

Особенности расчета радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов с энергией выше 10 МэВ

Аннотация

Статья посвящена детальному рассмотрению особенностей расчета комбинированной радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов с энергией тормозного излучения выше 10 МэВ. Значительное внимание уделяется фотоядерным реакциям. Описывается методика расчета радиационной защиты. Анализируются результаты расчета на конкретном примере, и дается сравнение различных типов защиты.

Данная статья посвящена рассмотрению особенностей расчета комбинированной радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов с энергией тормозного излучения выше 10 МэВ. Вопросы правильности расчетов радиационной защиты ускорителей в последнее время становятся актуальными, так как развиваются технологии и расширяется диапазон возможных режимов лечения онкологических больных. Все чаще используются высокоэнергетические ускорители в отделениях лучевой терапии (ОЛТ). При этом размещение ускорителей в ОЛТ не является тривиальной задачей. На практике встречаются случаи, когда площадь, выделяемая под процедурную ускорителя, ограничена и, следовательно, имеется ограничение по возможной толщине радиационной защиты. То есть спроектировать защиту только из обычного бетона не представляется возможным, приходится комбинировать тяжелые и легкие материалы (сталь, свинец, бетон, полиэтилен и т. д.). При использовании комбинированной защиты для ускорителей с энергией выше 10 МэВ в тяжелых элементах конструкций возникают фотонейтроны, которые необходимо учитывать. Использование методики расчета радиационной защиты рентгеновского излучения ошибочно, т. е. термин «свинцовый эквивалент защиты» обозначает защиту только от тормозного излучения и фотонейтроны при этом не учитываются. Далее в статье будут рассмотрены различные варианты конструкций радиационной защиты и методика учета фотонейтронов.

Любой расчет радиационной защиты начинается с грамотного составления технического задания (ТЗ). Все медицинские линейные ускорители электронов работают в импульсном режиме, и в ТЗ необходимо прописывать максимальное время работы ускорителя за год, или коэффициент использования $K_{исп}$. Так как на данный момент основополагающим документом является НРБ-99/2009 [1], в котором указаны годовые пределы доз (ГПД, мЗв/год), то и при расчете радиационной защиты необходимо ориентироваться на годовую дозу, а не на дозу в импульсе. Проведение дозиметрического контроля – это отдельный вопрос, и в данной статье он рассматриваться не будет. Кроме коэффициента использования, в ТЗ должна содержаться следующая информация: назначение смежных помещений, технические характеристики ускорителя, режимы работы ускорителя, недельная рабочая нагрузка.

При расчете радиационной защиты стен процедурной медицинского линейного ускорителя электронов ($E > 10$ МэВ) учитываются следующие факторы радиационной опасности:

- прямой пучок тормозного излучения;
- утечка тормозного излучения из головки ускорителя;
- фотонейтроны головки ускорителя;

- фотонейтроны тяжелых элементов ограждающих конструкций.

Рассеяние излучения на пациенте и на ограждающих элементах конструкций при расчете толщины стен и перекрытий процедурной ускорителя не учитывается, так как энергия рассеянного излучения меньше энергии прямого пучка излучения или излучения утечки, и интенсивность рассеянного излучения ниже интенсивности прямого пучка. Рассеянное излучение следует учитывать при расчете лабиринта ускорителя и радиационно-защитных дверей.

Так как статья посвящена рассмотрению особенностей комбинированной защиты, которая применяется в прямом пучке излучения, далее будет рассматриваться часть радиационной защиты процедурной ускорителя, находящаяся под прямым пучком излучения.

Методика расчета радиационной защиты основывается на определении требуемой кратности ослабления:

$$K_i = \frac{2 \cdot n \cdot T \cdot P}{\text{ГПД}}, \quad (1)$$

где K_i – требуемая кратность ослабления тормозного излучения, или фотонейтронов, отн. ед.; 2 – коэффициент запаса; n – коэффициент сменности, определяется для помещения, в котором находится расчетная точка, отн. ед. (см. табл. 1, приложение 1 [2]); T – максимальная доля времени, проводимого людьми в данном помещении, отн. ед. (см. табл. 1, приложение 1 [2]); P – мощность дозы тормозного излучения, или фотонейтронов, в расчетной точке, мЗв/год; ГПД – годовой предел доз по НРБ-99/2009, мЗв/год.

После расчета требуемой кратности ослабления определяется толщина радиационной защиты. Для тормозного излучения толщина определяется по табл. 3-4, приложение 1 [2], для нейтронов – рассчитывается по формуле

$$d = L \cdot \ln(K), \quad (2)$$

где L – длина релаксации быстрых нейтронов.

При расчете геометрического ослабления тормозного излучения и фотонейтронов головки ускорителя используется приближение точечного изотропного источника.

Мощность дозы прямого пучка тормозного излучения рассчитывается по формуле

$$P_{пр.γ} = \frac{10^3 \cdot W \cdot 50 \cdot 1 \cdot 0,25}{(R+1)^2}, \quad \left[\frac{\text{мЗв}}{\text{год}} \right] \quad (3)$$

где W – рабочая нагрузка в изоцентре, обычно изоцентр находится на расстоянии 1 м от мишени ускорителя, Гр · м²/нед. (определяется в ТЗ); 50 – стандартное количество рабочих недель в году; 1 – коэффициент качества

тормозного излучения, Зв/Гр; 0,25 – коэффициент направленности прямого пучка излучения; R – расстояние от изоцентра до расчетной точки, м.

Мощность дозы фотонейтронов головки ускорителя рассчитывается по формуле

$$P_1^n = \frac{10^3 \cdot W \cdot 50 \cdot c}{R^2}, \left[\frac{\text{МЗВ}}{\text{год}} \right] \quad (4)$$

где c – отношение мощности эквивалентной дозы фотонейтронов головки ускорителя к мощности дозы тормозного излучения в изоцентре (указывается в технической документации на ускоритель).

Выход фотонейтронов из облучаемого материала зависит от сечения фотоядерных (γ, n) реакций. Сечение фотоядерной реакции зависит от атомного номера вещества (Z) и от энергии (E) тормозного излучения. Зависимость выхода фотонейтронов от атомного номера облучаемого материала представлена на рис. 1, зависи-

мость от энергии тормозного излучения представлена на рис. 2, 3.

При расчете мощности дозы фотонейтронов тяжелых элементов ограждающих конструкций используются следующие допущения, которые не ухудшают качество радиационной защиты:

- тяжелый элемент конструкции представляет собой прямоугольную плиту из свинца или стали, расположенную под прямым углом к пучку тормозного излучения;
- изменение спектра тормозного излучения при прохождении защитной плиты не учитывается;
- самопоглощение фотонейтронов в тяжелых элементах ограждающих конструкций не учитывается;
- для расчетов геометрического ослабления фотонейтронов защитной плиты используется приближение поверхностного прямоугольного изотропного источника.

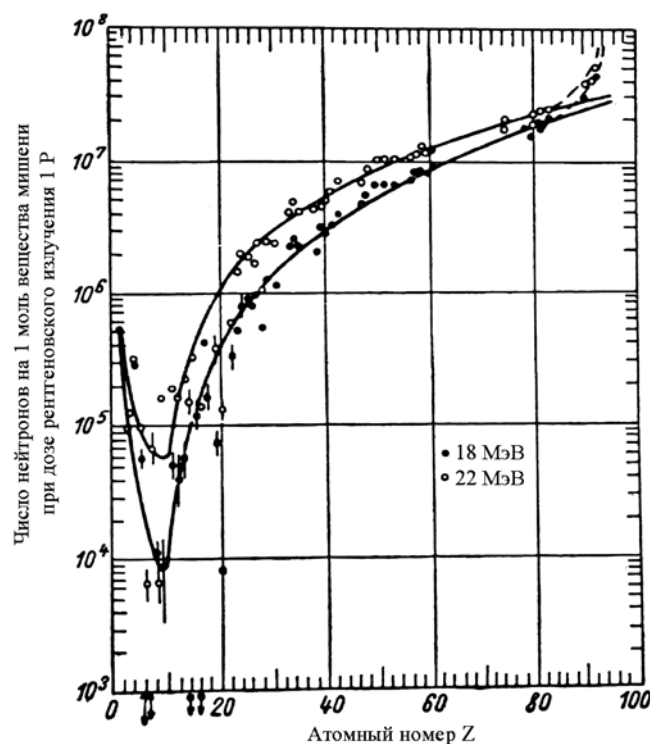


Рис. 1. Выход фотонейтронов на 1 моль вещества мишени при дозе рентгеновского излучения 1 Р в зависимости от атомного номера облучаемого материала [3]

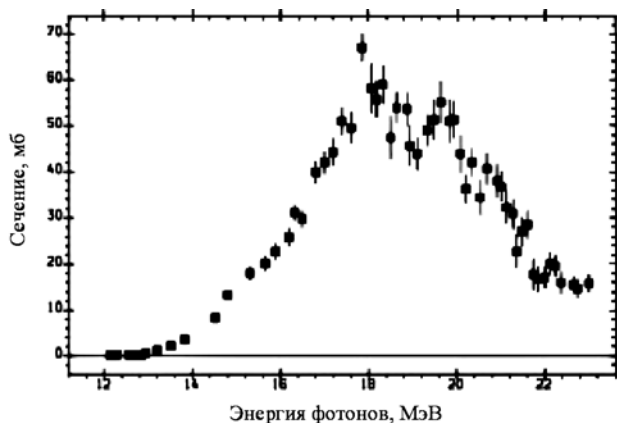


Рис. 2. Сечение реакции (γ, n), при облучении ядер железа Fe^{26} [4]

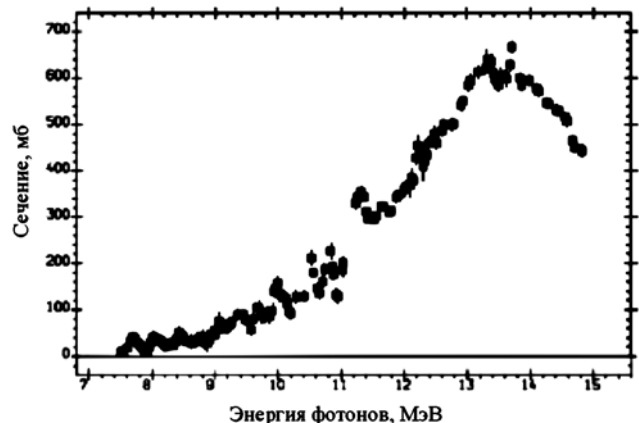


Рис. 3. Сечение реакции (γ, n), при облучении ядер свинца Pb^{82} [4]

Мощность дозы фотонейтронов, возникающих при взаимодействии высокоэнергетического тормозного излучения с тяжелыми элементами ограждающих конструкций, рассчитывается по формуле

$$P_2^n = \frac{W \cdot 50 \cdot 0,25}{(R' + 1)^2} \cdot N \cdot \beta \cdot F, \quad (5)$$

где R' – расстояние от изоцентра до тяжелых элементов ограждающих конструкций, м; N – число нейтронов, образующихся в тяжелых элементах ограждающих конструкций, нейтрон/Гр; β – максимальная эффективная доза для единичного флюенса нейтронов, Зв · м²/нейтрон (см. [1], табл. 8.8); F – функция геометрического ослабления мощности дозы.

В практике расчета радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов чаще всего встречается прямоугольная форма пучка, при этом функция геометрического ослабления фотонейтронов тяжелых элементов ограждающих конструкций рассчитывается для прямоугольного поверхностного изотропного источника по формуле, приведенной в [5, с. 131]:

$$F_2 = \Phi\left(\frac{a}{l_1}, \frac{h_1}{l_1}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_1}, \frac{h_2}{l_1}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_2}, \frac{h_2}{l_2}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_2}, \frac{h_1}{l_2}\right).$$

Функция $\Phi(a/l, h/l)$ приведена в [6, с. 140]. Для расчетов используется частный случай, когда $L_1 = L_2 = L/2$; $h_1 = h_2 = h/2$.

Для иллюстрации вышеизложенных формул приведем пример расчета радиационной защиты. В расчете будут показаны варианты использования различных материалов для защиты: бетон плотностью 2,3 г/см³; бетон и железо; бетон и свинец. Исходные данные для расчета:

- максимальная энергия тормозного излучения $E_{\text{макс}} = 15$ МэВ [9];
- рабочая недельная нагрузка в изоцентре (на 1 м от мишени ускорителя) $W = 1000$ Гр · м²/нед.;
- расстояние от изоцентра до точки расчета $R_1 = 4,5$ м;
- в смежном помещении находятся постоянные рабочие места персонала группы «А» ($n = 1$; $T = 1$);
- отношение мощности эквивалентной дозы фотонейтронов головки ускорителя к мощности дозы тормозного излучения в изоцентре составляет $c = 0,002$ (0,2%) [7];
- число нейтронов, образующихся в свинце $N_{\text{Pb}} = 3,4 \cdot 10^{11}$ нейтрон/Гр, в железе $N_{\text{Fe}} = 3,4 \cdot 10^{10}$ нейтрон/Гр;
- максимальная эффективная доза для единичного флюенса нейтронов $\beta = 3,1 \cdot 10^{-11}$ мЗв · м²/нейтрон [1];
- длина релаксации быстрых нейтронов в бетоне плотностью 2,3 г/см³ равняется $L_{\text{бет}} = 16$ см [2];
- максимальный размер поля облучения в плоскости изоцентра 40 x 40 см [8].

Эффективная энергия тормозного спектра равняется $E_{\text{эф}} = 5$ МэВ [2]. Мощность дозы тормозного излучения в расчетной точке по формуле (3) составит $P_{\text{пр.}\gamma} = 4,1 \cdot 10^5$ мЗв/год. Требуемая кратность ослабления тормозного излучения по формуле (1) составит $K_\gamma = 4,1 \cdot 10^4$.

Толщина радиационной защиты из бетона плотностью 2,3 г/см³ равняется $D_{2,3\gamma} = 188,2$ см. Толщина радиационной защиты из железа плотностью 7,86 г/см³ равняется $D_{\text{Fe}\gamma} = 50,3$ см. Толщина радиационной защиты из свинца плотностью 11,34 г/см³ равняется $D_{\text{Pb}\gamma} = 25,6$ см.

Предполагаем, что в качестве радиационной защиты используется только стальная или свинцовая плита. Рассчитаем мощность дозы фотонейтронов по

формуле (5). При использовании железного экрана $P_2^n(\text{Fe}) = 39,19$ мЗв/год. При использовании свинцового экрана $P_2^n(\text{Pb}) = 391,99$ мЗв/год.

Мощность дозы фотонейтронов головки ускорителя в расчетной точке по формуле (4) равняется $P_1^n = 4,9 \cdot 10^3$ мЗв/год.

Суммарная мощность дозы фотонейтронов в расчетной точке составит: при железном экране $P_{1+2}^n = 4,9 \cdot 10^3$ мЗв/год; при свинцовом экране $P_{1+2}^n = 5,3 \cdot 10^3$ мЗв/год. Требуемая кратность ослабления: при железном экране $K_n = 4,9 \cdot 10^2$; при свинцовом экране $K_n = 5,3 \cdot 10^2$. Толщина радиационной защиты из бетона плотностью 2,3 г/см³ по формуле (2) равняется: при железном экране $D_{2,3n} = 99,2$ см; при свинцовом экране $D_{2,3n} = 100,4$ см.

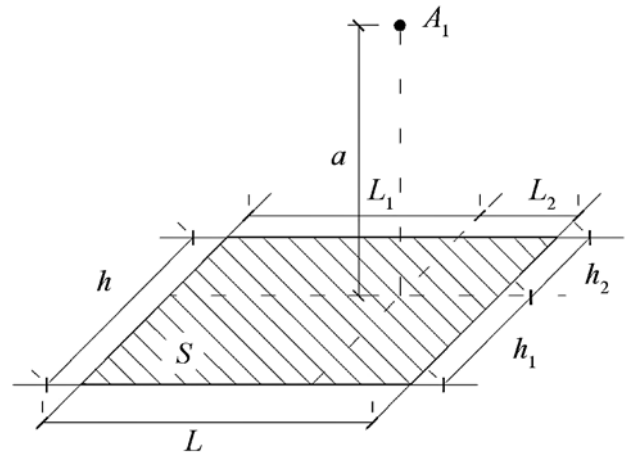


Рис. 4. Схема расчета функции геометрического ослабления для прямоугольного поверхностного источника

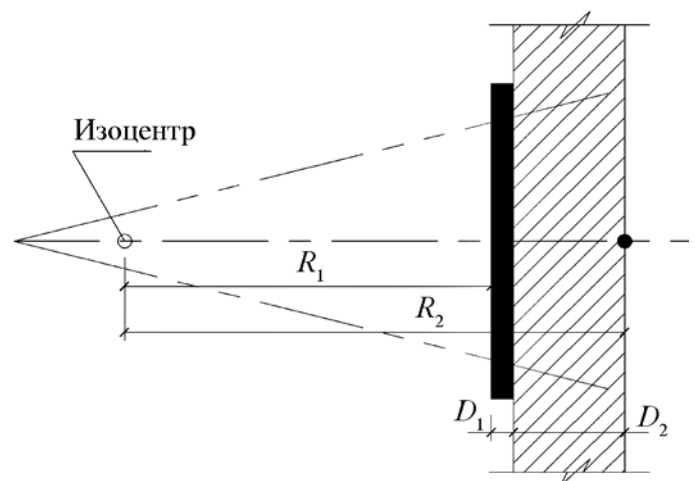


Рис. 5. Геометрия расчета радиационной защиты

По табл. 3-5, приложение 1, [2], 100 см бетона эквивалентны 26,9 см железа или 13,1 см свинца. Получаем итоговую толщину радиационной защиты не менее:

- при использовании свинцового экрана (12,5 см свинца + 100 см бетона);
- при использовании железного экрана (23,4 см железа + 100 см бетона).

Радиационная защита должна проектироваться так, чтобы суммарная мощность дозы всех видов излучения не превышала годового предела доз. Поэтому полученную итоговую толщину радиационной защиты следует дополнительно проверить, т. е. рассчитать суммарную мощность дозы тормозного излучения и фотонейтронов за защитой при принятой толщине.

Мощность дозы тормозного излучения за защитой

$$P_{\gamma} = P_{\text{пр.}\gamma} \cdot e^{-\mu_1 \cdot d_1} \cdot e^{-\mu_2 \cdot d_2} B(\mu d), \quad (6)$$

где μ_1, μ_2 – линейные коэффициенты ослабления для бетона и для железа/свинца соответственно [5], см^{-1} ; d_1, d_2 – толщина бетона и железа/свинца соответственно, см; $B(\mu d)$ – фактор накопления гетерогенной среды [5], отн. ед.

Мощность дозы фотонейтронов за защитой

$$P_{\text{н}} = (P_1^{\text{н}} + P_2^{\text{н}}) \cdot e^{-d/L}, \quad (7)$$

где d – толщина бетона, см; L – длина релаксации быстрых нейтронов в бетоне, см.

При использовании железного экрана: мощность дозы тормозного излучения за защитой по формуле (6) $P_{\gamma} = 14,65$ мЗв/год; мощность дозы фотонейтронов за защитой по формуле (7) $P_{\text{н}} = 9,80$ мЗв/год; суммарная мощность дозы $P_{\gamma+\text{н}} = 24,45$ мЗв/год. Видно, что суммарная мощность дозы за защитой превышает годовой предел для персонала группы «А» (20 мЗв/год). Поэтому в качестве итоговой толщины радиационной защиты принимается толщина комбинированной защиты не менее (25 см железа + 100 см бетона).

При использовании свинцового экрана: мощность дозы тормозного излучения за защитой по формуле (6) $P_{\gamma} = 11,19$ мЗв/год; мощность дозы фотонейтронов за защитой по формуле (7) $P_{\text{н}} = 10,67$ мЗв/год; суммарная мощность дозы $P_{\gamma+\text{н}} = 21,86$ мЗв/год. Видно, что суммарная мощность дозы за защитой превышает годовой предел для персонала группы «А» (20 мЗв/год). Поэтому в качестве итоговой толщины радиационной защиты принимается толщина комбинированной защиты не менее (14 см свинца + 100 см бетона).

В табл. 1 представлено сравнение значений толщины радиационной защиты при использовании различных материалов (типов радиационной защиты).

Таблица 1

Сравнение различных типов радиационной защиты

Источник ионизирующего излучения	Радиационная защита из бетона плотностью 2,3 г/см ³	Радиационная защита из бетона плотностью 2,3 г/см ³ и свинца плотностью 11,34 г/см ³	Радиационная защита из бетона плотностью 2,3 г/см ³ и железа плотностью 7,86 г/см ³
Линейный медицинский ускоритель электронов с максимальной энергией тормозного излучения 15 МэВ, прямой пучок излучения	Не менее 190 см бетона	Не менее 14 см свинца + 100 см бетона	Не менее 25 см железа + 100 см бетона

Выводы

1. При расчете радиационной защиты медицинских линейных ускорителей электронов с энергией выше 10 МэВ необходимо учитывать фотоядерные реакции на тяжелых элементах головки ускорителя и элементов ограждающих конструкций.

2. Использование комбинированной радиационной защиты оправдывается в том случае, когда существует ограничение по выделяемым площадям под процедурную ускорителя.

3. Использование комбинированной радиационной защиты в прямом пучке излучения позволяет сокращать общую толщину защиты до 40 %.

4. Использование свинца вместо железа при энергиях ускорителей более 10 МэВ не дает значимого выигрыша по общей толщине радиационной защиты, поэтому выбор материала обусловлен экономическими характеристиками и сложностью строительных работ.

Список литературы:

1. Санитарные правила и нормативы от 7 июля 2009 г. № 47, СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
2. Санитарные правила и нормативы от 18 января 2010 г. № 3, СанПиН 2.6.1.2573-10 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ.
3. *Езер Р.* Дозиметрия и защита от излучений / Пер. с немецкого Ю.И. Брегадзе, В.А. Квасова. Под ред. Б.М. Исаева. – М.: Госатомиздат, 1961. 207 с.
4. *Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E.* Atlas of Giant Dipole Resonances. Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections. – Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 1999. 311 p.
5. *Машкович В.П., Кудрявцева А.В.* Защита от ионизирующих излучений / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
6. *Золотухин В.Г., Климанов В.А., Лейпунский О.И. и др.* Прохождение излучений через неоднородности в защите / Под ред. О.И. Лейпунского, В.П. Машковича. – М.: Атомиздат, 1968. 310 с.
7. Clinac 2100C/D, 2300C/D, 21EX, iX, Novalis Tx, Trilogy & Silhouette Edition Radiation Leakage Data. – Varian Medical Systems. 12 p.
8. Настольный справочник проектировщика // Версия Novalis TX. Том 11. № 4. – Varian Medical Systems, 2011. 192 с.

Лев Владимирович Владимиров,
д-р техн. наук, профессор,
руководитель научно-исследовательского сектора,
кафедра радиационной гигиены,
Российская медицинская академия
последипломного образования МЗ России,
Алексей Алексеевич Белогрудов,
инженер-физик,
ООО «Канон»,
г. Москва,
e-mail: radgig@rmapo.ru