

шает задачу определения и структурирования процессов, необходимых СМК, обладает свойством полезности для решения комплекса задач менеджмента качества в организации.

В совокупности разработку функциональной модели сети процессов СМК и трех функциональных подсистем можно представить как типовую программу реализации полного цикла менеджмента качества (организационно – технической (инженерной) деятельности в области качества).

Литература

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Процессный подход / П. С. Серенков. – Минск : Новое издание. – М. : Инфра-М., 2014. – 441 с.
2. Репин В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
3. Серенков, П. С. Тотальное применение комплексного процессного подхода / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015.

УДК 539.172.12

РАДИОНУКЛИДЫ В СМЕННЫХ ДЕТАЛЯХ КОММЕРЧЕСКИХ ЦИКЛОТРОНОВ

Бринкевич Д.И.¹, Бумай Ю.А.², Киевицкая А.И.³, Кийко А.Н.⁴

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

³«Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» БГУ

⁴Белорусский государственный институт метрологии

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано накопление радионуклидов (РН) во входном окне водной мишени и стриппере «медицинского» 18-МэВ циклотрона Cyclone 18/9 НС для минимизации дозовых нагрузок персонала и определения условий хранения РАО. Доминирующими РН являются ⁵⁷Ni, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn и ⁵¹Cr с периодом полураспада от 1 до 312 суток. Наибольшую активность (до 6 мЗв) имела Havar фольга входного окна мишени.

Ключевые слова: циклотрон, ниобиевая мишень, стриппер, активация, радионуклиды.

RADIONUCLIDES IN REPLACEMENT PARTS OF COMMERCIAL CYCLOTRONS

Brinkevich D.¹, Bumai Y.², Kiyavitskaya H.³, Kiyko A.⁴

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

³International Sakharov Environmental Institute of BSU

⁴Belarusian State Institute of Metrology

Minsk, Belarus

Abstract. The accumulation of radionuclides (RN) in the entrance window of the water target and the stripper of the “medical” 18-MeV Cyclone 18/9 НС cyclotron was investigated to minimize the dose load of personnel and determine the conditions for storage of radioactive waste. The dominant PHs are ⁵⁷Ni, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn and ⁵¹Cr with a half-life from 1 to 312 days. The Havar foil of the target entrance window had the highest activity (up to 6 mSv).

Key words: cyclotron, niobium target, stripper, activation, radionuclides.

Адрес для переписки: Бринкевич Д.И., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: brinkevich@bsu.by

В настоящее время коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ широко используются для производства медицинских и промышленных изотопов [1]. Медицинские изотопы применяются в различных отраслях медицины (нейрологии, кардиологии, онкологии т.д.) для диагностики ряда заболеваний, а также для терапии злокачественных новообразований [2].

Одна из наиболее важных проблем использования «медицинских» циклотронов связана с высокой активностью, индуцированной в компонентах циклотрона. Перечень радионуклидов (РН), образующихся в различных частях цикло-

трона, в основном определяется взаимодействием протонного пучка или вторичных нейтронов, образующихся в мишени. Эта проблема важна и связана с радиационной защитой операторов при обслуживании циклотрона, замене мишени или ее компонентов. В процессе производства технического обслуживание циклотрона с заменой его компонентов (стриппера, деталей мишени и т.д.) приходится проводить не реже 1–2 раз в год. Перед закладкой на хранение необходимо знание величин остаточной активности наиболее важных РН, присутствующих в извлеченном компоненте. Определение номенклатуры и активности

индуцированных РН важно для оценки степени облучения персонала при техническом обслуживании и для проектирования новых производств с целью обеспечения радиационной безопасности и надлежащего хранения РАО.

Активность и состав определяются условиями конкретного производства (тип циклотрона, материал входного окна и тела мишени, интенсивность и длительность облучения и т.д.). В последние годы были выполнены исследования накопления РН на различных «медицинских» циклотронах с разными типами мишеней (серебряными, титановыми и танталовыми) [3]. Однако по циклотрону Cyclone 18/9 НС ощущается недостаток информации.

Цель настоящей работы – определение активности и идентификация радионуклидов в сменных компонентах 18-МэВ циклотрона ИВА Cyclone 18/9 с помощью спектрометрии гамма-излучения высокого разрешения с детекторами HPGe для минимизации дозовых нагрузок производственного персонала и определения надлежащих условий хранения РАО.

Материалы и методы измерений. В настоящей работе исследовалось накопление РН- в входном окне водной мишени из фольги Наваг и титановой фольги, а также выводном стриппере (вилки съёмника и углеродная фольга) циклотрона Cyclone 18/9 НС. Эти детали находятся на пути протонного пучка и обычно заменяются каждые полгода, а по мере необходимости и чаще. Облучение водной ниобиевой мишени Nirta Fluog объемом 3,2 мл осуществлялось протонами с энергий 18 МэВ при ионном токе на мишени – 75–80 мкА. Время облучения мишени за один производственный цикл составляло 100–130 минут.

Идентификацию γ -излучающих радионуклидов и определение их активности выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5 – 2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал. Из-за высокой активности измерения проводили не менее, чем через двое суток после последнего облучения.

Эксперимент. Стриппер в циклотронах медицинского назначения представляет собой тонкую пленку пиролитического графита, используемую в устройствах вывода протонного пучка. В них отрицательно заряженные ионы Н⁺ теряют электроны и трансформируются в протоны вследствие чего изменяется на противоположное направление отклонения ионного пучка в магнитном поле и ионный пучок может быть легко выведен на облучаемую мишень.

После облучения величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера через 2 дня после замены была около 50 мкЗв ч⁻¹. В γ -спектрах облученного стриппера наблюдались линии радио-

нуклидов никеля ⁵⁷Ni, кобальта ⁵⁵Co, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, марганца ⁵⁴Mn и хрома ⁵¹Cr (табл.1) и низкоактивного ⁶⁵Zn. Доминирующим радионуклидом является ⁵¹Cr с периодом полураспада 27,7 суток. Указанные радионуклиды образуются в результате ядерных реакций с протонами стабильных изотопов железа (⁵⁶Fe, ⁵⁷Fe, ⁵⁸Fe), хрома (⁵²Cr, ⁵³Cr, ⁵⁴Cr) и никеля (⁵⁸Ni) [28]. Это указывает на присутствие указанных изотопов в качестве примесей в пиролитическом графите либо на попадание указанных элементов на поверхность стриппера в результате испарения из других деталей циклотрона. Радионуклидов, обусловленных взаимодействием протонов со стабильными изотопами углерода, не обнаружено, что обусловлено коротким периодом полураспада ($t_{1/2}$ до нескольких минут) указанных РН.

Отметим, что полученные нами результаты хорошо коррелируют с данными [4]. Единственное исключение составляют более низкие, чем в нашем случае значения активности ⁵¹Cr и ⁵⁷Co, что может быть обусловлено отличием в условиях облучения (мишень 2,2 мл, средний ток 32 мкА) и применением при измерении коллимационного устройства с целью сокращения мертвого времени.

Таблица 1. Активности радионуклидов в фольге стриппера через 7 дней после облучения А_н и после хранения в течение полугода А_к

РН	$t_{1/2}$, дней	А _н , кБк	А _к , кБк	Реакции
⁵¹ Cr	27,7	23	1	⁵² Cr (p,pn) ⁵¹ Cr
⁵⁴ Mn	312,3	1,2	–	⁵³ Cr (p, γ) ⁵⁴ Mn ⁵² Cr (p,n) ⁵⁴ Mn
⁵⁵ Co	0,73	1,5	–	⁵⁴ Fe (p, γ) ⁵⁵ Co ⁵⁸ Ni (p,d) ⁵⁵ Co
⁵⁶ Co	77,7	8	–	⁵⁶ Fe (p,n) ⁵⁶ Co ⁵⁷ Fe (p,2n) ⁵⁶ Co
⁵⁷ Co	271,8	3	3	⁵⁶ Fe (p, γ) ⁵⁷ Co ⁵⁷ Fe (p,n) ⁵⁷ Co
⁵⁸ Co	70,9	2,8	–	⁵⁷ Fe (p, γ) ⁵⁸ Co ⁵⁸ Fe (p,n) ⁵⁸ Co
⁵⁷ Ni	1,48	3,4	–	⁵⁸ Ni (p,pn) ⁵⁷ Ni

После хранения в течение полугода величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера снижается до значений < 1 мкЗв ч⁻¹ и он может выведен из состава РАО. При этом в γ -спектрах наблюдались линии ⁵⁷Co, ⁵¹Cr и ⁶⁵Zn с активностью близкой к пределу детектирования.

Свежеоблученные детали входного окна мишени (Наваг-фольга и титановое окно) имеют высокую удельную активность. Так по данным [4] значение мощности дозы, измеренное ионизационной камерой TOL/F, на расстоянии 10 см от фольги Наваг составляла около 6 мЗв /ч примерно через 25 дней после последнего облучения (41 мкЗв /ч на расстоянии 1 м).

Наибольший вклад в активность вносят радионуклиды с периодом полураспада около 70 дней. Это означает, что через ~ 2 года (10 периодов полураспада), общая активность будет снижена до значений близких к 1 мкЗв ч^{-1} и может быть рассмотрен вопрос вывода указанных компонент мишени из состава РАО.

Литература

1. Папаш, А. И. Коммерческие циклотроны Ч. 1: Коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ для производства изотопов. / А.И.Папаш, Ю.Г.Аленицкий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2008. – Т. 39, № 4. – С. 1150–1214.

2. Позитронно-эмиссионная томография Ч. 1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С. Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 129–137.

3. Brinkevich, S. D. Activation Radionuclides in the Process of Irradiation of a Niobium Target at the Cyclone 18/9 HC Cyclotron / S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, A. N. Kiyko // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83, № 12. – P. 1732–1737.

4. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron / P. Guarino [et al.] // Cyclotrons and Their Applications–2007 : 18-th Int. Conf. Giardini Naxos, Italy. – P. 295–297.

УДК 535.241

КАЛИБРОВКА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ КОМПАРАТОРОМ SOLAR M150 Бручковский И.И., Гуляева С.И., Литвинович Г.С.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика калибровки фотометрической сферы компаратором SOLAR M150, позволяющая скорректировать неточность установки длины волны компаратором, путем регистрации спектров линейчатого источника в каждом положении дифракционной решетки.

Ключевые слова: фотометрическая сфера, калибровка, SOLAR M150.

SPECTRAL RADIANCE CALIBRATION OF PHOTOMETRIC SPHERE WITH THE SOLAR M150 COMPARATOR

Bruchkouski I., Guliaeva S., Litvinovich H.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents a procedure of photometric sphere calibration with a SOLAR M150 comparator, which allows to correct the inaccuracy of setting the wavelength by the comparator by registering line spectrum at each position of the diffraction grating.

Key words: photometric sphere, calibration, SOLAR M150.

Адрес для переписки: Литвинович Г.С., НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220045, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: litvinovichgs@yandex.by

Фотометрическая сфера (ФС) [1] предназначена для создания диффузного излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм. Источником излучения выступают шесть галогенных ламп накаливания мощностью 250 Вт.

Для калибровки ФС по СПЭЯ применяются:

- Рабочий эталон (РЭ) – фотометрическая сфера с известным СПЭЯ;
- Компаратор SOLAR M150;
- Поворотная платформа Standa 8MR190-90-59;
- Газоразрядные лампы Oriel (#6033, #6030, #6035, #6031) [4] и диффузный отражатель.

Компаратор одновременно регистрирует спектральный диапазон шириной от 120 до 250 нм в зависимости от выбранной решетки.

Поскольку компаратор SOLAR M150 содержит в своем составе подвижную турель с дифракционными решетками, то для исключения ошибки установки длины волны, связанной с неточностью позиционирования турели, необхо-

димо в ходе каждого измерения контролировать правильность калибровки по длинам волн и при необходимости корректировать. Для обеспечения заполнения апертуры компаратора излучением линейчатого спектра, применяемые газоразрядные лампы (Hg, Ar, Na, Kr) устанавливаются в диффузный отражатель. Применение такого подхода позволяет значительно снизить ошибку определения калибруемой длины волны. Схема установки представлена на рис. 1.

Компаратор имеет встроенную шторку для перекрытия светового пучка, что позволяет снимать темновой сигнал автоматически.

Упрощенно схему измерений можно представить следующим образом:

1. Измерение темнового $\bar{V}(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{ТЕМН}}$ и полезного $V(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{СИГН}}$ сигналов от ФС.

2. Измерение темнового $\bar{V}(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{ТЕМН}}$ и полезного $V(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{СИГН}}$ сигналов от РЭ.