06	1,07

Здесь максимальные отклонения  $x(30^\circ)/x(0^\circ)$  от усреднённых значений составляют  $\sim 1\%$  при всех указанных значениях энергии  $T_0$ .

Погрешности расчёта кермы при больших толщинах защиты (соответствующих кратностям ослабления  $K \geq 10^6$ ) оценивались в [1] фактором  $\sim 2,5$  для условий нормального падения на защиту. Дополнительная неопределённость в результатах настоящих расчётов обусловлена неточностями интерполяции факторов накопления при выраженном наклонном падении. Результирующую погрешность кратностей ослабления (рис. 2 – 2б) для  $\theta_0 = 70^\circ$  в области  $K \geq 10^6$  можно поэтому оценивать фактором  $\sim 3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баркова В.Г., Чудаев В.Я. *Защита от тормозного излучения из легких мишеней (0,5 – 3 МэВ)*. – Новосибирск, 1981. – 29 с. – (Препринт / Ин-т ядерн. физики СО АН СССР; 81-78).
- [2] Баркова В.Г., Киселев А.В., Чудаев В.Я. *Оценка эффективности бетонной защиты от тормозного излучения 5 МэВ электронов при пуско-наладочных работах на ускорителе ИЛУ-10*. – Новосибирск, 2009. – 14 с. – (Препринт / Ин-т ядерн. физики СО РАН; 2009-17).
- [3] В.И. Цовбун. *Бетонная защита электронных ускорителей на энергии 0,5 – 10 МэВ*. – Дубна, 1974. – 12 с. – (Препринт / ОИЯИ; Р16 -7834).

- [4] *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.
- [5] Spenser L. V., Lamkin J. C. *Slant penetration of  $\gamma$ rays in concrete*: NBS report 6591. – 1959. – 61 p.

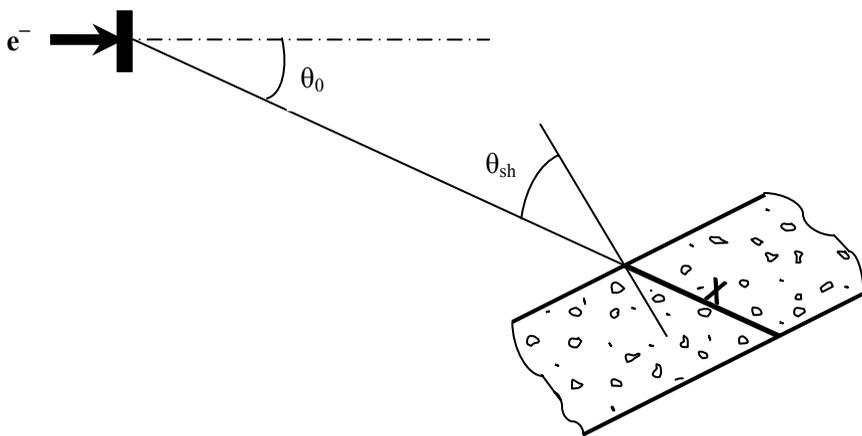


Рис. 1. К геометрии расчёта.

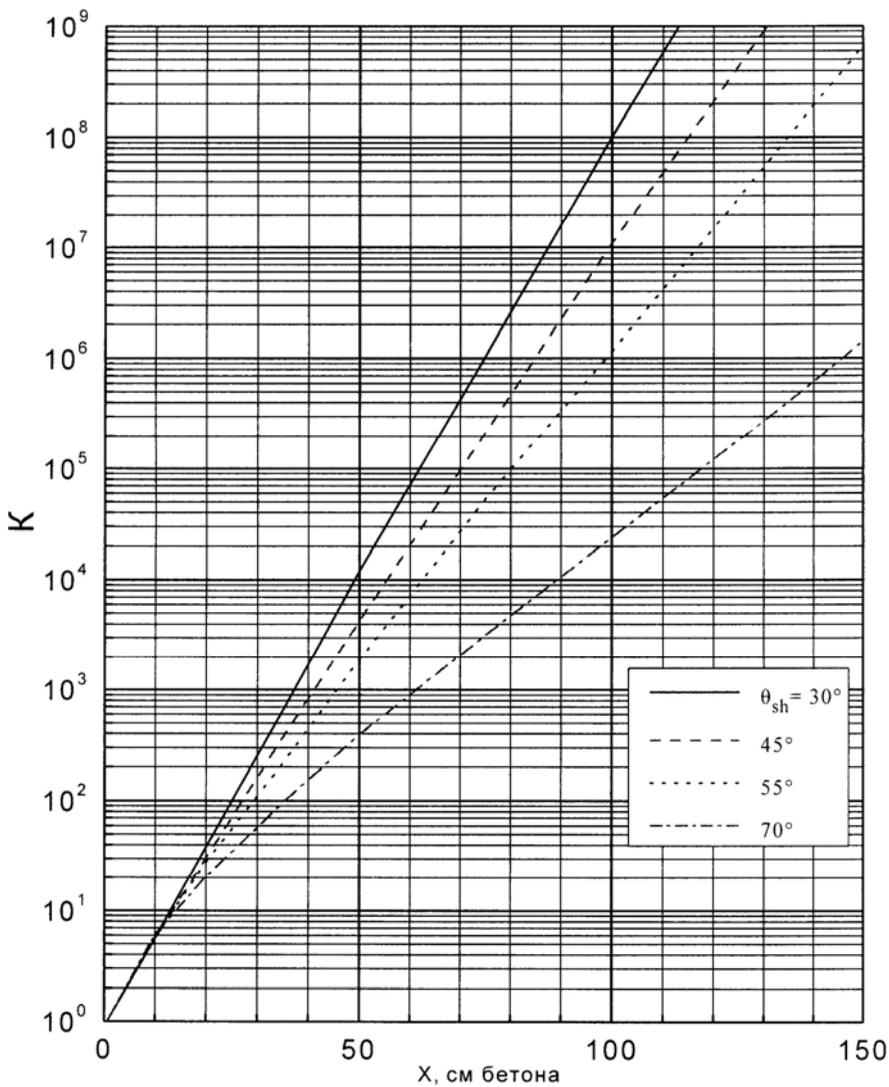


Рис. 2. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 0,5$  МэВ,  $\theta_0 = 0^\circ$ .

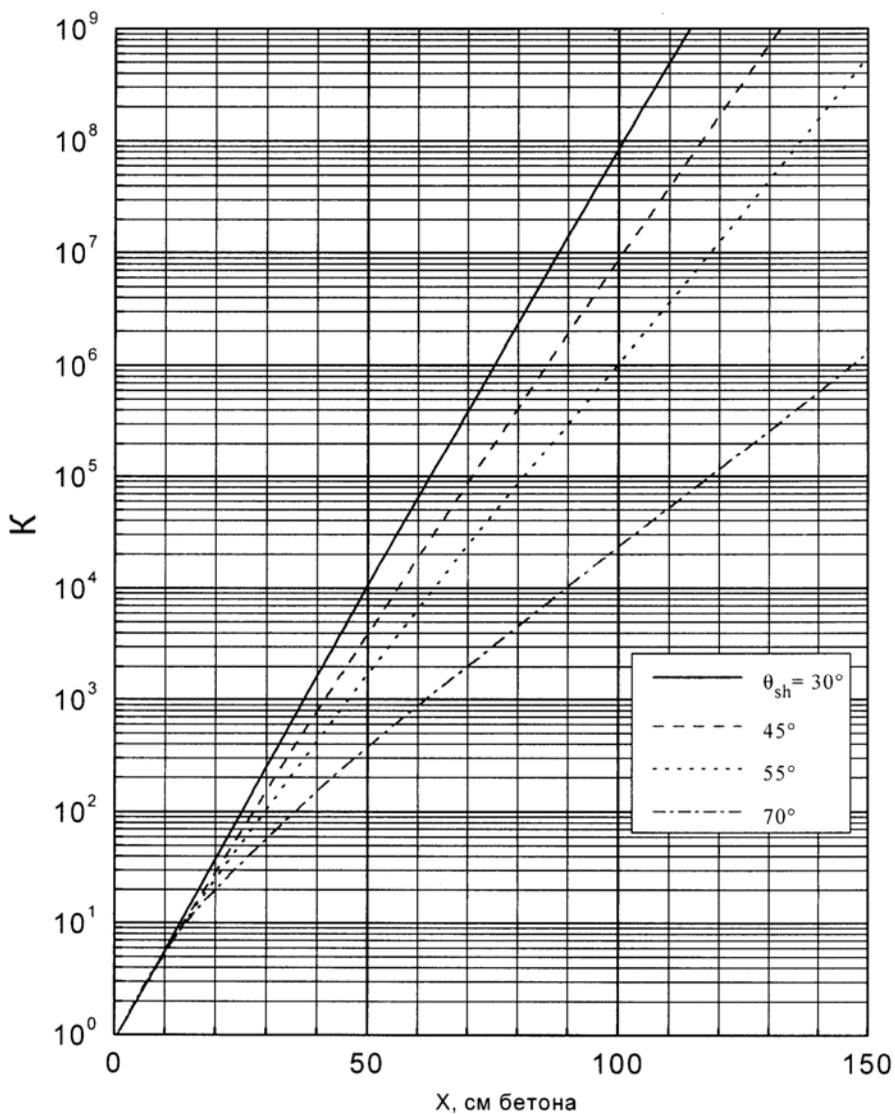


Рис. 3. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 0,5$  МэВ,  $\theta_0 = 30^\circ$ .

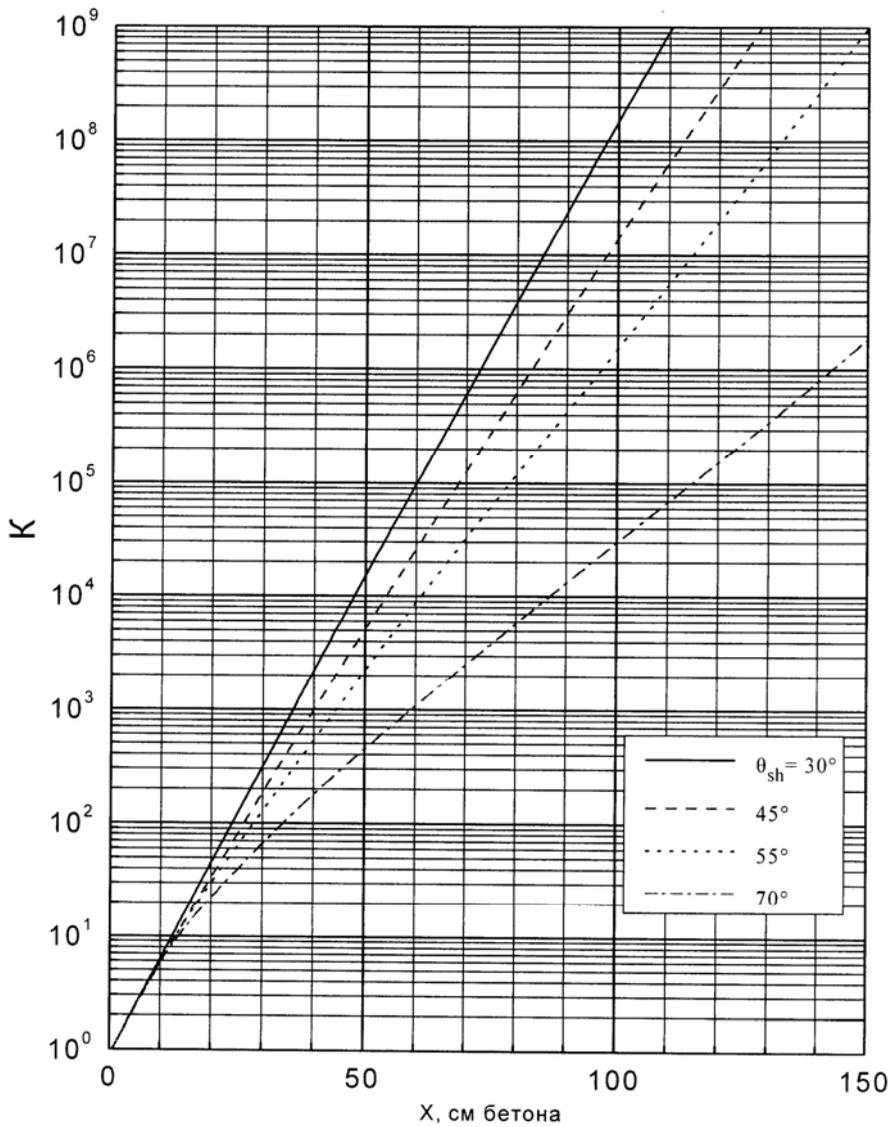


Рис. 4. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 0,5$  МэВ,  $\theta_0 = 60^\circ$ .

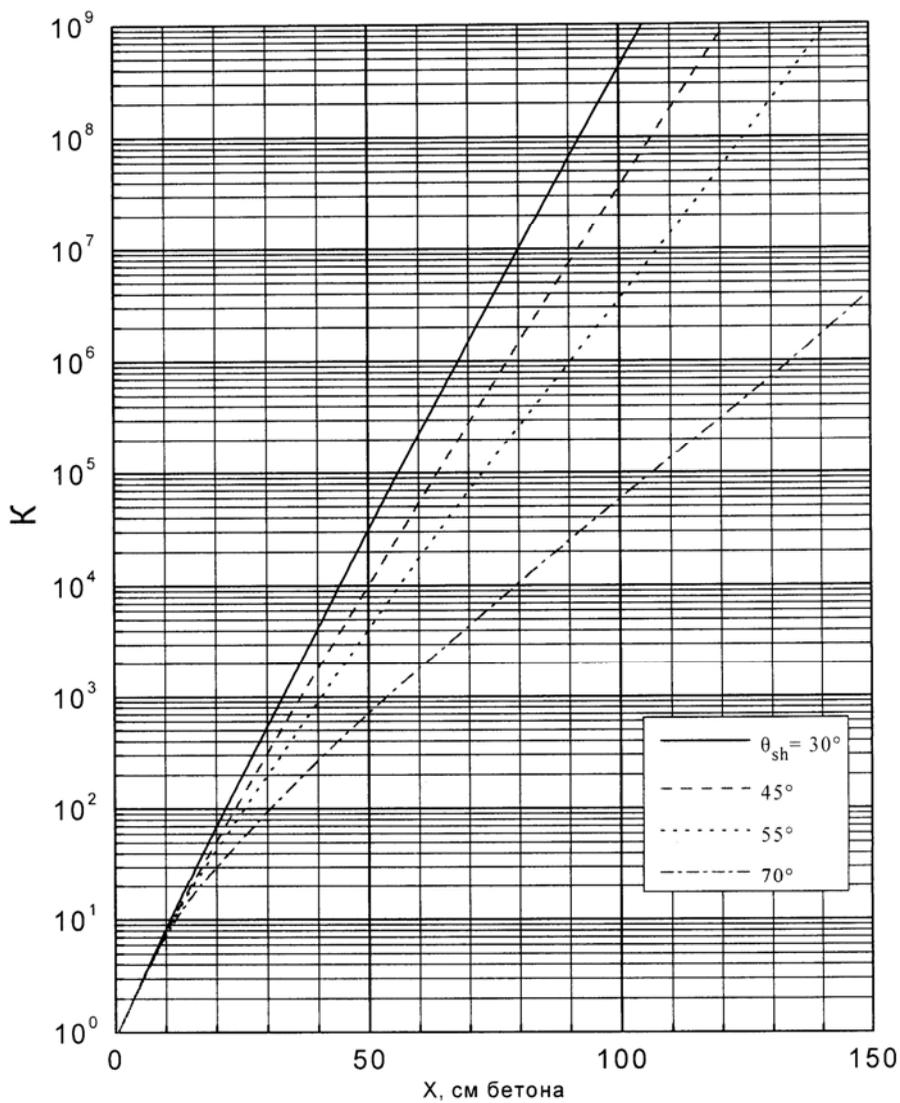


Рис. 5. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 0,5$  МэВ,  $\theta_0 = 120^\circ$ .

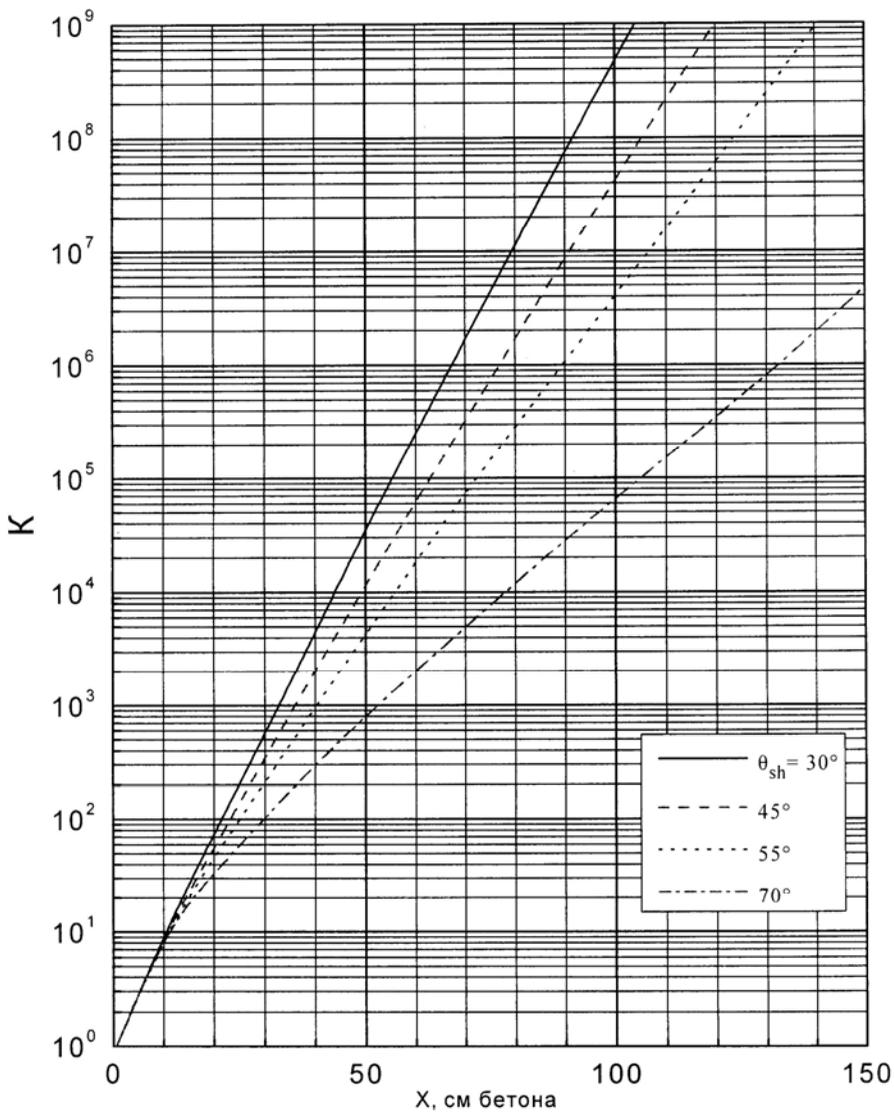


Рис. 6. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 0,5$  МэВ,  $\theta_0 = 150^\circ$ .

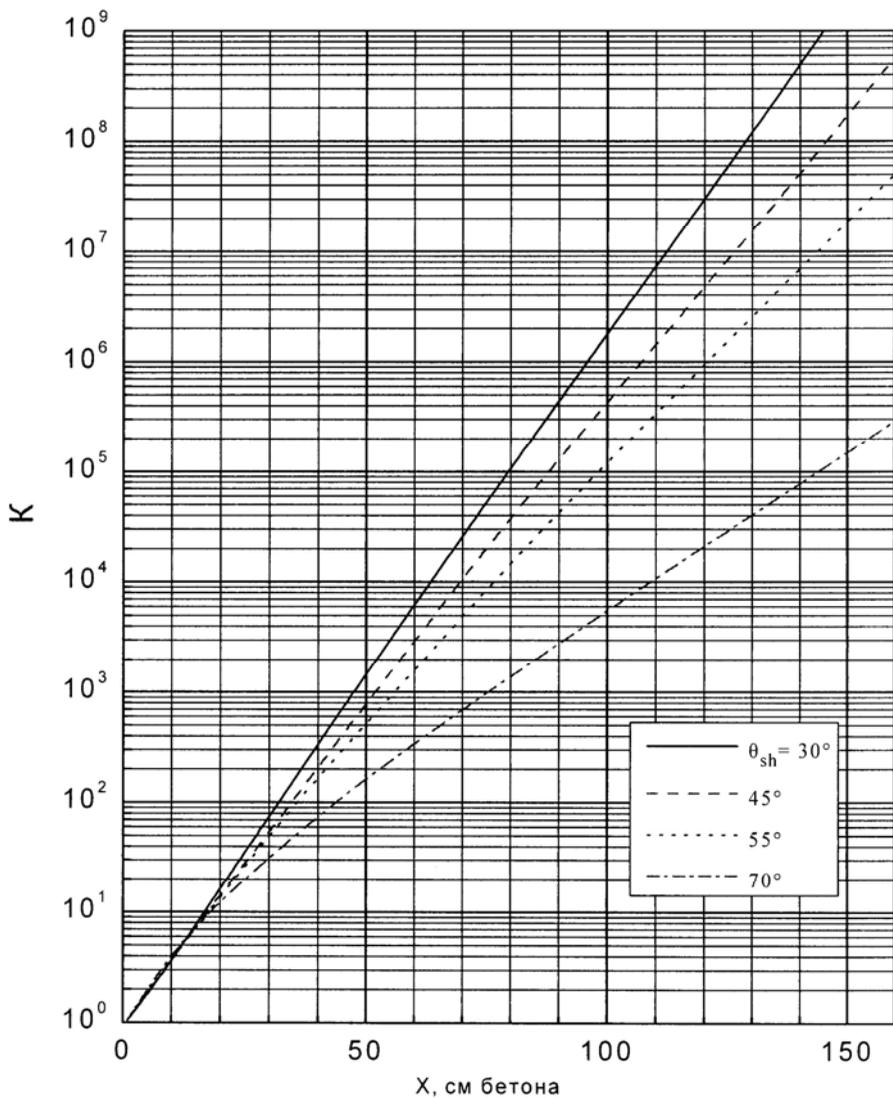


Рис. 7. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 0^\circ$ .

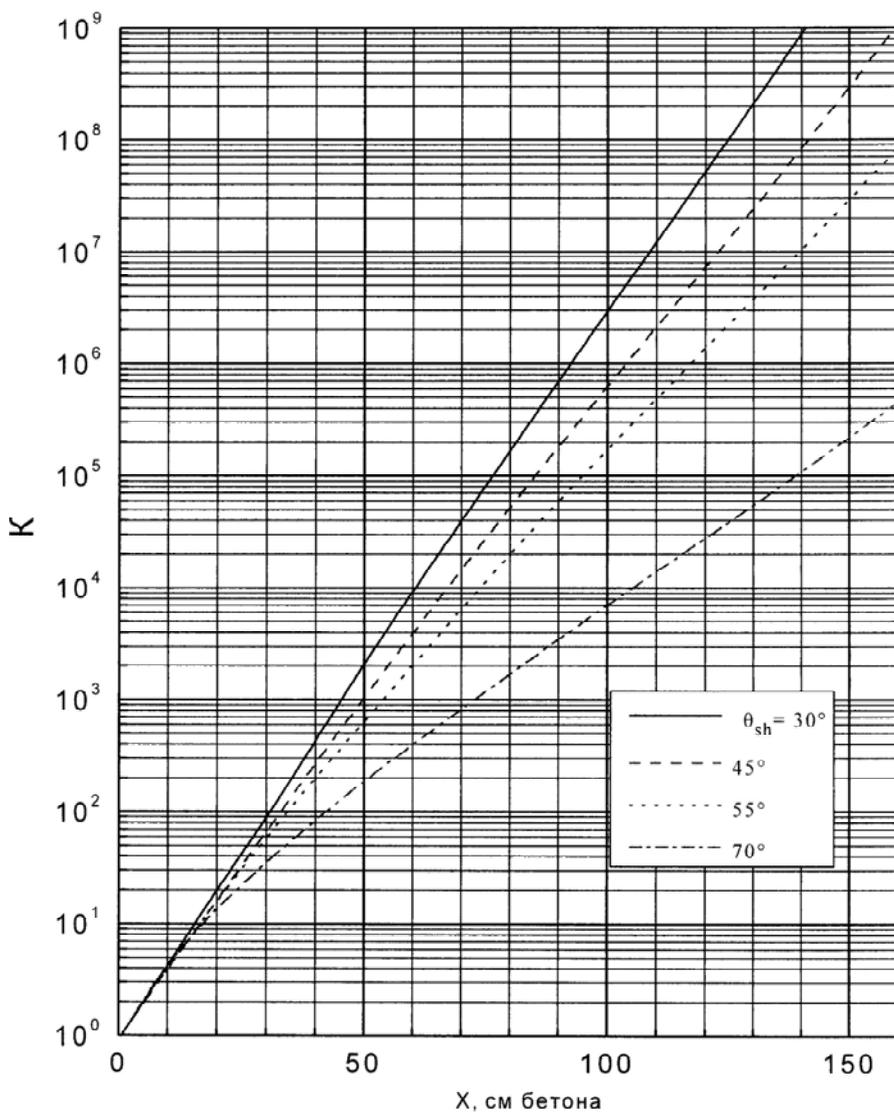


Рис. 8. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 45^\circ$ .

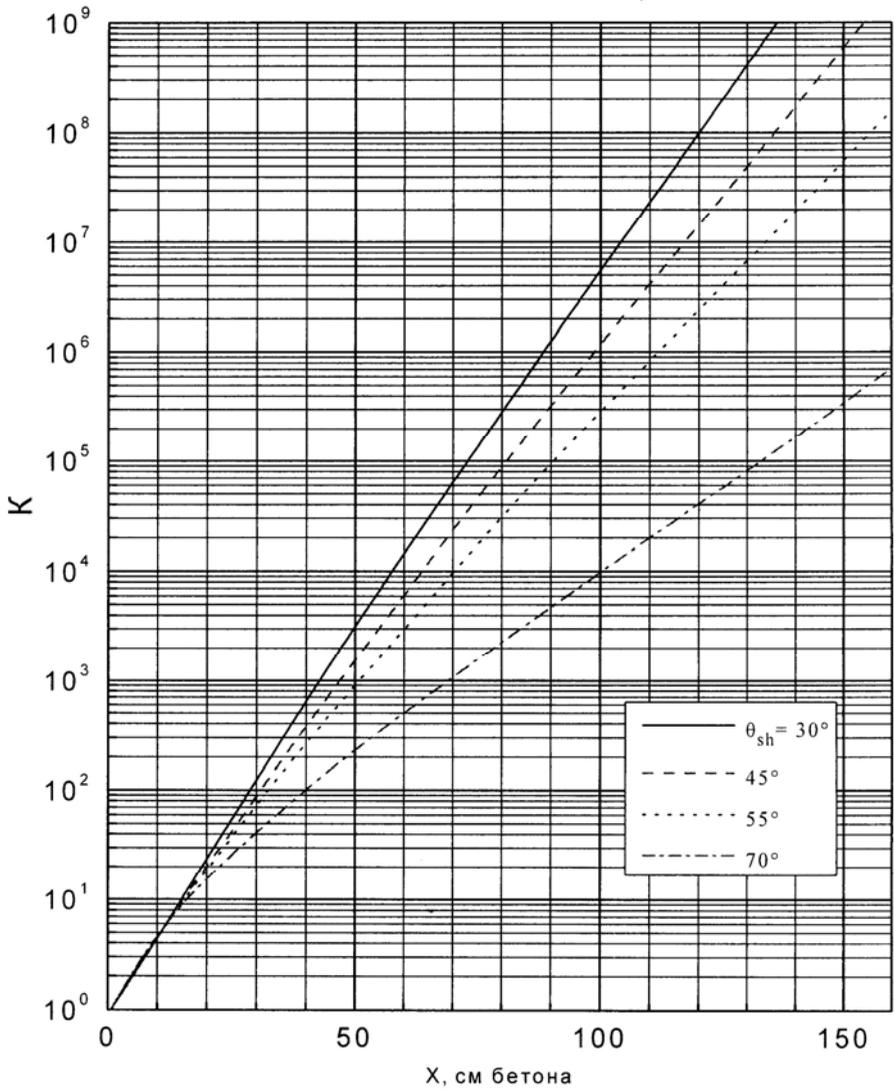


Рис. 9. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 75^\circ$ .

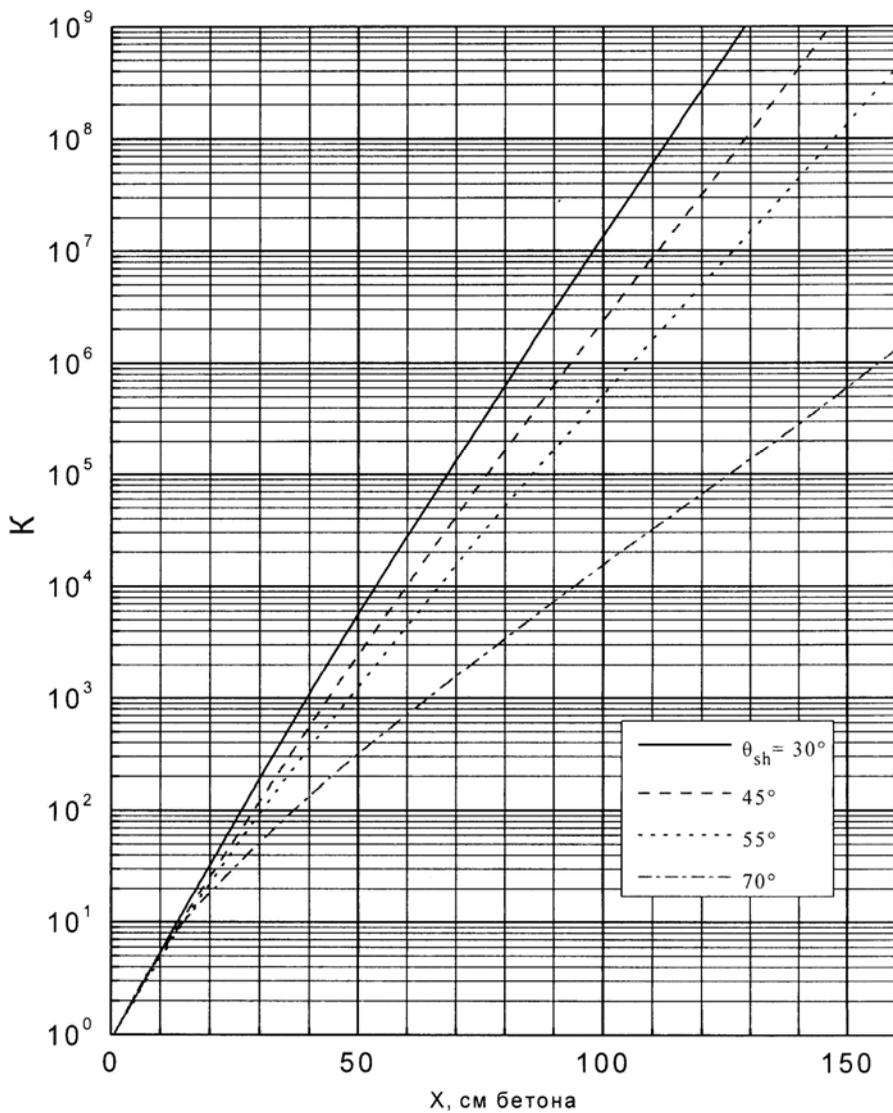


Рис. 10. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 120^\circ$ .

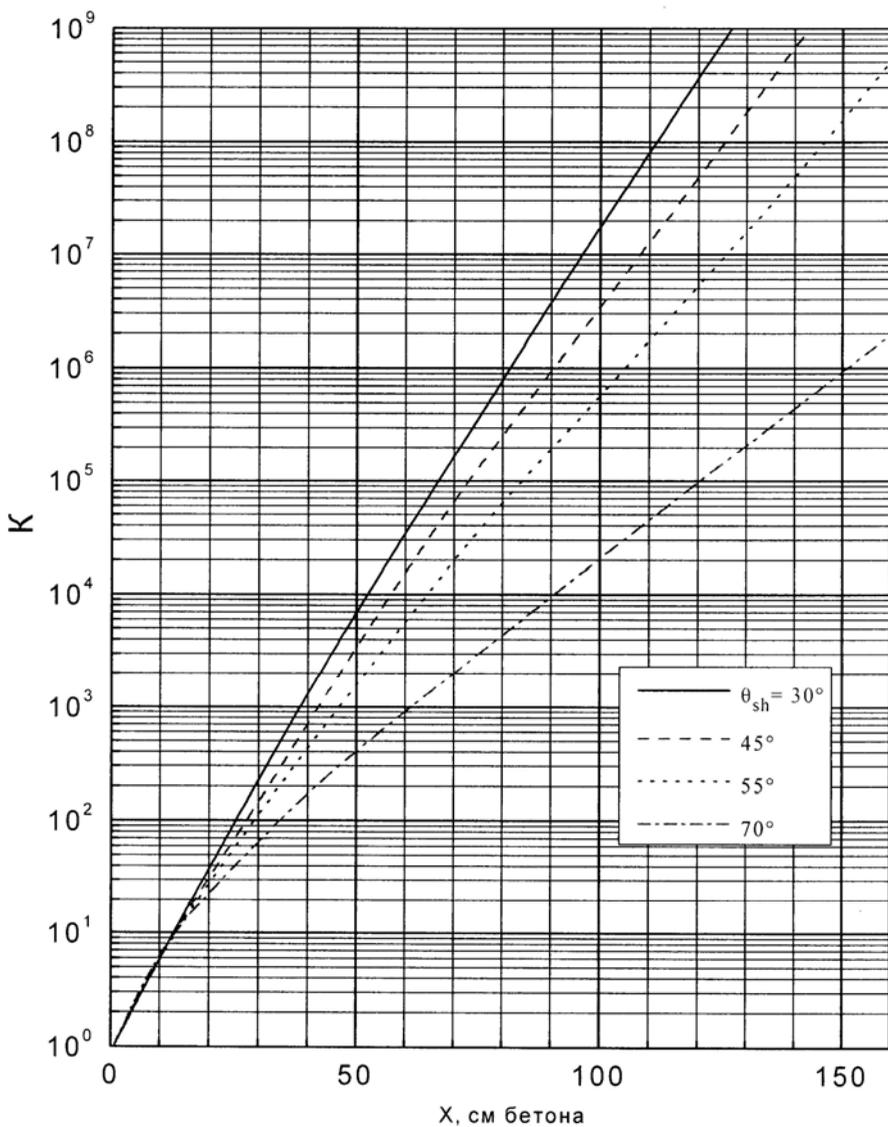


Рис. 11. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 135^\circ$ .

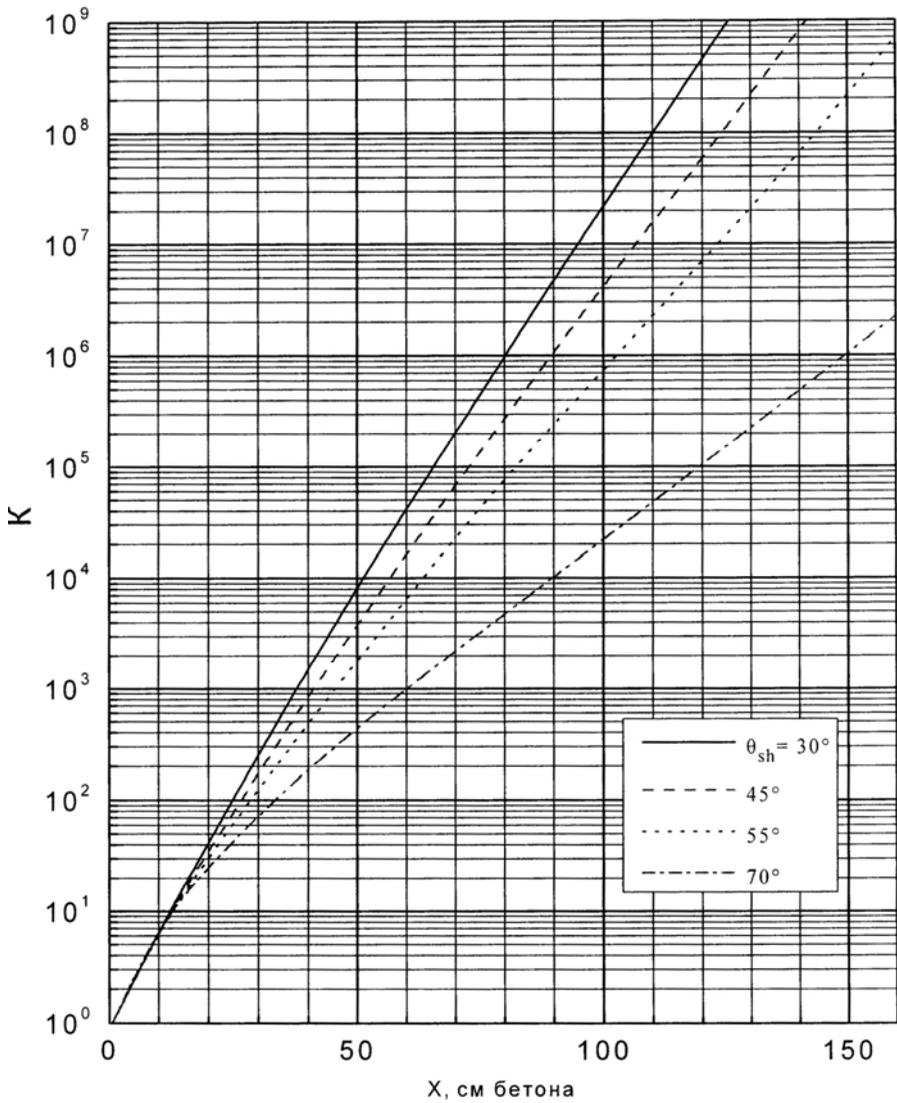


Рис. 12. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 1,0$  МэВ,  $\theta_0 = 150^\circ$ .

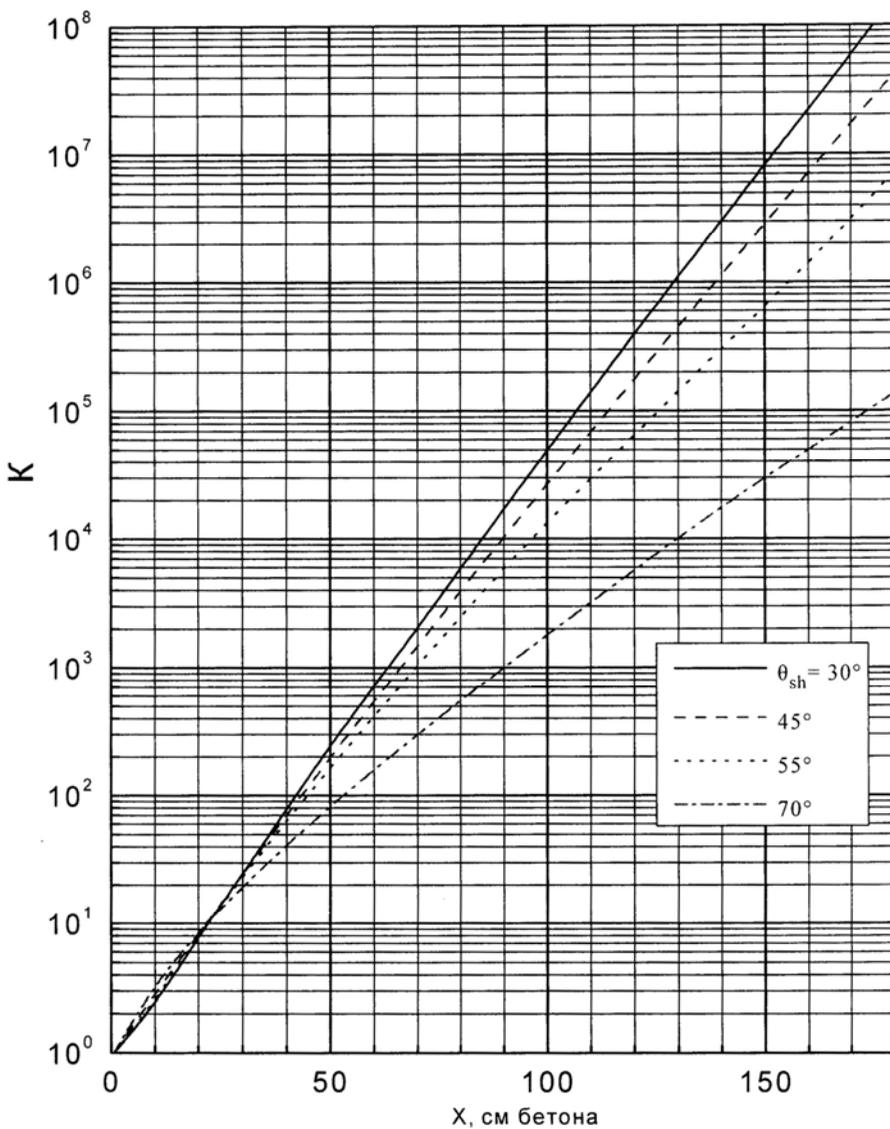


Рис. 13. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 0^\circ$ .

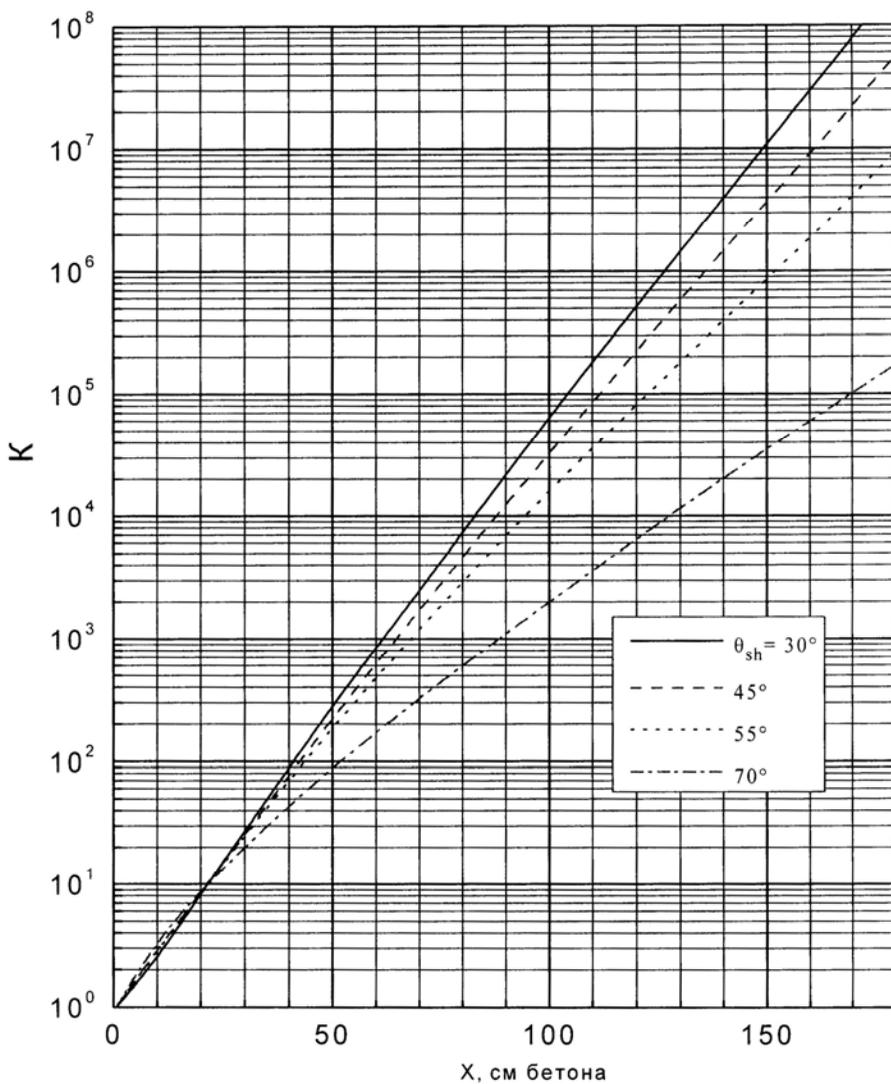


Рис. 14. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 20^\circ$ .

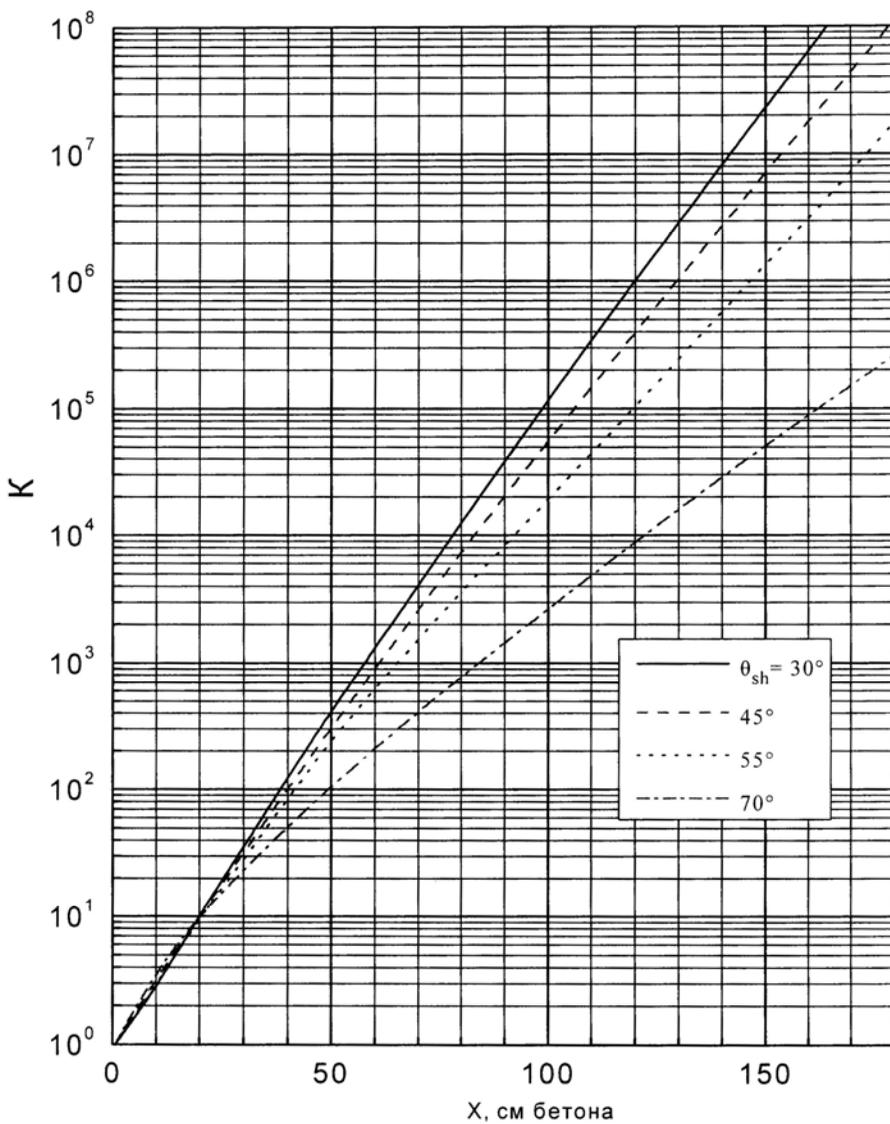


Рис. 15. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 45^\circ$ .

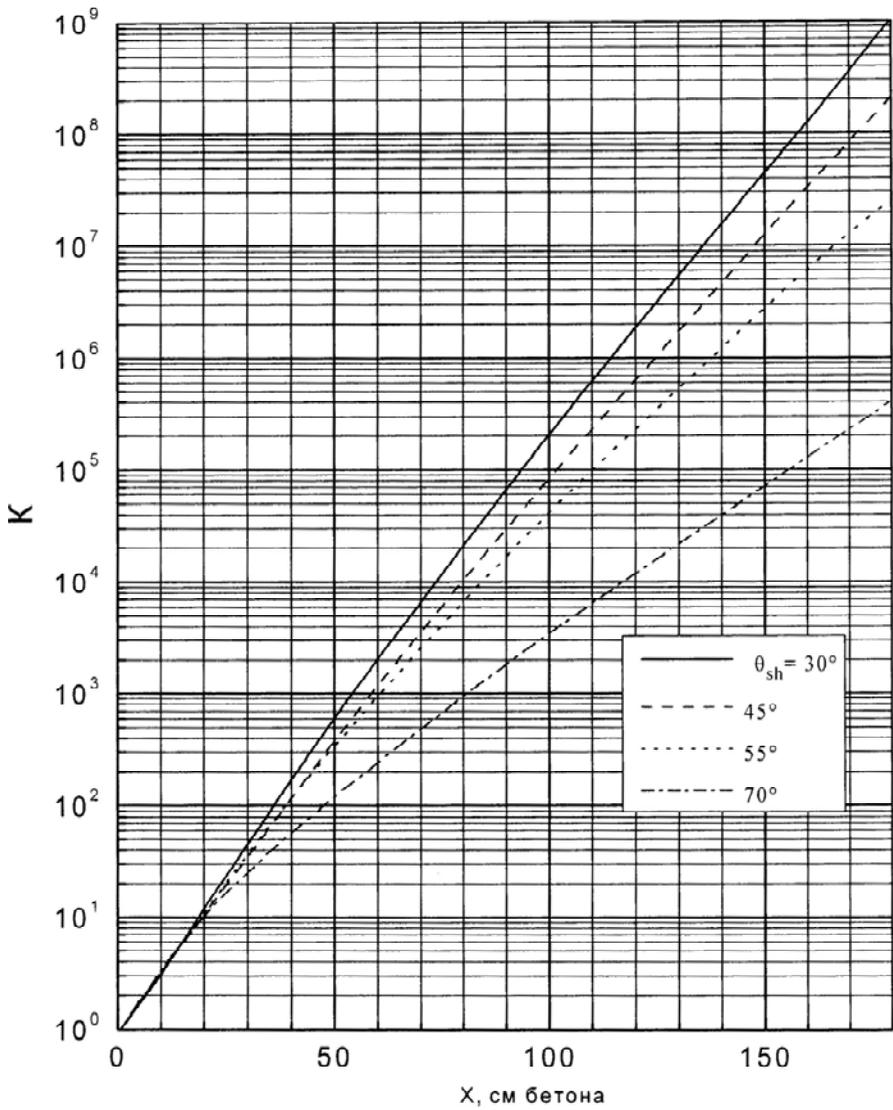


Рис. 16. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 75^\circ$ .

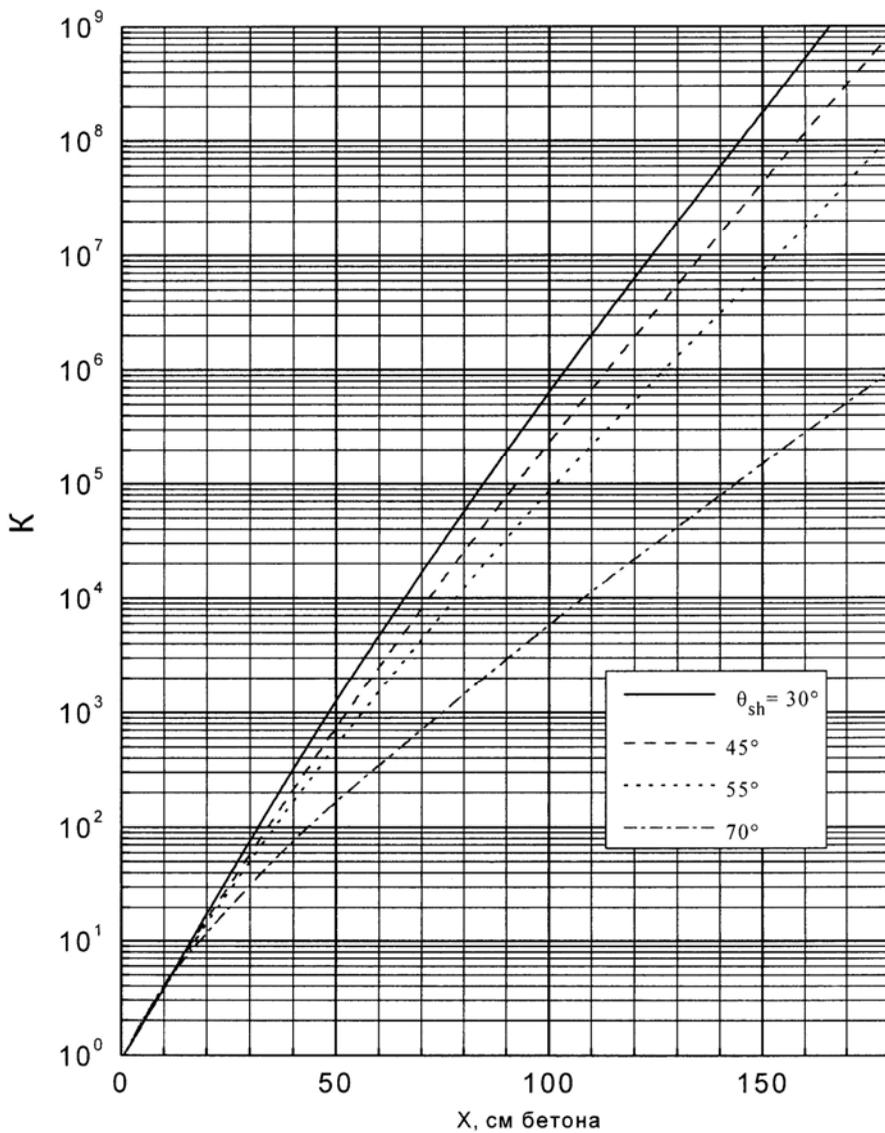


Рис. 17. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 120^\circ$ .

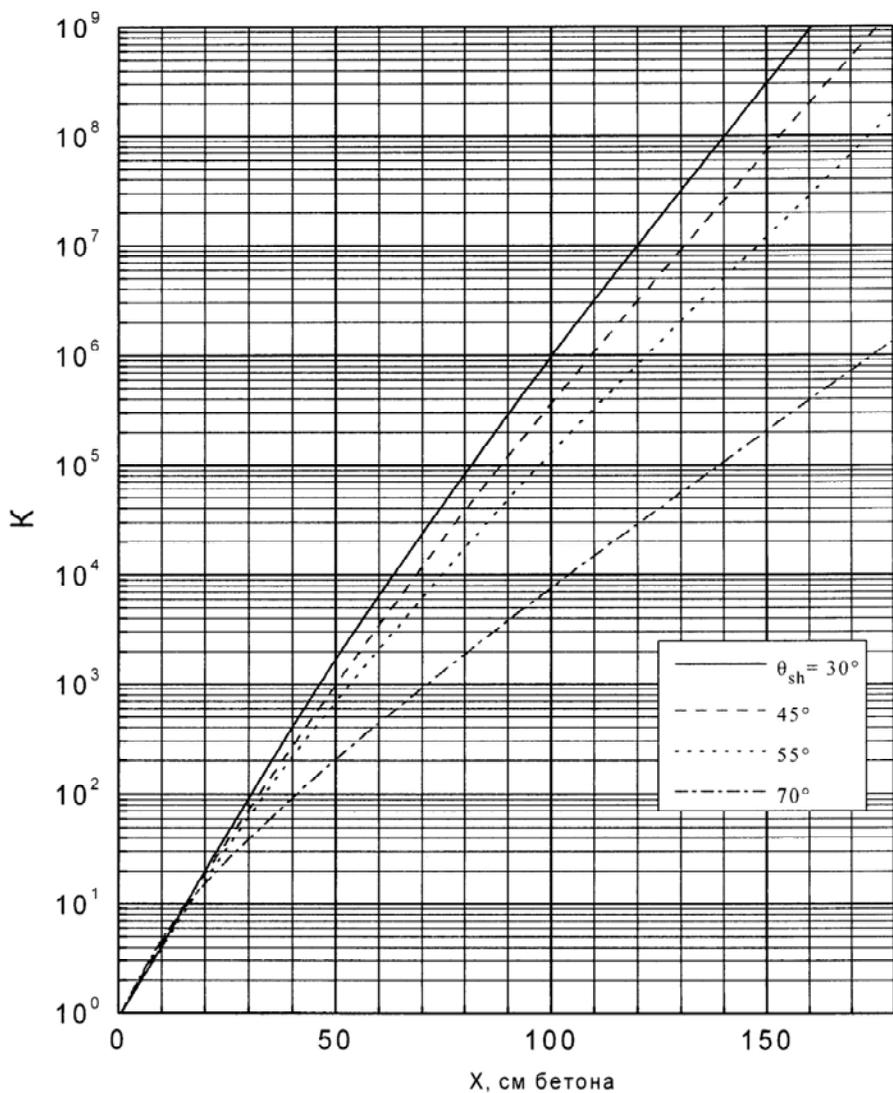


Рис. 18. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,0$  МэВ,  $\theta_0 = 150^\circ$ .

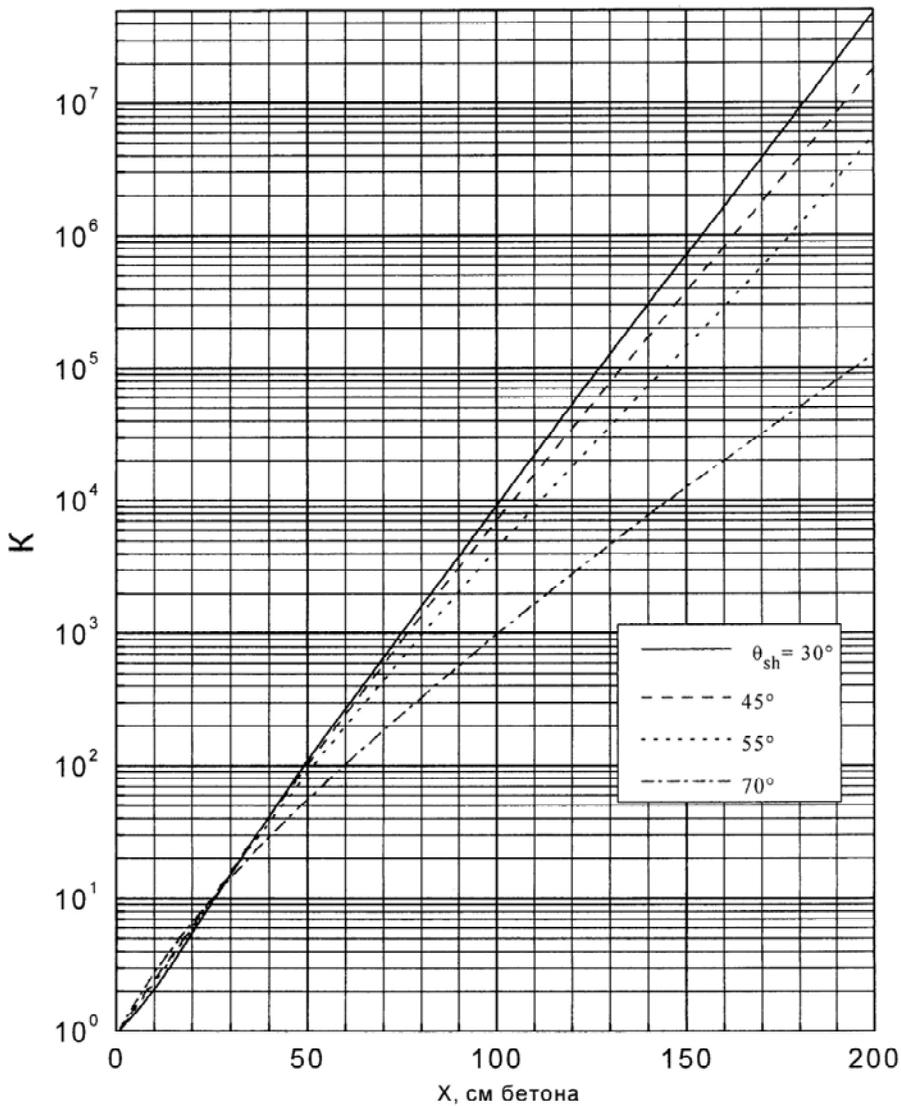


Рис. 19. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 0^\circ$ .

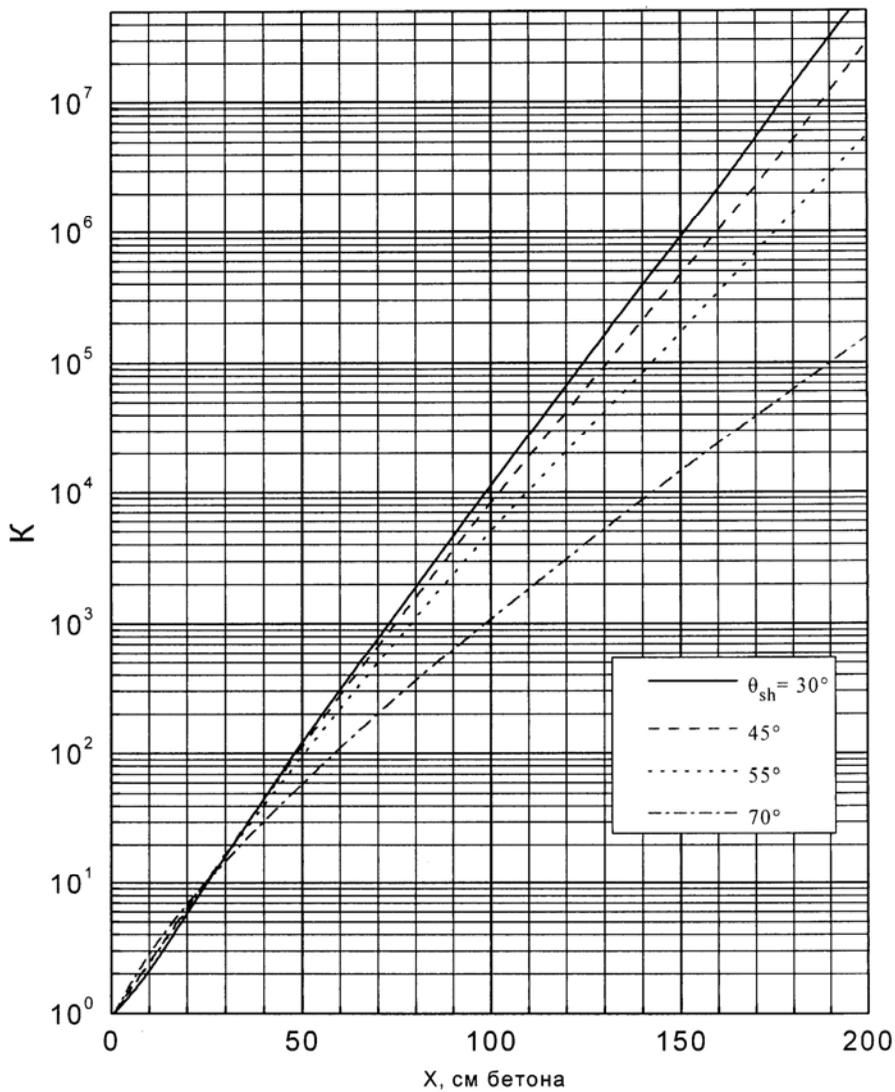


Рис. 20. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 15^\circ$ .

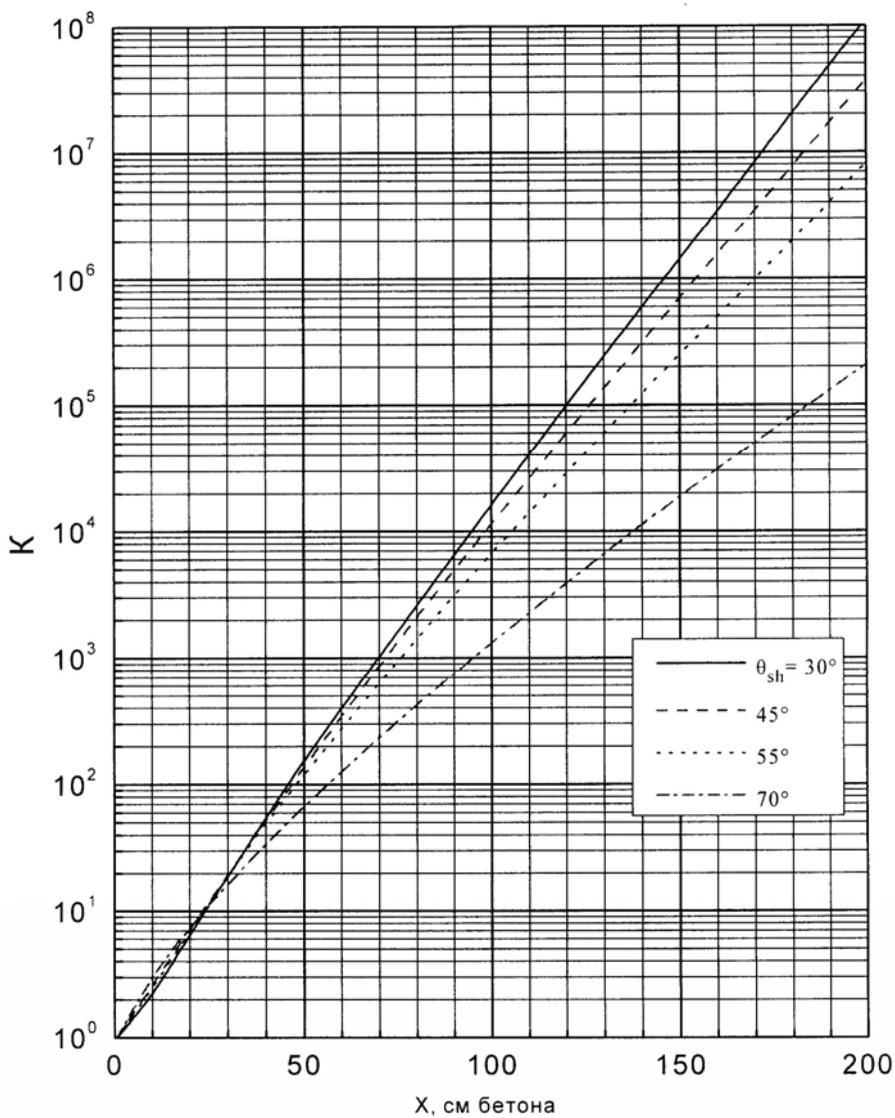


Рис. 21. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 30^\circ$ .

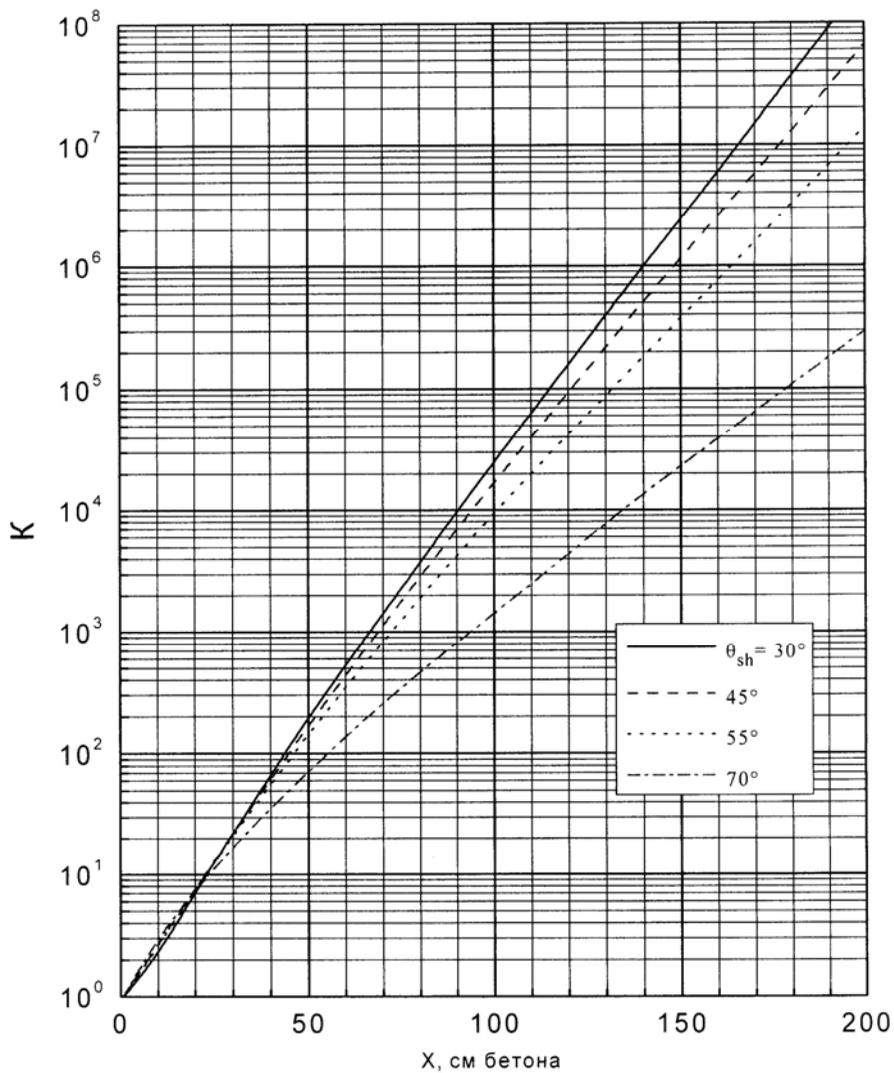


Рис. 22. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 45^\circ$ .

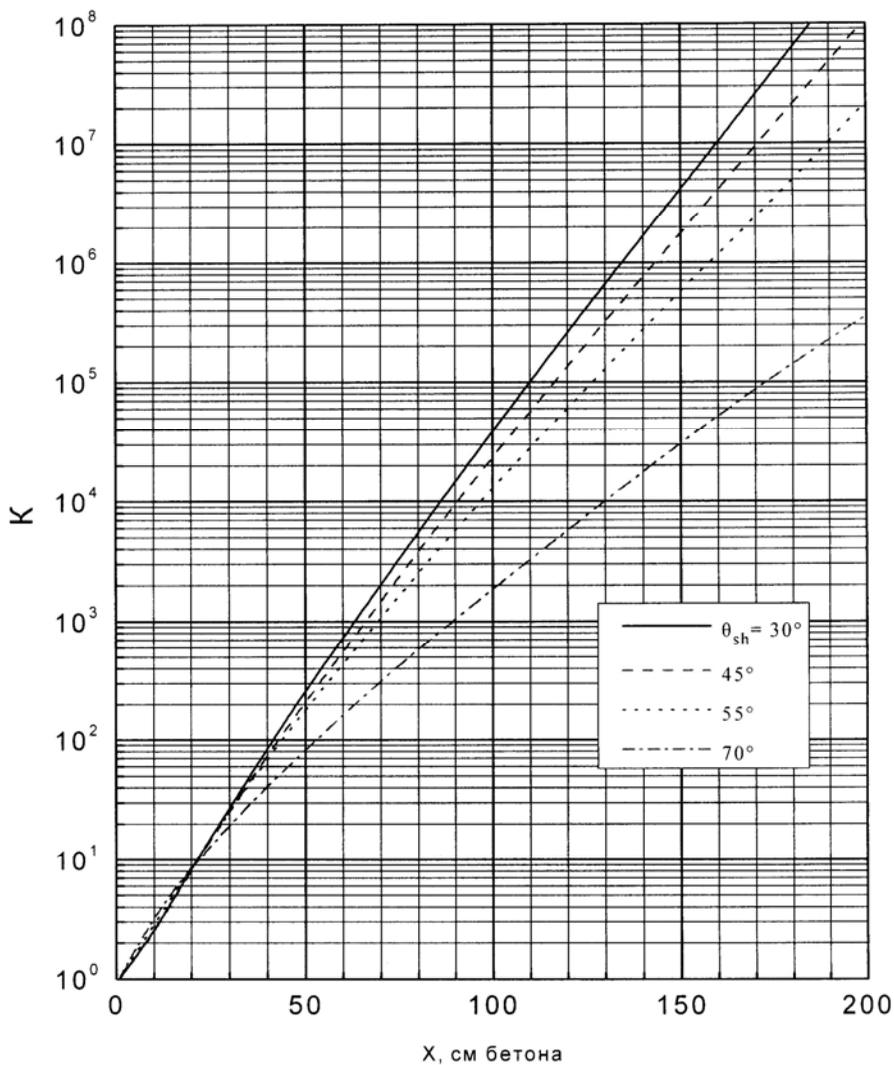


Рис. 23. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 60^\circ$ .

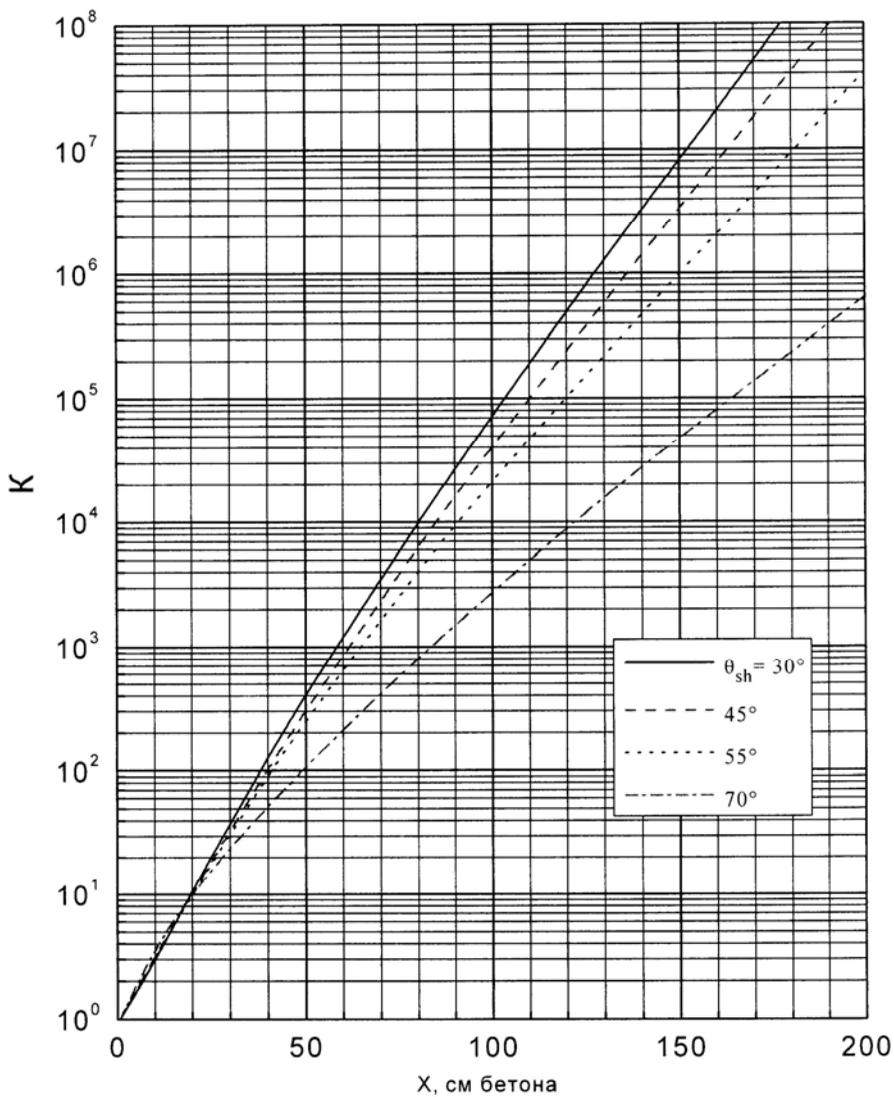


Рис. 24. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 120^\circ$ .

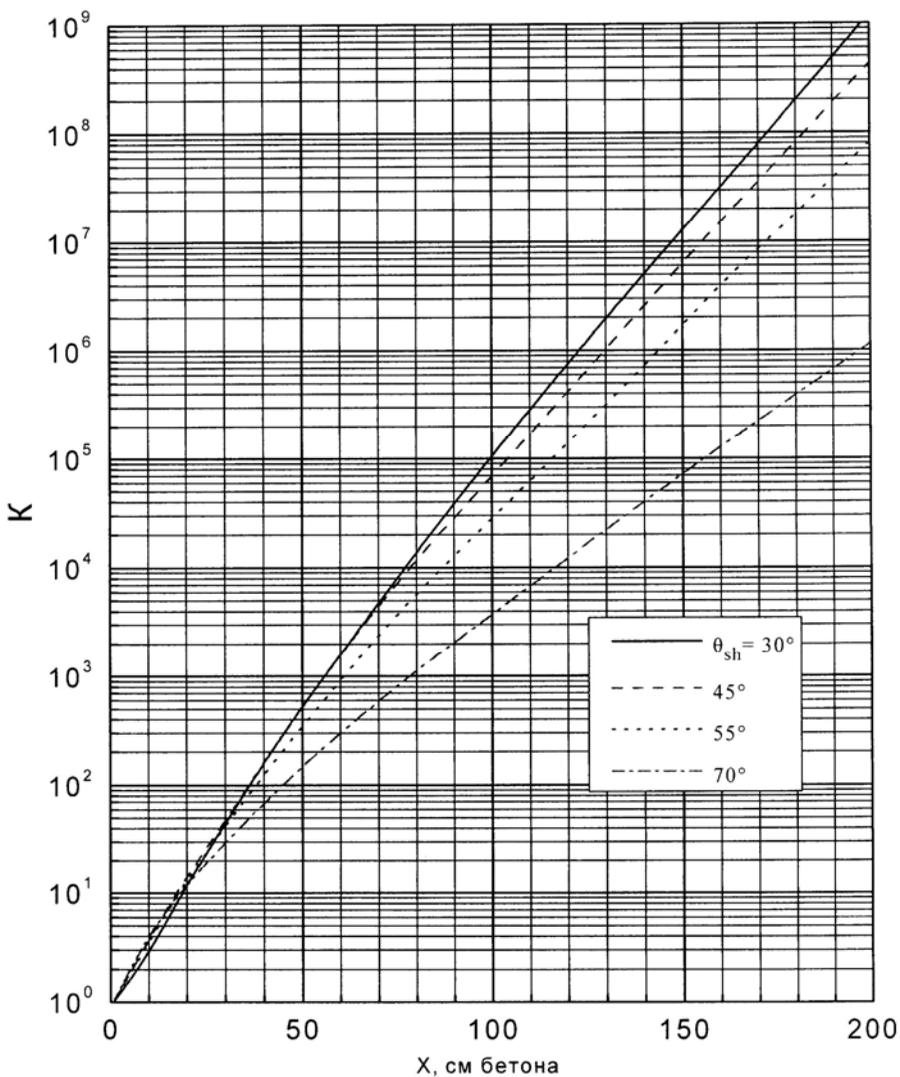


Рис. 25. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 135^\circ$ .

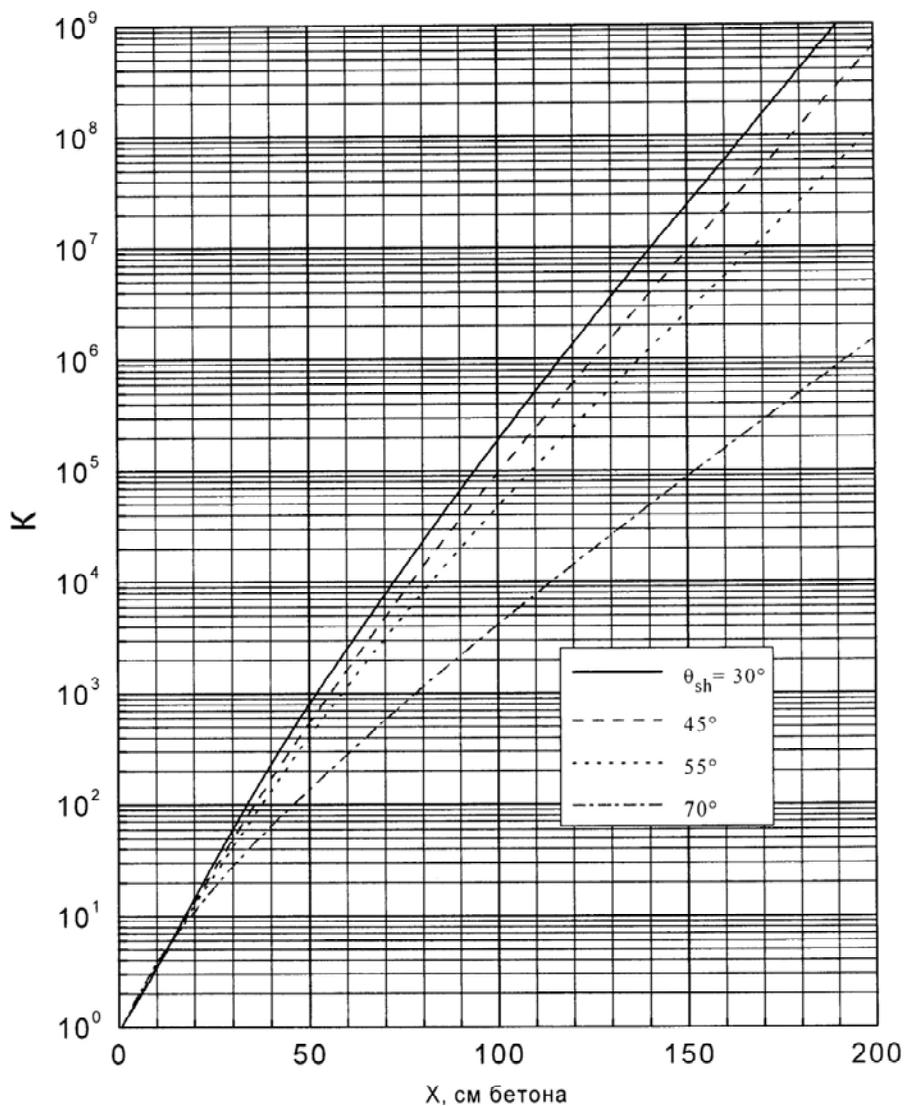


Рис. 26. Кратности ослабления бетонной защитой воздушной кермы тормозного излучения из Al мишени.  $T_0 = 2,8$  МэВ,  $\theta_0 = 150^\circ$ .

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

**Ослабление бетонной защитой воздушной кермы  
тормозного излучения из толстых алюминиевых мишеней.  
Наклонное падение на защиту**

$E_0 = 0,5; 1,0; 2,0; 2,8$  МэВ

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

**Concrete-shield attenuation of the air kerma of bremsstrahlung  
from thick aluminum targets at off-normal incidence  
of bremsstrahlung onto the shield**

$E_0 = 0.5; 1.0; 2.0; 2.8$  MeV

ИЯФ 2009-37

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 17.12. 2009 г.

---

Сдано в набор 18.12. 2009 г.

Подписано в печать 18.12. 2009 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2.0 печ.л., 1.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 37

---

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