



Выбор бетонов биологической защиты ядерных медицинских установок с учетом жизненного цикла

И. А. Енговатов

*Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный
Университет (НИУ МГСУ), Москва*

Аннотация: Рассмотрены проблемы радиационной опасности ядерных медицинских установок с учетом всех стадий жизненного цикла. Обосновывается важная роль бетонов биологической защиты для обеспечения радиационно-экологической безопасности персонала, пациентов, населения и окружающей среды. Доказывается необходимость оптимизации выбора бетонов биологической защиты по радиационным параметрам. Для обоснования необходимости и возможности оптимизации выбора бетонов биологической защиты, приведены результаты расчетных исследований активационных характеристик трех составов защитных бетонов, широко применяемых для сооружения каньонов биологической защиты медицинских циклотронов. Показана возможность уменьшения объемов радиоактивных отходов и их категории на стадии вывода из эксплуатации, что обеспечит уменьшение финансовых затрат на захоронение РАО при демонтаже биологической защиты. Намечены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: ядерная медицина, циклотрон, защитные бетоны, наведенная активность, химический состав, оптимизация, радиоактивный отход, жизненный цикл, вывод из эксплуатации.

В настоящее время ядерная медицина является перспективным инновационным направлением эффективной диагностики и лечения онкологических заболеваний. Как в России, так и за рубежом проектируются, сооружаются и вводятся в эксплуатацию ядерные медицинские центры, отличительной чертой которых является наличие в их составе установок генерирующих гамма, бета-излучение, протоны и нейтроны. Именно эти виды излучений в основном используются непосредственно или для производства радионуклидов для диагностики и лечения в медицинских центрах. Необходимо отметить, что объем рынка ядерной медицины находится в динамичном развитии и по прогнозам может составить к 2020 году – 315 млрд. долл. США. Объем услуг населению медицинских ядерных центров в России значительно уступает развитым странам Европы, США и Азии. Поэтому, из-за высокой потребности, в

России практически во всех ее субъектах осуществляется широкая программа строительства ядерных медицинских центров.

В силу природы физических процессов, ядерные медицинские установки представляют радиационную опасность для персонала, пациентов, населения и окружающей среды. Специфические вопросы, связанные с обеспечением радиационной безопасности, рассмотрим на примере медицинских циклотронов, входящих в состав важнейшего оборудования современных центров.

Работа медицинских ускорителей протонов связана с генерированием интенсивных потоков протонов (первичное излучение), потоков нейтронов и гамма-квантов (вторичное излучение) и излучением радионуклидов, образованных в конструкционных и защитных материалах под действием нейтронов (наведенная активность). Эти факторы являются принципиальной отличительной чертой ядерных медицинских центров от традиционных медицинских учреждений [1-5]. Поэтому обеспечение радиационной безопасности требует сооружение мощных защитных экранов (биологической защиты, выполняемой из бетона с толщиной, достигающей нескольких метров [5]).

Как и для реакторных установок, массивные бетонные защитные конструкции циклотронов играют важную роль практически на всех стадиях жизненного цикла ядерных медицинских установок [6-9]. На стадиях проектирования защитные бетонные конструкции в значительной мере влияют на стоимость сооружения медицинского центра в целом. На стадии эксплуатации защитные конструкции определяют радиационно-экологическую безопасность населения и окружающей среды с учетом фактора размещения ядерных медицинских центров в крупных городах и населенных пунктах в непосредственной близости от потребителя. По этой же причине особенно велика роль защитных бетонных конструкций на

стадии вывода из эксплуатации ядерных медицинских установок, из-за образования значительных объемов радиоактивных отходов РАО, в результате активации защиты нейтронами, образующимися при работе циклотрона по реакции (p,n).

Обращение с РАО, их временное хранение и отправка на захоронение связаны с радиационной опасностью и значительными финансовыми затратами. Так стоимость захоронения твердых радиоактивных отходов варьируется в пределах от 1 200 000 рублей для высокоактивных отходов (ВАО), 550 000 для среднеактивных отходов (САО), 127 000 для низкоактивных отходов (НАО) до 35 000 для очень низкоактивных отходов (ОНРАО) за м³ [10].

Все эти факты требуют решение задач по оптимизации выбора защитных бетонов ядерных медицинских установок, особенно при использовании различных видов и типов ускорителей. Необходимо также отметить, что резкое количественное увеличение ядерных медицинских установок, а так же увеличение энергии и тока, используемых для медицинских целей циклотронов, делает проблему активации защитных конструкций еще более актуальной.

Основными параметрами оптимизации выбора защитных бетонов с учетом всех стадий жизненного цикла ядерных медицинских установок являются следующие:

- высокая защитная эффективность по отношению к первичному и вторичному излучению;
 - низкая активация под действием нейтронного облучения;
 - низкая мощность дозы гамма-излучения от активируемых конструкций защиты;
 - низкая стоимость;
 - минимизация объемов радиоактивных отходов.
-

В значительной степени все указанные параметры оптимизации не в последнюю очередь связаны с наведенной активностью защитных материалов и конструкций. В результате ядерных реакций на изотопах химических элементах, входящих в состав оборудования и радиационной защиты, часть оборудования циклотронов, а также часть радиационной защиты каньонов циклотронов становятся радиоактивными за счет образования радионуклидов. Наибольший интерес с точки зрения активации представляет защитный бетон каньонов циклотронов. В состав защитных бетонов в качестве основных (с содержанием по массе более 1 %), примесных (от 0,01 до 1%) и следовых (менее 0,01%). Образовавшиеся радионуклиды имеют различные периоды полураспада, схемы распада, различный выход и энергию ионизирующего излучения.

Характеристики важнейших активационно опасных элементов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Радиационно-физические характеристики важнейших радионуклидов, определяющих суммарную удельную активность защитных бетонов ядерных установок

№	Радионуклид	Реакция образования	Определяющий вид излучения: α, β, γ-излучение, КХ-характеристическое излучение, электроны Ожэ	Период полураспада T _{1/2}
1	³ H	⁶ Li(n,p) ³ H	β	12,35 года
2	⁵⁵ Fe	⁵⁴ Fe(n,γ) ⁵⁵ Fe	КХ	2,73 года
3	⁶⁰ Co	⁵⁹ Co(n,γ) ⁶⁰ Co	γ	5,27 лет
4	⁶³ Ni	⁶² Ni(n,γ) ⁶³ Ni	β	101,1 лет
5	¹³⁴ Cs	¹³³ Cs(n,γ) ¹³⁴ Cs	γ	2,065 лет
6	¹⁵² Eu	¹⁵¹ Eu(n,γ) ¹⁵² Eu	γ	13,542 лет
7	¹⁵⁴ Eu	¹⁵³ Eu(n,γ) ¹⁵⁴ Eu.	γ	8,592 лет

8	^{232}Th	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{U}$	α	$1,58 \cdot 10^5$ лет
9	^{238}U	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{Pu}$	α	$2,4 \cdot 10^4$ лет

Нуклиды, определяющие наведенную активность бетонных защитных бункеров циклотронов, имеют значительно отличающиеся периоды полураспада и различные спектрально-энергетические характеристики излучения. Среди них присутствуют гамма-излучатели (дозообразующие радионуклиды), бета-излучатели, нуклиды, источники характеристического излучения, альфа-излучатели, трансурановые элементы [8].

При остановленном циклотроне на ремонтные и профилактические работы, и особенно на стадии вывода ядерной медицинской установки из эксплуатации, наибольшую радиационную опасность представляют долгоживущие радионуклиды с большим периодом полураспада и с активностью, превышающей минимально значимую.

Ниже приводятся и анализируются результаты расчетов долгоживущей наведенной активности защитных конструкций циклотронов, обосновывающие и подтверждающие необходимость оптимизации при выборе материалов защитных бетонов ядерных медицинских установок. Геометрия расчета аналогична геометрии бункера циклотронов PETtrace 880 [8], причем толщина защитных стен варьируется от 2 до 4 м.

В качестве защитных бетонов выбраны следующие 3 состава бетонов, широко используемых для биологической защиты ядерных установок:

Материал 1 –бетон на граните объемной массой 2145 кг/м^3

Материал 2 –бетон на хромите объемной массой 2700 кг/м^3

Материал 3 – железо-серпентинитовый бетон объемной массой 3600 кг/м^3

Используя подход и методику расчета удельной наведенной активности защитных бетонов, изложенную в работе [6,7], были рассчитаны:

- удельная и суммарная активность радионуклидов в материалах биологической защите при временах облучения 20 лет и выдержки от 30 дней до 100 лет;
- распределение удельной и суммарной активности бетона в зависимости от времени выдержки для долгоживущих радионуклидов, определяющих наведенную активность;
- вклад различных радионуклидов в суммарную наведенную активность бетона и его изменение в зависимости от времени выдержки;
- толщина активированного радиоактивного слоя для различных составов бетонов и классы радиоактивных отходов (РАО) в зависимости от времени выдержки в соответствии с (Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. №1069 г.Москва “О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов).

В качестве иллюстрации полученных результатов в таблице 2 и на рис.1 приведены значения удельной активности наиболее значимых для бетона 1 радионуклидов при временах выдержки от 30 дней, 1 год, 5, 25, 50 и 100 лет и графики распределения удельной активности при временах выдержки от 1 года до 100 лет.

Таблица 2

Значения удельной активности радионуклидов, входящих в состав бетона 1

Радионуклид	А, Бк/г					
	30 дней	1 год	5 лет	25 лет	50 лет	100 лет
3H	3,67E+03	3,48E+03	2,78E+03	9,04E+02	2,22E+02	1,34E+01
55Fe	5,88E+03	4,66E+03	1,69E+03	1,06E+01	1,86E-02	5,77E-08
60Co	3,13E+02	2,77E+02	1,64E+02	1,18E+01	4,41E-01	6,15E-04

134Cs	9,02E+01	6,63E+01	1,73E+01	2,09E-02	4,72E-06	2,40E-13
152Eu	2,60E+03	2,48E+03	2,02E+03	7,13E+02	1,95E+02	1,45E+01
154Eu	1,27E+03	1,18E+03	8,54E+02	1,70E+02	2,27E+01	4,03E-01
239Pu	1,66E-02	1,66E-02	1,66E-02	1,66E-02	1,66E-02	1,66E-02
Сумма	1,38E+04	1,21E+04	7,52E+03	1,81E+03	4,40E+02	2,83E+01

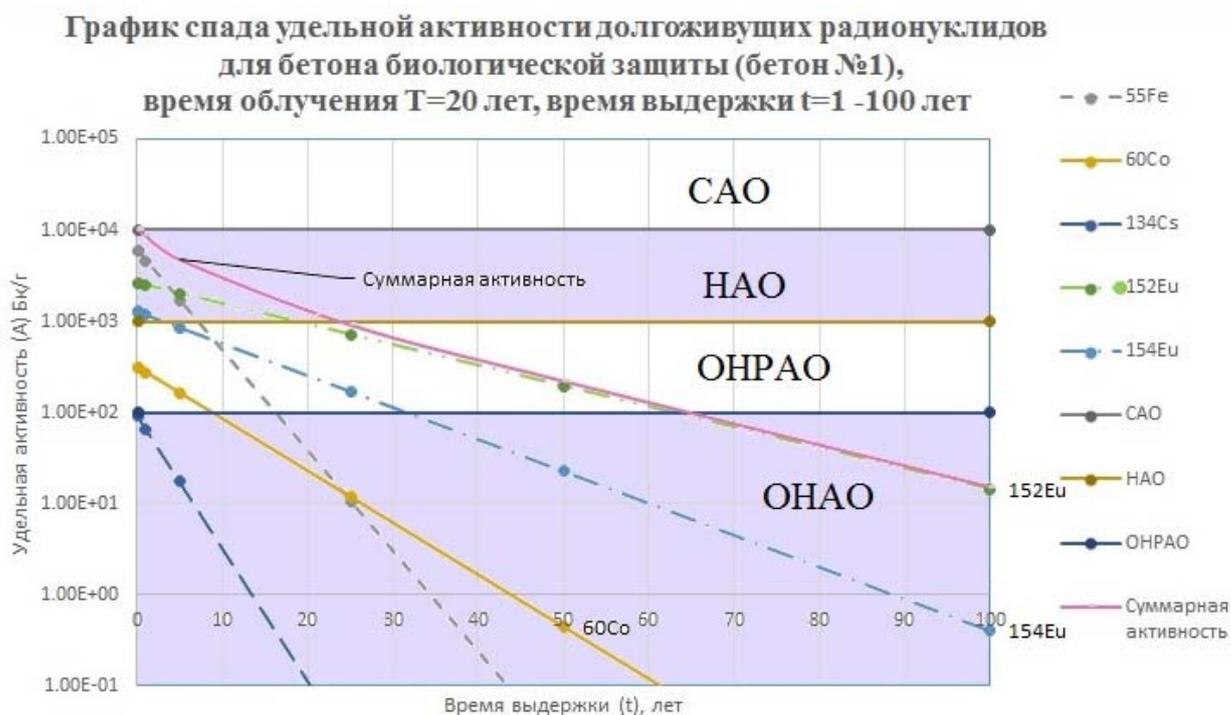


Рис.1. График спада удельной активности долгоживущих радионуклидов для бетона биологической защиты (бетон №1)

Анализ данных табл.2 и рис.1 показывает, что в первый год после прекращения эксплуатации циклотрона основными нуклидами определяющими радиоактивность бетона 1 являются ^{55}Fe , ^{152}Eu , ^{154}Eu . При увеличении времени выдержки вклад ^{55}Fe уменьшается, и уже после 10 лет выдержки основной вклад в суммарную активность будут вносить ^{152}Eu , ^{154}Eu и ^{60}Co . Другим важным выводом является тот факт, удельная активность ^{239}Pu меньше предельного значения удельной активности для твердых отходов.

В целом по суммарной активности бетон 1 будет относиться к категории НАО до 25 лет выдержки и затем остается в категории ОНРАО до 65 лет выдержки, после этого срока будет относиться к материалам повторного использования (МПИ).

Для бетонов 2 и 3 результаты имеют аналогичный качественный характер, отличаясь в количественном отношении. По суммарной активности бетон 2 первые 10 лет будет относиться к категории САО, с 10 до 22 лет – НАО, с 22 до 38 очень ОНРАО, после 40 лет будет относиться к МПИ. По суммарной активности бетон 3 до 5 лет выдержки соответствует САО, с 5 до 20 лет выдержки бетон будет являться НАО, с 20 до 50 лет –ОНРАО, а после 50 лет станет МПО.

Заключения и выводы.

1. Долгоживущая наведенная активность бетонов биологической защиты ядерных медицинских установок определяется радионуклидами с различными радиационными характеристиками и образованными в основном на химических элементах, входящих в состав защитных бетонов в качестве примесных и следовых, таких как железо, литий, европий, кобальт, цезий, никель, уран.
 2. Проведенные расчеты доказывают возможность оптимизации выбора состава бетонов биологической защиты по радиационным параметрам.
 3. Оптимальный выбор малоактивируемых бетонов позволит добиться снижения объёмов и категории РАО на стадии вывода из эксплуатации, определить время выдержки до начала работ по выводу из эксплуатации минимизировать финансовые затраты и радиационно-экологическое воздействие на персонал, население и окружающую среду.
 4. Представляется необходимым провести комплекс расчетно-экспериментальных исследований широкого класса бетонов
-

биологической защиты с целью оптимизировать выбор бетонов для всех стадий жизненного цикла ядерных медицинских установок. Состав бетонов биологической защиты должен быть отражен в проектных документах в форме паспорта на химический состав с учетом содержания основных, примесных и следовых активационно опасных элементов.

Литература

1. Adams A. Medicine by Design: The Architect and the Modern Hospital, 1893–1943 (Architecture, Landscape and American Culture). University of Minnesota, 2008. 172 p.
2. Rosenberg J. Health administrators go shopping for new hospital designs // National review of Medicine (Canada). 2004. Vol. 1. No. 21.
3. Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities : workbook / the American Institute of Architects Academy of Architecture for Health, the Facilities Guidelines Institute ; with assistance from the U.S. Dept. of Health and Human Services. Washington, D.C.: The American Institute of Architects, 2001. 176 p.
4. International Atomic Energy Agency, WS-G-2.2. Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities. 1999. 37 p.
5. Cyclon 70 XP. IBA. Chemin du , 3 1348 Louvain-la-Neuve Belgium pp. 1-28
6. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н., Синюшин Д.К. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок. Ядерная и радиационная безопасность, 2017, №3 (85). С. 1-14.

7. Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A. Selecting Concrete for Radiation Protection for New-Generation NPP. Atomic Energy pp. 436-441 DOI:10.1007/s10512-015-0020-8, Springer
8. Алиев Т.Ю., Енговатов И.А., Лавданский П.А., Соловьев В.Н. Наведенная активность бетонной радиационной защиты каньонов циклотронов на стадии вывода из эксплуатации //Вестник МГСУ, 2014 №10. С.106-113.
9. Telichenko V, Dorogan I. Radiation Safety in Designing of Health Care Facilities // International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 3 (2016) pp. 1649-1652.
10. Иванов Е.А., Коротков А.С., Пырков И.В. Радионуклидный вектор. Росэнергоатом. 2015. №1. С. 42-45.

References

1. Adams A . Medicine by Design: The Architect and the Modern Hospital, 1893–1943 (Architecture, Landscape and American Culture). University of Minnesota, 2008. 172 p.
 2. Rosenberg J. Health administrators go shopping for new hospital designs // National review of Medicine (Canada). 2004. Vol. 1. No. 21.
 3. Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities : workbook / the American Institute of Architects Academy of Architecture for Health, the Facilities Guidelines Institute ; with assistance from the U.S. Dept. of Health and Human Services. Washington, D.C.: The American Institute of Architects, 2001. 176 p.
 4. International Atomic Energy Agency, WS-G-2.2. Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities. 1999. 37p.
 5. Cyclon 70 XP. IBA. Chemin du , 3 1348 Louvain-la-Neuve Belgium pp.1-28
-



6. Bylkin B.K., Engovatov I.A., Kozhevnikov A.N., Sinyushin D.K. Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost', 2017, №3 (85), pp. 1-14.
7. BBylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A. Selecting Concrete for Radiation Protection for New-Generation NPP. Atomic Energy pp.436-441 DOI:10.1007/s10512-015-0020-8, Springer
8. Aliev T.YU., Engovatov I.A., Lavdanskij P.A., Solov'ev V.N. Vestnik MGSU 2014 №10. pp.106-113.
9. Telichenko V, Dorogan I. International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 3 (2016) pp. 1649-1652.
10. Ivanov E.A., Korotkov A.S., Pyrkov I.V. Rosenergoatom. 2015. №1. pp. 42-45.