

и тканях диких животных и тем, что по причине малой растворимости трансураниевые элементы плохо усваиваются в организме человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охота/ [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://zapovednik.by/oxota>. – Дата доступа: 14.03.2021.
2. Критерии оценки радиационного воздействия / [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: https://radbez.bsmu.by/library/GN_2012.pdf. – Дата доступа: 14.03.2021.
3. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки / [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293754/4293754569.htm>. – Дата доступа: 13.01.2020.
4. МУ 2.1.10.3014–12 Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах/ [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293784/4293784921.pdf>. – Дата доступа: 13.01.2020.
5. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife. Technical Reports Series No. 479 International Atomic Energy Agency. Vienna, 2014. – 217 p.

ОБЗОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

REVIEW OF THE METHOD FOR CALCULATING RADIATION PROTECTION FOR MODERN ELECTRON ACCELERATORS

Е. В. Кемеш¹, М. Н. Петкевич^{1,2}, Е. В. Преображенская²
E. Kemesh¹, M. Piatkevich^{1,2}, E. Preobrazhenskaya²

¹*Белорусский Государственный Университет, МГЭИ им. А.Д.Сахарова БГУ
Минск, Республика Беларусь
kemesh.jenya@gmail.com*

²*Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии
им. Н.Н. Александрова, Минский район, Республика Беларусь
preobrazhenskaya_e@inbox.ru*

¹*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

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

В представленной работе обзревается методика расчета стационарной радиационной защиты, применяемая в Республике Беларусь. Описывается расчет стационарной радиационной защиты от прямого и рассеянного фотонного излучения, а также при необходимости от прямого и рассеянного нейтронного излучения. Методика написана в соответствии с СанПиН 2.6.12-34-2006.

The presented work reviews the methodology for calculating stationary radiation protection used in the Republic of Belarus. The calculation of stationary radiation protection from direct and scattered photon radiation, as well as, if necessary, from direct and scattered neutron radiation is described. The methodology is written in accordance with the Sanitary Rules and Regulations 2.6.12-34-2006.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиационный контроль, мощность дозы.

Keywords: radiation safety, radiation control, dose rate.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-266-269>

Современные линейные ускорители электронов используются для проведения лучевой терапии с целью уничтожения злокачественных новообразований. Лучевая терапия основана на взаимодействии ионизирующего излучения (ИИ) с веществом. Поскольку не вся отпущенная доза поглощается опухолью, необходимо минимизировать действие ИИ на других пациентов и персонал.

Стационарные средства радиационной защиты помещения (стены, пол, потолок, защитные двери и др.), в котором установлен источник ионизирующего излучения, должны обеспечивать ослабление ионизирующего излучения в каждом из этих помещений до уровня, при котором не будет превышен основной предел дозы для

соответствующих категорий облучаемых лиц. Чтобы снизить действие ИИ на персонал и население, разрабатываются различные методики расчета толщины защитных конструкций.

Расчет основан на определении кратности ослабления (K) мощности эквивалентной дозы (D) ионизирующего излучения в воздухе в данной точке в отсутствие защиты до значения допустимой проектной мощности эквивалентной дозы ($DMД_{проект}$) в воздухе. Положения источников излучения выбираются такими, чтобы расстояния от них до расчетных точек были минимальными.

Для обеспечения радиационной безопасности при проведении расчетов стационарной радиационной защиты следует руководствоваться информацией, изложенной в нормативных документах Санитарные нормы и правила 2.6.1.13-34-2006 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ» [1].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРЯМОГО ПУЧКА ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Мощность эквивалентной дозы фотонного излучения в расчетной точке без защиты определяется по формуле (1):

$$P_i = P_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_i^2}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность эквивалентной дозы фотонного излучения на расстоянии R_0 от мишени ускорителя (мкЗв/ч);

R_0 – расстояние от источника до расчетной точки равно 1 м;

R_i – расстояние от источника излучения (мишени) до точки расчета (м).

Необходимая кратность ослабления мощности дозы фотонного излучения определяется соотношением:

$$K_i = \frac{P_i}{DMД_{проект}}, \quad (2)$$

где $DMД_{проект}$ – допустимое проектное значение мощности эквивалентной дозы в расчетной точке (мкЗв/ч).

Необходимая толщина защиты определяется по таблицам 5.41 и 5.43 работы [2, с. 266-267, с. 270-271] для эффективной энергии фотонного излучения в зависимости от требуемой кратности ослабления и материала защиты.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ РАССЕЯННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Мощность эквивалентной дозы рассеянного фотонного излучения ($P_{расс}$) в расчетной точке определяется по формуле:

$$P_{расс} = \frac{P_0}{R_0^2} \cdot \prod_{i=1}^n \frac{S_i \alpha_{\partial i}(\theta_{0i}, \theta_i, E_i) \cos \theta_{0i}}{R_i^2}, \quad (3)$$

где R_0 – расстояние от источника до первой плоскости отражения (м);

S_i – площадь отражающей поверхности (m^2);

$\alpha_{\partial i}(\theta_{0i}, \theta_i, E_i)$ – дифференциальное дозовое альbedo, определяемое по формуле (1.5);

θ_{0i}, θ_i – угол падения излучения на отражающую поверхность и угол отражения соответственно;

E_i – энергия падающего излучения (МВ);

R_i – расстояние между отражающими поверхностями (м);

n – число отражений.

Для расчетов дифференциальных характеристик альbedo тормозного излучения от полубесконечных отражателей с максимальной погрешностью не более 30% используется формула Хилтона – Хадлстона (two-tern Chilton – Huddleston formula) [3]. Эта формула для дифференциального дозового альbedo точечного мононаправленного источника фотонов с энергией E_0 , падающих по углом θ_0 к поверхности отражателя и детектируемых в направлении, определяемом углами θ и φ , имеет вид:

$$\alpha_{\partial i}(\theta_0, \theta, E_0) = \frac{C(E_0) \cdot 10^{26} \cdot \delta_s(E_0, \theta_s) + C'(E_0)}{1 + \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\partial i}(\theta_{0i}, \theta_i, E_i)$ – дифференциальное дозовое альbedo;

C, C' – коэффициенты для дозового альbedo, зависящие от материала отражателя и E_0 ;

δ_s – дифференциальное сечение комптоновского рассеяния Клейна – Нишины-Тамма для энергии фотонов (cm^2/cp);

E_0 – начальная энергия фотонов;

θ_s – угол однократного отражения фотонов, определяемый из соотношения:

$$\cos \theta_s = \sin \theta_0 \sin \theta \sin \varphi - \cos \theta_0 \cos \theta, \quad (5)$$

Для оценочных расчетов усредненного по азимутальному углу дифференциального дозового альbedo нейтронов ($\alpha_{\partial i}(n)$) с наиболее вероятной энергией 1 МэВ используется формула:

$$\alpha_{\partial i}(n) = 0,13 \cdot (\cos \theta_{0i}) - \frac{1}{3} \cdot \cos \theta_i, \quad (6)$$

В расчетах учитывалось также, что после каждого отражения энергия фотонного излучения уменьшалась. Величина энергии отраженного излучения вычислялась по формуле:

$$E_{\text{отр.}} = E_0 \left[1 + \left(\frac{E_0}{0.511} \right) \cdot (1 - \cos \theta_s) \right], \quad (7)$$

Размеры площадок отражения излучения выбираются исходя из положения источника излучения, положения защитных стен, формы и размеров лабиринта.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

При работе ускорителя электронов с граничной энергией больше 10 МэВ образуются фотонейтроны, возникающие при взаимодействии фотонного излучения с материалами мишени, фильтров, камер и т.д. Выход фотонейтронов (N) из различных мишеней в зависимости от энергии электронов приведен в работе [2].

Доля нейтронов в фотонном пучке линейного ускорителя с максимальной энергией фотонов и их наиболее вероятная энергия определяется согласно спецификации линейного ускорителя либо его технического описания.

Поэтому мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения на расстоянии в 1 м от мишени определяется так:

$$P_{0n} = \delta k_n P_0, \quad (8)$$

где δ – доля нейтронного излучения в фотонном пучке линейного ускорителя с максимальной энергией фотонов относительно мощности поглощенной дозы фотонного излучения;

k_n – коэффициент качества нейтронного излучения, зависящий от энергии нейтронов и служащий для перехода от поглощенной мощности дозы нейтронного излучения к эквивалентной мощности дозы;

P_0 – максимальная мощность поглощенной дозы фотонного излучения на расстоянии 1 м от мишени ускорителя;

По известной мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения на расстоянии 1 м от мишени ускорителя мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения в расчетной точке без защиты (P_{in}) определяется по формуле (9):

$$P_{in} = P_{0n} \cdot \frac{R_0^2}{R_i^2}, \quad (9)$$

где P_{0n} – мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения на расстоянии R_0 от мишени ускорителя (мкЗв/ч);

R_0 – расстояние от источника до расчетной точки равно 1 м;

R_i – расстояние от источника излучения (мишени) до точки расчета (м).

Кратность ослабления мощности дозы нейтронного излучения K_n равна:

$$K_n = P_{in} / \text{ДМД}_{\text{проект}}, \quad (10)$$

где P_{in} – мощность эквивалентной дозы от источника нейтронов в расчетной точке без защиты (мкЗв/час);

ДМДпроект – допустимая проектная мощность эквивалентной дозы в расчетной точке (мкЗв/час).

$$\text{ДМД}_{\text{проект}} = \text{ДМД} / 2, \quad (11)$$

где ДМД – допустимая мощность эквивалентной дозы.

Необходимая толщина защиты определяется по формуле:

$$d = \lambda \cdot \ln K_n, \quad (12)$$

где d – толщина защиты (м);

λ – длина релаксации нейтронов в материале защиты.

Длина релаксации нейтронов в материале защиты определяется по таблицам работы [2] в зависимости от энергии нейтронного излучения в расчетной точке.

Результаты расчета радиационной защиты помещения, в котором находится генерирующий источник ионизирующего излучения для каждого из типов излучения приводятся в табличном виде.

На основании проведенного согласно данной методики расчета стационарной радиационной защиты от ионизирующих излучений линейного ускорителя заказчику предоставляются выводы и комментарии, содержащие рекомендованные варианты усиления радиационной защиты, в случае если это представляется необходимым.

Исходя из выше описываемых уравнений, можно выделить несколько плюсов данной методики:

- универсальность подхода;
- высокий уровень безопасности получаемых результатов.

С целью совершенствования применяемого в Республике Беларусь метода расчета радиационной защиты авторы предлагают произвести сравнительный анализ методик расчёта, используемых в других странах. По полученным результатам разработать экономически обоснованную и безопасную методику расчета защиты помещений лучевой терапии.

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. Кемеш¹, Е. В. Преображенская², М. Н. Петкевич^{1, 2}
E. Kemesh¹, E. Preobrazhenskaya², M. Piatkevich^{1, 2}

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

*²Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии
им. Н.Н. Александрова, Минский район, Республика Беларусь
preobrazhenskaya_e@inbox.ru*

*¹Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus*

*²State 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.