

Радиационная защита линейного ускорителя электронов при наработке радионуклидов

А.В. Мазилев, Г.Д. Пугачев, Д.Г. Пугачев, О.А. Репихов, В.С. Шестакова
 Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина
 М.А. Красноголовец
 Харьковский технический университет радиоэлектроники, Украина

Создание и запуск сильноточного ускорителя электронов для наработки медицинских радионуклидов на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-2000 предъявили более жесткие требования к существующей радиационной защите [1]. Это связано с максимальным конвертированием мощного электронного пучка в фотонный в малой области объема мишени, имеющей высокий атомный номер. Необходимо было создать несколько электронных ускорителей различного назначения, максимально используя для этой цели имеющееся оборудование и существующие радиационные защиты, так как защита составляет значительную часть стоимости ускорительной установки и, следовательно, производимых радионуклидов. Наиболее оптимальным путем создания таких ускорителей было использование существующей радиационной защиты линейного ускорителя электронов с энергией до 2000 МэВ.

Поперечный разрез здания линейного ускорителя и схема расположения точек, для которых проведен расчет и выполнены экспериментальные измерения мощности эквивалентной дозы, показаны на рис. 1. Мощность поглощенной дозы, вызванная тормозным излучением и нейтронами, была вычислена для мишеней из тантала и алюминия согласно нормативным документам и работам [2, 3, 4]. Для определения мощности эквивалентной дозы за бетонной защитой от алюминиевой мишени проводилась интерполяция данных по радиационным потерям для вольфрама при $E_0 = 10$ и 30 МэВ. Толщина танталовой мишени в расчетах и эксперименте составляла 2 мм. Толщина мишеней из алюминия принималась равной пробегу электронов в этом материале с энергией, для которой производился расчет. Вклад рассеянного излучения в мощность эквивалентной дозы не учитывался. Экспериментальные измерения проводились аттестованными дозиметрическими приборами. Результаты расчетов и экспериментальных измерений при работе с толстой алюминиевой мишенью при $E_0 = 23$ МэВ и среднем токе 0,42 мА приведены в табл. 1 в мкЗв/ч.

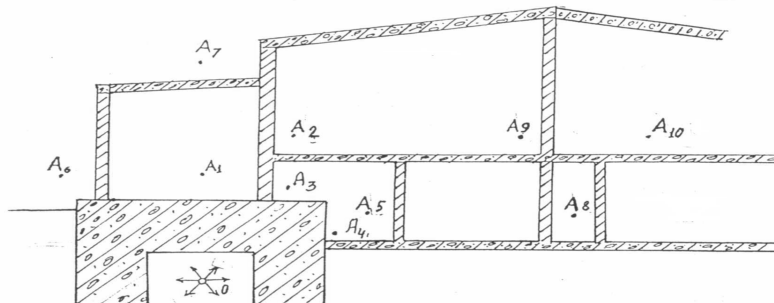


Рис. 1. Поперечное сечение зд.2 и расположение расчетных точек. O – источник излучения (мишень ускорителя 1); A₁ – необслуживаемое надбункерное помещение, закрытое дверью с блокировками; A₂ – клистронный зал; A₃, A₄ и A₅ – технологический коридор; A₆ – прилегающая к зданию территория; A₇ – крыша необслуживаемого помещения; A₈ и A₉ – коридор для прохода; A₁₀ – рабочие комнаты.

Таблица 1.

Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Расчет	32,4	0,2	1,2	5,7
Эксперимент	15	0,35	1,3	10

В случае танталовой мишени при среднем токе 0,45 мА и энергии ускоренных электронов 22,5 МэВ в технологическом коридоре уровень излучения на высоте 1 м от пола и расстоянии 1 м от защиты составил 10 мкЗв/ч. Результаты расчета для этих параметров пучка и танталовой мишени толщиной 2 мм приведены в табл. 2 в мкЗв/ч.

Таблица 2.

Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Расчет	450	4,2	15	108
Эксперимент		3,5	11	60

Уровень нейтронного излучения за защитой согласно расчетам и экспериментальным данным не превышал 1 нейтр./см² сек). Согласие расчетов с экспериментальными измерениями позволяет распространить их на большие токи и энергии.

При наработке изотопа ⁹⁹Mo в необогащенной и обогащенной мишени оптимальная энергия электронов составляет 25 МэВ [5] и 40 МэВ [6], соответственно. В связи с тем, что возможно проведение работ при энергии ускоренных электронов до 100 МэВ и токах до 1 мА, необходимо было провести расчет уровней излучения для толстой танталовой мишени за существующей защитой линейного ускорителя ЛУЭ- 2000 для 25; 60 и 100 МэВ.

В настоящее время нормативные данные для кратности ослабления мощности поглощенной дозы тормозного излучения электронов имеются только до 40 МэВ [7]. Мы провели расчет толщины бетона, необходимой для защиты от тормозного излучения, при различных кратностях ослабления и энергиях электронов до 100 МэВ, пользуясь данными работ [7, 8]. Так как для бетона критическая энергия электронов E_c близка к 40 МэВ (по нашим расчетам E_c = 41,5 МэВ, а радиационная длина – 24,5 г/см²), данные работы [5] по толщине защиты для максимальной энергии тормозного излучения 38 МэВ можно использовать для любой энергии более 40 МэВ с учетом фактора размножения и, следовательно, увеличения мощности поглощенной дозы. Фактор размножения в бетоне определим, используя данные для электрон-фотонных каскадов в свинце при первичной энергии электронов 100 МэВ [8]. Согласно этой работе, на глубине 2.5 рад. длины он составляет ~9 для энергий фотонов 0,5 МэВ и 1,2 – для 5 МэВ соответственно. В этой области энергий фотонов преобладающим процессом является неупругое комптоновское рассеяние, величина которого пропорциональна атомному номеру вещества Z. Z_{свинца} = 82, Z_{бетона} = 14,7. Соотношение Z_{св.}/ Z_{бет.} = 5,58.

Для энергий фотонов меньше 0,5 МэВ в свинце и 0,05 МэВ в бетоне сечение этого пропорционально Zⁿ. Показатель n равен 5 для легких и 4 для тяжелых элементов. Для энергий фотонов больше 5 МэВ сечение процесса пропорционально Z². Таким образом, фактор размножения в максимуме ливня для интервала энергий 0,5 – 5 МэВ будет 9 / 5,58 = 1,61. Для фотонов вне этого интервала фактор размножения будет еще меньше. Следовательно, кратность ослабления для максимальной энергии тормозного излучения 100 МэВ в бетоне будет в 1,61 раза больше чем для 38 МэВ. При этом мы полагали, что каскадные процессы при E₀ = 38 МэВ идут значительно слабее, чем при E₀ = 100 МэВ. Поэтому, чтобы получить кратность ослабления при E₀ = 100 МэВ, нужно к данным для 38 МэВ, приведенным в работе [7], прибавить 9 см (кратность ослабления фотонов с энергией 2,5 МэВ в бетоне толщиной 14 см равна 2). Полученные результаты согласуются с результатами работы [9] и справедливы для толщины бетона больше 2,5 радиационной длины. Кратность ослабления для бетона, требуемая для защиты от тормозного излучения с максимальной энергией E₀, приведена в табл. 3.

Таблица 3.

E ₀ , МэВ / Кратн. осл.	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
38*(работа[5])	57	105	150	197	241	287
60	60	108	153	200	244	290
100	66	114	159	206	250	296

Результаты расчета мощности эквивалентной дозы за существующей бетонной защитой толщиной 2 м для энергий электронов 25; 60 и 100 МэВ, среднего тока 1 мА и толстой танталовой мишени приведены в таблице 4 в мкЗв/ч.

Таблица 4.

E ₀ /Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
25МэВ	1290	3,9	59,5	290	34,4	11,9	53,2	0,06	1,4	0,1
60МэВ	5580	18,6	279	1360	160	55	247	0,3	6,5	0,5
100МэВ	10 ³	354	5250	25570	3·10 ³	1050	4,7·10 ³	5,8	123	8,5

Поток нейтронов в точках A₁ и A₇ (необслуживаемые помещения) при энергии электронов E₀ = 100 МэВ и среднем токе 1 мА будет составлять 1,6·10² и 4,4 нейтр./(см²·с). В остальных точках будет меньше 1 нейтр./(см²·с). При энергии ускоренных электронов до 60 МэВ и средних токах до 1 мА существующая защита обеспечивает необходимый уровень радиационной безопасности. При работе с энергией до 100 МэВ и током 1 мА имеется возможность установить локальную свинцовую защиту (11 см) или усилить снаружи бетонными блоками толщиной 1 м, что снизит уровень излучения в 100 раз.

Таким образом, радиационные условия при работе ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ в прилегающих к бункеру помещениях определяются гамма-излучением, образующимся при взаимодействии электронного пучка с мишенью, имеющей высокий атомный номер. Нейтроны не дают заметного вклада в мощность эквивалентной дозы за защитой даже при работе с мишенями из тяжелых материалов.

Учитывая большую потребность медицины в ^{99}Tc , реальное и гарантированное обеспечение ^{99}Mo медицинских учреждений, для его производства необходимо иметь как минимум два ускорителя. Поэтому было решено создать еще один ЛУЭ-25 (№2) в районе 25–26 секций в бункере ЛУЭ-2000. Для безопасного проведения работ, на создаваемом ускорителе во время работы ускорителей ЛУЭ-10 и ЛУЭ-25 (№1) в бункере ЛУЭ-2000 необходимо было установить радиационную защиту. Расположение этой защиты показано на рис. 2.

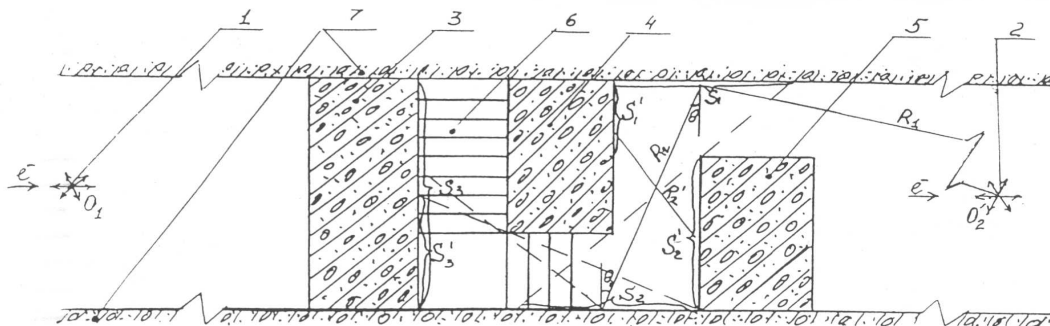


Рис. 2. Расположение бетонной защиты от излучений ускорителей ЛУЭ-25 (№1) и (№2) (сечение бункера ускорителя ЛУЭ-2000 в плоскости, проходящей через ось ускорителя параллельно его основанию). 1 и 2 – ускорители ЛУЭ-25 №1 и №2; 3 – бетонная защита от излучения ускорителя №1; 4 и 5 – стены лабиринта для защиты от рассеянного излучения ускорителя №2; 6 – лестница для входа в бункер ускорителя №2; 7 – существующая бетонная защита ЛУЭ-2000. S_1 и S_1^1 – отражающие поверхности; R_1 – расстояние от мишени ускорителя №2 до отражающей поверхности S_1 .

Для расчета толщины устанавливаемой бетонной защиты в районе 23-й секции использовали экспериментальные данные по мощности поглощенной дозы за алюминиевой мишенью при максимальных рабочих параметрах пучка. Она составила $2 \cdot 10^4$ Гр \cdot м 2 /ч. Вклад ускорителя ЛУЭ-10 в мощность поглощенной дозы составляет менее 1%. Для обеспечения уровня излучения 12 мкЗв/ч необходимая толщина бетонной защиты составляет 2,5 м. Учитывая уже имеющуюся защиту, эквивалентную слою свинца 6 см, и очень жесткие требования к размерам защиты, была установлена бетонная защита толщиной 1,8 м. Измеренная экспериментально мощность эквивалентной дозы при работе ускорителей в разных точках вплотную за защитой 3 составила от 4 до 9 мкЗв/ч. Уровень нейтронного излучения не превышал 1 нейтр./.(см 2 с).

Расположение и параметры создаваемого ускорителя ЛУЭ-25 аналогичны расположению и параметрам уже существующего такого же ускорителя. Поэтому, проблем с защитой от прямого излучения не ожидается. В связи с тем, что вход в помещение нового ускорителя наиболее рационально было сделать через вскрываемую верхнюю защиту и, что он не имеет массивной защитной двери, был сооружен лабиринт для защиты от рассеянного излучения. Толщина стен лабиринта 1,2 м. Схема лабиринта ускорителя ЛУЭ-25 (№2) показана на рис. 2. В качестве главных отражающих поверхностей согласно рис. 2 мы выбрали поверхности S_1 и S_1^1 . Мощность поглощенной дозы на поверхностях S_1 и S_1^1 от ускорителя ЛУЭ-25 составляет 2,5 Гр/ч. Расчет показывает, что вклад в мощность эквивалентной дозы, создаваемой рассеянным излучением у входа в бункер ускорителя ЛУЭ-25 (№2) в необслуживаемом надбункерном помещении, на уровне поверхности защиты будет 1,5 мкЗв/ч.

Таким образом, установленная защита, технические и организационные мероприятия обеспечивают уровень мощности поглощенной дозы ниже предельно допустимого.

Авторы выражают благодарность И.И. Шаповалу за помощь в оформлении работы.

Литература

- [1] Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня, А.И. Зыков, Э.С. Злуницын, С.П. Карасев, В.А. Попенко, Г.Д. Пугачев, Ю.Д. Тур, В.Л. Уваров, Г.Л. Фурсов. Радиационные технологии с применением электронного и тормозного излучения. ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования, №1, 1999, с. 61-63.
- [2] «Нормы радиационной безопасности Украины» (НРБУ), Киев, 1997. «Основные санитарные правила» ОСП-72 87.
- [3] «Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ». № 1858-78.
- [4] «Унифицированные правила устройства и безопасной эксплуатации радиационно-технологических установок» («Унифицированные правила гамма-электрон»), 1988.
- [5] А.Н. Довбня, Г.Д. Пугачев, Д.Г. Пугачев, В.Л. Уваров, М.А. Красногоровец. «Получение мощных фотонных пучков для наработки медицинских радионуклидов». ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования (29, 30), т.2, 1997, с. 154-156.
- [6] Ralph G.Bennet, Jerry D. Christian, David A. Petti, William K. Terry and S.Blaine Grover. "A System of ^{99}Tc production based on distributed electron accelerator and thermal separation." Nuclear Technology V.126, Apr. 1999, p.102-121.
- [7] «Справочник по радиоактивным излучениям и защитам». Н.Г. Гусев. Медгиз, 1956. Москва.
- [8] Von Hans Hellemut Nagel "Elektron-Photon-Kaskaden in Blei. Zeitschrift fur Physik" 186, p.319-346, 1965.
- [9] «Защита от ионизирующих излучений». Под редакцией Н.Г.Гусева. 3-е изд. Москва. Энергоатомиздат, 1989.