

## ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарные правила и нормы 2.6.12-34-2006 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ».
2. Защита от ионизирующих излучений: справочник. / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – 5-е изд. – М.: АП «Столица», 2013. – 496 с.
3. *Shultis, J. K. Radiation Shielding / J. K. Shultis, R. E. Faw – American Nuclear Society, 2000. – 386 p.*

### **ОБЗОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОМЕЩЕНИЯ С ЛИНЕЙНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ, ОСНОВАННОЙ НА NCRP REPORT № 151**

### **REVIEW OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE STATIONARY RADIATION PROTECTION OF THE ROOM WITH A LINEAR ACCELERATOR, BASED ON NCRP REPORT No. 151**

***Е. В. Кемеш<sup>1</sup>, Е. В. Преображенская<sup>2</sup>, М. Н. Петкевич<sup>1, 2</sup>***  
***E. Kemesh<sup>1</sup>, E. Preobrazhenskaya<sup>2</sup>, M. Piatkevich<sup>1, 2</sup>***

*<sup>1</sup>Белорусский Государственный Университет, МГЭИ БГУ  
Минск, Республика Беларусь  
kemesh.jenya@gmail.com*

*<sup>2</sup>Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии  
им. Н.Н. Александрова, Минский район, Республика Беларусь  
preobrazhenskaya\_e@inbox.ru*

*<sup>1</sup>Belarusian State University, ISEI BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

*<sup>2</sup>State Institution «N. N. Alexandrov National  
Cancer Centre of Belarus», Minsk region, Republic of Belarus*

Рассматриваемая методика расчета стационарной радиационной защиты написана в соответствии с NCRP REPORT № 151 «Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities» [1]. В работе представлены частичные выкладки анализируемой методики. Проводится описание используемого подхода, консервативных предположений, основных коэффициентов и расчетных величин. Также проведен анализ ключевых моментов рекомендаций NCRP № 151.

The considered methodology for calculating stationary radiation protection is written in accordance with NCRP REPORT No. 151 “Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities” [1]. The work presents partial calculations of the analyzed technique. A description of the approach used, conservative assumptions, basic coefficients and calculated values is given. It also analyzed the key points of NCRP Recommendations No. 151.

*Ключевые слова:* радиационная безопасность, радиационный контроль, расчет защиты, мощность дозы, линейный ускоритель.

*Keywords:* radiation safety, radiation control, calculation of protection, dose rate, linear accelerator.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-269-272>

NCRP № 151 написана на нескольких консервативных предположениях, направленных на создание экономически обоснованной защиты от воздействия ионизирующего излучения. В работе под словами консервативный подход подразумевается сознательное завышение определенных параметров с целью снизить дозовые нагрузки на персонал и население. Ниже приведены примеры консервативных предположений:

- не учитывает ослабление пучка фотонов пациентом (30%);
- предполагается, что луч проходит кратчайший путь через барьер (т.е. луч падает нормально к плоскости барьера);
- предполагается, что утечка через головку линейного ускорителя является максимально допустимой согласно ИЕС (0,1%);
- факторы занятости консервативно высоки;
- необычным процедурам присваивается множительный коэффициент безопасности;
- правило двух источников.

Для расчета защиты используется ряд коэффициентов и расчетных величин:

а) Рабочая нагрузка ( $W$ ). Определяется как поглощенная доза от фотонов в изоцентре на расстоянии 1 м от источника за период в одну неделю с усреднением за год.

Следует определять рабочую нагрузку для каждой энергии ускорителя. Один из вариантов – найти данные о рабочей нагрузке в соответствующей клинике или в близлежащих клиниках с аналогичными группами пациентов. Если реальных данных нет, можно использовать предложения NCRP:

- NCRP 49 предлагает 1000 Гр в неделю для низкоэнергетических ускорителей (до 10 МэВ);

- NCRP 51 предлагает 500 Гр в неделю для ускорителей высоких энергий (выше 10 МэВ).

б) Коэффициент использования ( $U$ ) – это часть рабочей нагрузки, при которой лечебный луч направлен на данный первичный барьер.

в) Коэффициент занятости ( $T$ ) – это усреднённая величина временного периода, в течение которого человек, подвергшийся максимальному облучению, находится в расчётной точке при непосредственной работе аппарата лучевой терапии.

г) Целевая мощность эквивалентной дозы фотонного излучения за защитой ( $P$ ) – максимально допустимые уровни эквивалента дозы для данного местоположения (таблица 1).

Таблица 1 – Целевые мощности эквивалентной дозы фотонного излучения за защитой [1]

Площадь	Эквивалент дозы
Контролируемые области	$P < 5$ мЗв / год $P < 0,1$ мЗв / неделя
Неконтролируемые области	$P < 1$ мЗв / год $P < 0,02$ мЗв / неделя $R_h < 0,02$ мЗв / час (требование NRC)

д) Коэффициент пропускания ( $B$ ) – это максимально допустимое пропускание излучения, которое позволяет барьеру достичь целевой мощности эквивалентной дозы фотонного излучения за защитой ( $P$ ).

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ ПРЯМОГО ПУЧКА ФОТОНОВ

Коэффициент пропускания от прямого пучка фотонов рассчитывается по формуле (1):

$$B_{pri} = \frac{Pd^2_{pri}}{WUT}, \quad (12)$$

где  $P$  – целевая мощность эквивалентной дозы фотонного излучения за защитой;

$d_{pri}$  – расстояние от коллиматора линейного ускорителя, до расчётной точки (рисунок 1а).

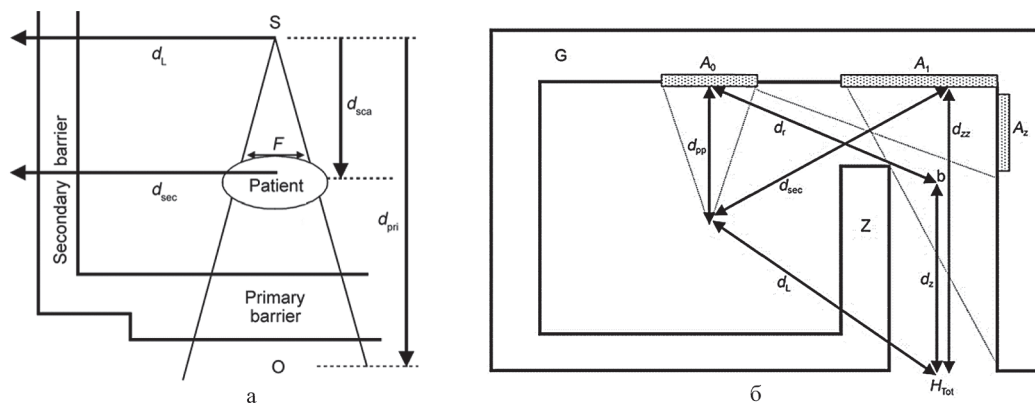


Рис. 1 – а) План помещения с указанием используемых расстояний, используемых для расчета первичной защиты;

б) Общий план помещения для определения параметров, используемых при расчете рассеянного излучения

Количество слоев половинного ослабления ( $n$ ) излучения определяется по формуле (2):

$$n = -\log_{10}B, \quad (2)$$

Минимальная толщина барьера определяется по формуле (3):

$$d_{барьера} = TVL_1 + (n - 1)TVL_e, \quad (3)$$

где  $TVL_1$  – это первый слой десятикратного ослабления;

$TVL_e$  – равновесный слой десятикратного ослабления (таблица В.2 [1, с. 161]).

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Для высокоэнергетических линейных ускорителей необходимо учитывать производство фотонейтронов в головке линейного ускорителя, фиксирующем оборудовании и первичных барьерах.

Первичные барьеры обычно включают в себя слой стали или свинца, заключенный в бетон для экономии места.

Полный эквивалент дозы  $H_{tot}$ , прошедший через первичный барьер, представляет собой сумму эквивалентов нейтронной и фотонной дозы.

$$H_{tot} = H_n + H_{phn}, \quad (4)$$

где  $H_n$  – эквивалент дозы нейтронов в неделю (мкЗв / неделя);

$H_{phn}$  – эквивалент фотонной дозы (мкЗв / неделя).

а) Эквивалент дозы нейтронов.

Следующая эмпирическая формула (5) используется для расчета эквивалента нейтронной дозы для линейных ускорителей.

$$H_n = \frac{D_0 R F_{\max}}{\frac{t_m}{2} + t_2 + 0,3} \left[ 10^{-\frac{t_1}{TVL_x}} \right] \left[ 10^{-\frac{t_2}{TVL_n}} \right], \quad (5)$$

где  $H_n$  – эквивалент дозы нейтронов в неделю (мкЗв / неделя);

$D_0$  – поглощенная доза рентгеновского излучения в неделю в изоцентре, сГр/неделя;

$R$  – коэффициент образования нейтронов ( $\frac{\text{мкЗв}}{\text{сГр} \cdot \text{м}^2}$ );

$F_{\max}$  – максимальная площадь поля в изоцентре ( $\text{м}^2$ );

$t_m$  – толщина металлической плиты (м);

$t_1$  – толщина первой бетонной плиты (м);

$t_2$  – толщина второй бетонной плиты (м);

$TVL_x$  – слой десятикратного ослабления в бетоне для рентгеновского луча (м);

$TVL_n$  – слой десятикратного ослабления в бетоне для нейтронов (м).

б) Гамма-эквивалент нейтронного захвата.

Для пучков фотонов 15 и 18 МВ было показано, что следующее уравнение дает консервативно безопасную оценку полного эквивалента дозы фотона (рентгеновское излучение плюс гамма захват нейтронов).

$$H_{phn} = 2,7 H_{tr}, \quad (6)$$

где  $H_{phn}$  – эквивалент фотонной дозы (мкЗв / неделя).

Если известно  $B_{pri}$ ,  $H_{tr}$  может быть вычислено с использованием (7):

$$H_{tr} = \frac{B_{pri} d_{pri}^2}{WUT}, \quad (7)$$

где  $H_{tr}$  – эквивалент дозы рентгеновского излучения.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ РАССЕЯННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Вторичные барьеры должны защищать как от фотонов, рассеянных от пациента, так и фотоны утечки из головки линейного ускорителя. Поскольку интенсивность и спектр каждого из этих компонентов будут существенно различаться в зависимости от типа лечения, они обрабатываются отдельно.

Коэффициент передачи  $B$  от рассеяния пациента рассчитывается по формуле (8):

$$B_{ps} = \frac{P d_{sca}^2 d_{sec}^2 400}{aWT F}, \quad (8)$$

где  $P$  – допустимая доза за период времени (год);

$a$  – доля рассеяния; функция в основном от угла рассеяния (таблица В.4 [7, с. 163]);

$F$  – площадь поля в точке рассеяния, находящейся в пациенте на расстоянии в 1 м от источника ( $\text{см}^2$ ).

Коэффициент передачи  $B$  для защиты от утечек определяем по формуле (9):

$$B_L = \frac{P d_L^2}{LW_L T}, \quad (9)$$

где  $P$  – допустимая доза за период времени (год);

$d_L$  – расстояние от головки машины до точки интереса;

$W_L$  – (рабочая нагрузка для расчета утечки) рабочая нагрузка в терминах дозы в изоцентре в период времени, увеличенный на IMRT и / или фактор VMAT

$L$  – коэффициент утечки (обычно равен  $10^{-3}$ ).

Правило двух источников рассматривает компоненты рассеяния и утечки вторичного излучения пациента как отдельные источники. В таком случае:

- если коэффициенты рассеяния пациента и передачи утечки приблизительно равны, то толщину экранирования можно принять как большую из двух толщин барьера плюс 1 слой половинного ослабления;

- если толщина каждого источника отличается на 1 слой десятикратного ослабления или более, то можно использовать большую из рассчитанных величин толщины барьера. Это также может быть применено к разным энергиям пучка.

В большинстве ускорителей высоких энергий вторичный барьер, который должным образом спроектирован для компонента утечки излучения, будет более чем достаточным для рассеянного излучения, за возможным исключением зон, прилегающих к первичному барьеру, перекрываемых малоугловым рассеянием [1].

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ В ЛАБИРИНТАХ

Рассмотрим только низкоэнергетические ускорители.

Лабиринт, подобный показанному на рисунке 1б, обычно используется для снижения уровня радиации на входе в комнату ускорителя, поэтому массивная дверь не требуется.

Тем не менее, если лабиринт не очень длинный или не имеет нескольких ножек, необходимо оценить степень защиты или защиты. В методе, описанном здесь, эквивалент дозы в положении двери лабиринта оценивается сначала для случая, когда луч направлен перпендикулярно стене G на рисунке 1 б. Затем используется простое эмпирическое уравнение, которое связывает эквивалент дозы, определенный на первом этапе, с полным эквивалентом дозы на дверце лабиринта, создаваемым лучами, направленными в основных направлениях луча (вверх, вниз, влево и вправо) у двери лабиринта. Наконец, оценивается толщина защитного материала, необходимая для уменьшения дозы, эквивалентной цели конструкции защиты (или меньше).

Излучение, достигающее двери лабиринта, происходит из-за рассеяния фотонов от поверхностей комнаты и пациента, а также прямого проникновения излучения, проникающего через головку ускорителя и через внутреннюю стену Z лабиринта. Эти компоненты представлены следующими обозначениями:

-  $H_S$  – эквивалент дозы в неделю из-за рассеяния первичного луча от поверхностей комнаты;

-  $H_{LS}$  – эквивалент дозы в неделю из-за фотонов утечки в головки ускорителя, рассеянных поверхностями комнаты;

-  $H_{ps}$  – эквивалент дозы в неделю из-за рассеяния первичного луча от пациента;

-  $H_{LT}$  – эквивалент дозы в неделю из-за утечки излучения, которое передается через внутреннюю стену лабиринта.

$$H_{Tot} = 2,64 \cdot (f H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}), \quad (10)$$

Следует обратить внимание на то, что рабочая нагрузка с лучом, направленным на стену G (то есть  $W$ ,  $U_G$ ), используется для расчета  $H_G$ , и доля первичного луча, прошедшего через пациента, представлена в уравнении буквой  $f$ . Например,  $f$  имеет значение  $\sim 0,25$  для фотонов от 6 до 10 МВ, когда размер поля составляет  $(40 \times 40)$  см<sup>2</sup> и используется фантом  $(40 \times 40 \times 40)$  см<sup>3</sup>[1].

Для примера рассмотрим только первый компонент уравнения 10, а именно  $H_S$ .

$$H_S = \frac{W U_G \alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{(d_h d_r d_z)^2}, \quad (11)$$

где  $H_S$  – эквивалент дозы в неделю у двери лабиринта из-за рассеяния первичного луча от стены G;

$U_G$  – коэффициент использования стены G;

$\alpha_0$  – коэффициент отражения на первой рассеивающей поверхности  $A_0$ ;

$A_0$  – площадь луча на первой рассеивающей поверхности (м<sup>2</sup>);

$\alpha_z$  – коэффициент отражения для второго отражения от поверхности лабиринта  $A_z$ ;

$A_z$  – площадь поперечного сечения внутреннего входа в лабиринт, спроецированного на стену лабиринта с точки зрения облученного первичного барьера  $A_0$  (м<sup>2</sup>);

$d_h$  – равно  $d_{pp}$  плюс 1 м (рисунок 1б) (м).

Значения коэффициентов  $\alpha$  приведены в таблицах с В.8а по В.8f (Приложение В [1, с.160]).

Из описанных выше методик международного подхода, можно сделать вывод о структурированном подходе к расчету радиационной защиты. Представленный план помещения, является типовым для использования линейных медицинских ускорителей электронов. За счет унификации архитектурного плана, и, соответственно, полученной статистики за счет введения большого числа кабинетов лучевой терапии, данный подход имеет ряд значительных плюсов. К их числу можно отнести:

- скорость и простоту расчета радиационной защиты кабинета лучевой терапии;
- соответствие между планируемыми и измеряемыми дозиметрическими величинами;
- баланс между консервативным подходом в оценке радиационной защиты и реальным использованием линейным ускорителем.

Для дальнейшего анализа обзораемой методики необходим расчет радиационной защиты на базе существующего кабинета лучевой терапии и сравнение полученных результатов с используемой методикой расчета радиационной защиты, применяемой при проектировании анализируемого помещения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities / NCRP №151. – 2005. – 257 p.