

ОЦЕНКА НАРАБОТКИ ^{99}Mo И $^{99\text{m}}\text{Tc}$ НА $^9\text{Be}(d,n)$ ГЕНЕРАТОРЕ ХФТИ

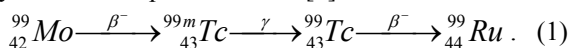
Э.Л. Купленников, А.Н. Довбня, В.А. Цымбал, С.С. Кандыбей, А.Ф. Стоянов
 Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
 Харьков, Украина
 E-mail: kupl@kipt.kharkov.ua

Рассмотрена возможность производства изотопов ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ с помощью тепловых нейтронов нейтронного генератора ННЦ ХФТИ на основе ядерной реакции $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$. Оценка наработки радионуклида ^{99}Mo на мишени молибдена естественного изотопного состава проведена для времени облучения 24 часа и плотности потока нейтронов $1 \cdot 10^{12}$ нейтр./см²·с. Выход ^{99}Mo оценивался для двух образцов весом 43,25 и 100 г. Учтен дополнительный вклад резонансных нейтронов, нейтронов реакции $^9\text{Be}(n,2n)$ и вклад ^{12}C отражателя. Активность наработанного $^{99\text{m}}\text{Tc}$ определена для десятикратной экстракции $^{99\text{m}}\text{Tc}$ из изотопного генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее востребованных в ядерной медицине радионуклидов (РИ) является $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Широкое применение радионуклида объясняется его ядерными свойствами, которые обуславливают преимущество $^{99\text{m}}\text{Tc}$ перед многими другими РИ. По данным МАГАТЭ более 80 % радиодиагностических процедур в мире проводится препаратами, меченными $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [1].

Искомый радионуклид в основном получают в результате бета-распада ^{99}Mo [1]:



^{99}Mo можно получить многими способами. Например, в результате прямых ядерных реакций [2]: $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)$, $^{98}\text{Mo}(d,p)$, $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)$, $^{100}\text{Mo}(n,2n)$, $^{100}\text{Mo}(p,pn)$, $^{96}\text{Zr}(\alpha,n)$, а также косвенным путем в реакции $^{100}\text{Mo}(p,2p) \rightarrow ^{99}\text{Nb} \rightarrow ^{99}\text{Mo}$ и др. Кроме того, ^{99}Mo образуется при делении нейтронами высокой энергии платины, таллия, висмута, тория, а также при делении тепловыми и нейтронами спектра деления изотопов ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{239}Pu [2].

Однако основной промышленной наработкой ^{99}Mo является реакторный способ [3]. При этом производство РИ осуществляется либо за счет радиационного захвата нейтронов в реакции $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)$, либо его извлечения из продуктов деления урана. Сразу же отметим, что первый способ не используется крупными производителями, поскольку он не позволяет нарабатывать коммерческие объемы ^{99}Mo , т.е. современное производство основано на делении урана. Высокообогащенный образец ^{235}U облучают в реакторе, а затем перерабатывают одним из известных радиохимических способов. Из продуктов деления извлекают ^{99}Mo , удельная активность которого достигает несколько тысяч терабеккерель (1 ТБк = 27 Ки) на 1 г молибдена [3].

Минимальные потребности в ^{99}Mo в мире сейчас составляют порядка 600 тысяч Ки/год [4]. К тому же рынок устойчиво растет на 5...7% ежегодно. Около 95 % ^{99}Mo производят Канада, Европейский Союз и ЮАР. В России в настоящее время полным ходом идет создание первого федерального центра ядерной медицины в Димитровграде, на очереди Обнинск и Томск [4]. Планируется задействовать два реактора. При необходимости будет подключен и третий, что

позволит создать практически непрерывное производство ^{99}Mo . В 2011 году объем производства ожидается ~1 тыс. Ки/неделю. В 2012 году наработанная активность составит ~2,5 тыс. Ки, т.е. около 20 % мирового рынка.

Альтернативный способ производства ^{99}Mo в жидкосолевым фторидном топливе реактора предложен в [3]. В результате деления ^{235}U в расплаве соли нарабатывается ^{99}Mo . Радионуклид мигрирует к границе раздела соль-газ и переходит в газовую фазу над поверхностью солевого расплава в виде фторидов и аэрозолей. Процесс может быть интенсифицирован за счет барботирования через расплав соли гелия или аргона. Газ-носитель, содержащий аэрозоли и летучие фториды молибдена, поступает в систему улавливания и далее на радиохимическую переработку. Ожидается, что установка мощностью 1 МВт при 5-суточном цикле работы и выходе в газовую фазу 50 % осколочного молибдена, способна произвести 200 ТБк ^{99}Mo в неделю.

В работе [5] детально рассмотрена возможность производства $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ на 14-кВт ускорителе электронов с энергией 40 МэВ. Узкий, направленный вперед пучок тормозного излучения, образованный при взаимодействии электронов с вольфрамовым конвертером, попадает на высокообогащенную до 96 % ^{100}Mo мишень массой 14,4 г. В результате фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma,n)^{99}\text{Mo}$ за 24 часа облучения нарабатывается около 25 Ки ^{99}Mo . Утверждается, что двадцать таких, распределенных по территории США, центров полностью обеспечат страну более дешевым, чем в случае реакторного производства, ^{99}Mo .

В течение последних лет интенсивные теоретические и экспериментальные исследования возможности наработки ^{99}Mo на линейных ускорителях электронов (ЛУЭ) проводятся в ННЦ ХФТИ (см. ссылки в [6]). Показано, что на ЛУЭ КУТ-30, работающем при энергии электронов 36 МэВ и токе 260 мкА, нарабатывается в течение дня на мишени из природного молибдена ($^{\text{Nat}}\text{Mo}$) весом 30 г до 1 Ки ^{99}Mo . Для такой же мишени, обогащенной по ^{100}Mo , ежедневный выход может достигать 10 Ки.

В настоящее время в ННЦ ХФТИ разработан и находится в стадии монтажа и тестирования $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ нейтронный генератор (НГ) [7], который

будет использован для получения ^{99}Mo . В качестве источника дейтронов выступает каскадный генератор с энергией до 2,5 МэВ. Ток ионов дейтерия 20 мА и оригинальное мишенное устройство позволят генерировать тепловые нейтроны с плотностью потока $1 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Данная работа посвящена изучению возможности применения НГ ННЦ ХФТИ с плотностью потока тепловых нейтронов $1 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ для производства изотопа ^{99}Mo на основе ядерной реакции $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo}$ с последующим выделением $^{99\text{m}}\text{Tc}$ с помощью изотопного генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$.

1. НАРАБОТКА ^{99}Mo НА НЕЙТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ ННЦ ХФТИ

1.1. ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗЦА

На Рис.1 [7] представлено оптимальное размещение образца из ^{99}Mo в объеме мишенного устройства НГ, полученное при помощи моделирования с использованием программного пакета MCNP (вид в плоскости сечения, проходящей через ось конуса мишени). Кривые и цифры соответствуют постоянному флюенсу (нейтр./ см^2 на 1000 первичных нейтронов).

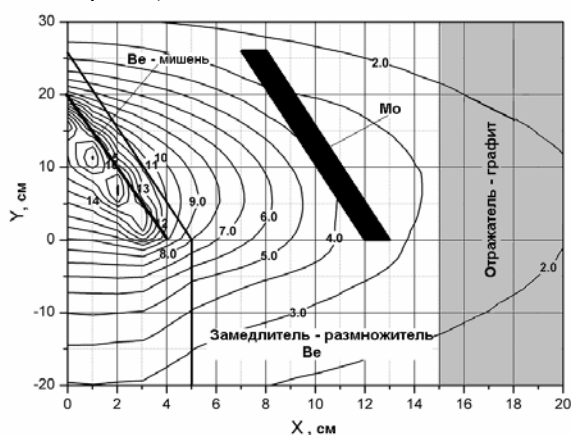


Рис.1 Размещение облучаемого образца из ^{99}Mo в объеме мишенного устройства

Одним из важных параметров, характеризующих прохождение нейтронов через реальные образцы, является макроскопическое сечение [8] $\Sigma = \rho^* \cdot \sigma_{\text{eff}}$, где ρ^* – плотность ядер элемента, σ_{eff} – эффективное сечение взаимодействия. Величина Σ аналогична линейному коэффициенту ослабления γ -квантов и может применяться для оценки ослабления потока нейтронов при взаимодействии со средой образца. В зависимости от задачи можно пользоваться полной величиной Σ_{tot} , характеризующей всю совокупность процессов взаимодействия нейтронов с веществом, если не интересоваться деталями такого взаимодействия. Но можно вводить и парциальные значения: Σ_d – для процессов рассеяния, Σ_a – для процессов поглощения и Σ_c – для процессов радиационного захвата нейтронов. В данном случае использовалась полная величина $\Sigma_{\text{tot}} = \rho^* \sigma_{\text{tot}} = 0,521 \text{ см}^{-1}$, $\rho^* = 0,064 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$, $\rho = 10,2 \text{ г/см}^3$, $\sigma_{\text{tot}} = 8,14 \text{ барн}$ [9].

Плотность потока нейтронов, прошедших слой вещества (x), без учета вклада многократного рассеяния равна [8]:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\Sigma_{\text{tot}} x}, \quad (2)$$

где Φ_0 – плотность потока нейтронов первоначального пучка.

Расчет величины x выполнен согласно (2) для металлического ^{99}Mo в предположении, что первоначальная плотность потока нейтронов $\Phi_0 = 1 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ уменьшается на 10 % на задней стенке образца, т.е. средняя плотность потока нейтронов, проходящих через мишень, $\Phi_{\text{cp}} = 0,95 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Для заданных параметров толщина мишени оказалась равной $x = 0,78 \text{ см}$. Диаметр мишени 2,63 см и вес $m = 43,25 \text{ г}$ (число ядер ^{98}Mo $6,55 \cdot 10^{22}$) выбраны из условия возможной обработки образца в изотопном генераторе $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ННЦ ХФТИ. Сразу же отметим, что реально НГ позволяет облучать образец с максимальным весом 100 г (число ядер $15,14 \cdot 10^{22}$).

1.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ АКТИВАЦИИ Мо

В работе [10] рассмотрен дополнительный вклад в наработку ^{99}Mo резонансных нейтронов, создаваемых $^9\text{Be}(d,n)$ НГ и мишенным устройством из массивного бериллия. Резонансное сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo}$ приведено на Рис.2. Наиболее мощные резонансы наблюдаются при энергии 11,2 и 447 эВ, несколько резонансов проявляются в интервале энергий 560...2000 эВ.

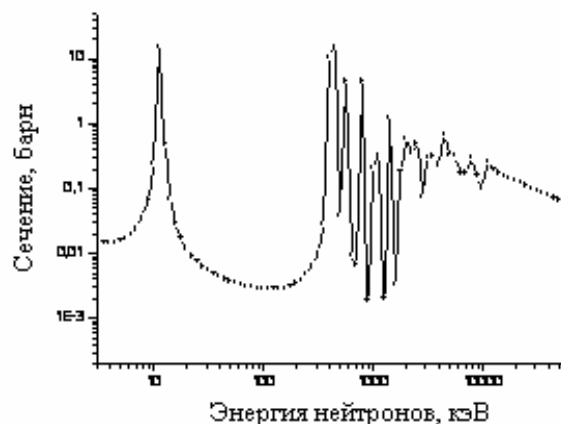


Рис.2. Резонансное сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo}$

Количественные оценки выполнены на основе решения уравнения возраста для точечного источника быстрых нейтронов, энергий и сечений резонансов радиационного захвата ^{98}Mo . Учтено влияние температуры мишени на форму резонансов (доплеровское уширение). Разработанная схема расчета позволяет аналитически оценить вклад разных частей спектра нейтронов в (n,γ) -активацию образца. В результате оказалось, что вклад резонансных нейтронов в полный выход (n,γ) -реакции на ^{98}Mo в рассмотренных условиях составляет около 36 % по сравнению с воздействием на молибден только тепловых нейтронов.

Дополнительная плотность потока нейтронов связана с тем, что в бериллии идет генерация нейтронов за счет реакции $^9\text{Be}(n,2n)$. Из-за того, что большая часть первичных нейтронов НГ имеет энергию выше порога реакции $^9\text{Be}(n,2n)$ (1,85 МэВ), число вторичных нейтронов достаточно велико. Ве-

личина прибавки составляет порядка 60 % [7] к числу первичных нейтронов. Отметим, что размещение цилиндрического отражателя из графита, окружающего замедлитель, также приводит к повышению плотности потока вблизи мишени на 10...15 % [7].

2. НАРАБОТКА И РАСПАД РАДИОНУКЛИДОВ

В реакции общего вида [1] $C+x \rightarrow D+y$ скорость образования нуклида D равна $dN_D = \sigma \Phi_0 N_C$, где σ – сечение реакции (см^2); Φ_0 – плотность потока частиц ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$); N_C – число облучаемых ядер; dN_D – число образующихся ядер. При этом принимается условие, что плотность потока и энергия бомбардирующих частиц в облучаемом образце постоянны, т.е. мишень считается тонкой, а число ядер N_C , претерпевающих превращение, пренебрежимо мало. При образовании РИ учитывают его распад за время облучения:

$$dN_D / dt = \sigma \Phi_0 N_C - \lambda N_D, \quad (3)$$

где λN_D – скорость распада РИ, λ – постоянная распада (с^{-1}).

Интегрирование этого уравнения в интервале времени $t = 0$ и $t = t_{\text{irr}}$ (t_{irr} – время облучения) и $N_D = 0$ при $t = 0$ дает:

$$N_D = \sigma \Phi_0 N_C (1 - \exp(-\lambda t_{\text{irr}})) / \lambda. \quad (4)$$

Количество образующихся при облучении ядер обычно выражается в единицах активности $A = \lambda N_D$ (число распадов в единицу времени):

$$A = \sigma \Phi_0 N_C (1 - \exp(-\lambda t_{\text{irr}})). \quad (5)$$

После облучения какое-то время t_{cool} (время охлаждения) затрачивается на транспортировку пробы к γ -спектрометру и «горячей камере». Сюда входит и время выдержки для распада мешающих анализу, более короткоживущих продуктов ядерных реакций и прочие временные задержки. В течение t_{cool} активность ^{99}Mo уменьшается

$$A = \sigma \Phi_0 N_C (1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}}) \exp(-\lambda t_{\text{cool}}). \quad (6)$$

В случае реального эксперимента, активность наработанного РИ определяется по количеству фотонов, соответствующих энергий, зарегистрированных гамма-спектрометром. Ясно, что активность в течение времени измерения t_m также снижается. В результате полная активность

$$A = \sigma \Phi_0 N_C (1 - e^{-\lambda t_{\text{irr}}}) \exp(-\lambda t_{\text{cool}}) (1 - e^{-\lambda t_m}). \quad (7)$$

Для вычисления активности изотопа ^{99}Mo (материнский РИ (A_M)), накопившегося в пробе за время облучения t_{irr} , использовалась формула (5), где $\Phi_0 = \Phi_{\text{cp}} = 0,95 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ – средняя величина потока нейтронов в облучаемой пробе, $\lambda_M = 2,92 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$ – постоянная радиоактивного распада ^{99}Mo , $\sigma = 0,13$ барн – сечение реакции на тепловых нейтронах. Оценки активности наработанного ^{99}Mo проведены для времени облучения 24 часа без учета, перечисленного в разделе 1.2 дополнительного вклада нейтронов. При этом активность ^{99}Mo составила $A_M^{(24)} = 18,0 \cdot 10^8$ Бк, а удельная активность $A_S = 4,16 \cdot 10^7$ Бк/г.

Для проверки правильности оценки наработки ^{99}Mo на НГ можно воспользоваться таблицей (37,3) [11], где приведены величины удельной активности ^{99}Mo для тепловых нейтронов $\Phi_0 = 10^{14}$ н. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ на мишени из ^{238}U за время работы реактора от 1 до 10 суток. Перерасчет величин удельной активности для других значений потока Φ_0^* проводится умножением величины удельной активности на коэффициент Φ_0^*/Φ_0 [11]. Сравнение расчетной и табличной величин показало их полное совпадение.

Как было сказано выше, плотность потока тепловых нейтронов в месте размещения образца ^{238}U заметно возрастает из-за дополнительного вклада нейтронов в наработку ^{99}Mo вследствие резонансов [9], отражателя из графита [7] и реакции $^{9}\text{Be}(n,2n)$ [7]. В результате плотность потока тепловых нейтронов достигнет величины

$\Phi_{\text{cp}} = 0,95 \cdot 10^{12} \cdot 1,36 \cdot 1,6 \cdot 1,15 \sim 2,38 \cdot 10^{12}$ нейтр. $\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, активность образца весом 43,25 г возрастет до $45,14 \cdot 10^8$ Бк, а $A_S \sim 10,44 \cdot 10^7$ Бк/г.

В то же время конструкция НГ позволяет активировать образцы весом до 100 г. Активность такого образца при тех же условиях облучения равна $104,36 \cdot 10^8$ Бк ($\sim 0,28$ Ки), а удельная активность $\sim 1,04 \cdot 10^8$ Бк/г.

Для сравнения приведем результаты активности и удельной активности ^{99}Mo , полученной при облучении образца на линейном ускорителе электронов ЛУЭ КУТ-30 для начальной энергии электронов 36 МэВ и среднего тока 260 мкА [6]. В таких экспериментальных условиях фотоядерный метод дает величину удельной активности $A_S \sim 6,25 \cdot 10^8$ Бк/г, т.е. эффективность наработки ^{99}Mo выше, чем ожидается на НГ. Что касается полученной активности, то линейный ускоритель КУТ-30 на мишени ^{238}U весом 30 г нарабатывает 0,5 Ки по сравнению с 0,28 Ки на нейтронном генераторе.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ^{99m}Tc

Метод разделения дочернего и материнского РИ обычно основывается на том, что они являются различными химическими элементами. Выделение радионуклида осуществляют с помощью методов хроматографии, экстракции или сублимации. Каждый раз после выделения дочерний РИ вновь накапливается в изотопном генераторе до равновесия, хотя и в меньшем количестве.

Экстракция ^{99m}Tc проводится, как правило, раз в сутки в течение 12-15 дней [1,2]. При этом следует иметь в виду, что извлечение ^{99m}Tc из изотопного генератора можно проводить и несколько раз в день, не дожидаясь максимального накопления радионуклида, поскольку уже через 6 часов достигается ~ 50 % от максимальной активности [2].

Максимальная активность дочернего РИ, равная активности материнского радионуклида, может быть достигнута по истечении времени t_{max} [2]:

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{\lambda_D - \lambda_M} \ln\left(\frac{\lambda_D}{\lambda_M}\right), \quad (8)$$

Подставляя соответствующие параметры ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$: $\lambda_D = 3,19 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $\lambda_M = 2,92 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$, получаем $t_{\text{max}} = 22,9 \text{ ч}$.

Активность дочернего изотопа при получении его в данный момент времени из изотопного генератора [12]

$$A_D = A_{M0} e^{-\lambda_M t} \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_M} [1 - e^{-(\lambda_D - \lambda_M)\tau}], \quad (9)$$

где A_{M0} – начальная активность материнского изотопа в момент зарядки генератора или в момент начала отсчета времени; t – время, прошедшее с начала отсчета до настоящего момента; τ – время, прошедшее с момента предыдущего выделения дочернего РИ из изотопного генератора (предполагается, что при этом отделении дочерний изотоп удаляется полностью). В случае ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ величина $\lambda_D/(\lambda_D - \lambda_M) = 1,10$, $(\lambda_D - \lambda_M) = 2,90 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $(\lambda_D - \lambda_M) \cdot \tau = 2,39$ (при постоянном временном интервале $\tau = 22,9 \text{ ч}$), $[1 - e^{-(\lambda_D - \lambda_M)\tau}] = [1 - 0,0916] = 0,908$, $\lambda_D/(\lambda_D - \lambda_M) \times [1 - e^{-(\lambda_D - \lambda_M)\tau}] = 1,1 \cdot 0,908 = 0,9988 \approx 1$.

После облучения образца ^{235}U в течение 24 часов потоком тепловых нейтронов $\Phi_{\text{cp}} \sim 2,38 \cdot 10^{12} \text{ нейтр. см}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ суммарная активность $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (при его десятикратной экстракции через каждые 22,9 ч из генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ составляет 0,936 Ки. Данная величина активности включает дополнительный вклад резонансных нейтронов, нейтронов реакции $^9\text{Be}(n,2n)$ и нейтронов, возникающих вследствие взаимодействия с отражателем из углерода.

С учетом того, что только 82,4 % ^{99}Mo переходит в $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [13], а полученный РИ излучает только 89 % терапевтических γ -квантов с энергией 140,5 кэВ [13], а также, принимая во внимание эффективность изотопного генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc} \sim 80\%$, определим поправочный множитель $k = 0,824 \cdot 0,89 \cdot 0,8 = 0,587$. Таким образом, суммарная активность РИ $0,936 \cdot k = 0,549 \text{ Ки}$.

В таблицах 1 и 1а приведено изменение активности ^{99}Mo в зависимости от времени и наработка $^{99\text{m}}\text{Tc}$ через каждые 22,9 ч с учетом коэффициента k . Начальная активность ^{99}Mo 0,28 Ки, № – номера выборки $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Таблица 1

Изменение активности ^{99}Mo и наработка $^{99\text{m}}\text{Tc}$

№	1	2	3	4	5
t, час	22,9	45,8	68,7	91,6	114,5
A_M , Ки	0,220	0,173	0,136	0,107	0,084
A_D , Ки	0,129	0,102	0,080	0,063	0,049

Таблица 1а

Изменение активности ^{99}Mo и наработка $^{99\text{m}}\text{Tc}$

№	6	7	8	9	10
t, час	137,4	160,3	183,2	206,1	229
A_M , Ки	0,066	0,052	0,041	0,032	0,025
A_D , Ки	0,039	0,031	0,024	0,019	0,015

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одноразовая диагностика разных систем жизнедеятельности человека с помощью $^{99\text{m}}\text{Tc}$ требует соответствующей активности радиофармпрепарата. Например [14], для исследования сердечно-

сосудистой системы нужна активность $\sim 55 \text{ МБк}$. Для диагностики центральной нервной системы используют $\sim 40 \text{ МБк}$. Скенограмма опухоли головного мозга требует $\sim 370 \text{ МБк}$ и т. д.

Если учесть, что средняя диагностическая доза $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 10 мКи [1], то суммарная активность 0,549 Ки (при ежедневной экстракции в течение ~ 10 дней) позволяет, в принципе, провести диагностику у 55 пациентов. Причем в первое выделение можно осуществить процедуры у 13 больных, во второе – у 10, в третье – у 8 пациентов и т.д. Число возможных процедур увеличится, если потребуются диагностировать болезни органов человека, требующие активности меньшую, чем средняя доза.

Следует помнить, что реальные показатели наработанной активности $^{99\text{m}}\text{Tc}$ будут отличаться от идеального случая. Это, в частности, связано с тем, что расчеты не учитывают время доставки образца после отключения НГ в «горячую камеру», его охлаждение для уменьшения активности короткоживущих продуктов реакции, подготовку к экстракции $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Не учтено также время, необходимое для проведения очередной выборки до момента доставки готового РФП пациенту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность применения НГ ННЦ ХФТИ для получения ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ на основе ядерной реакции $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo}$. Показано, что при облучении металлического молибдена естественного изотопного состава весом 100 г тепловыми нейтронами с начальной плотностью потока $1 \cdot 10^{12} \text{ нейтр. см}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ в течение 24 ч, нарабатывается активность $\sim 0,28 \text{ Ки}$ (удельная активность $\sim 10,44 \cdot 10^7 \text{ Бк/г}$). Суммарная активность $^{99\text{m}}\text{Tc}$ при десятикратной экстракции через каждые 22,9 ч составит в идеальном случае около 0,55 Ки. Увеличить выход $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ можно за счет активации обогащенной ^{98}Mo мишени путем изменения времени облучения ^{99}Mo $t_{\text{irr}} \geq T_{1/2}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Ю. Баранов. *Изотопы II*. М.: «Физматлит». 2005, 727с.
2. В.А. Соколов. *Генераторы короткоживущих изотопов*. М.: «Атомиздат». 1975, 113с.
3. Д.Ю. Чувилин, В.А. Загрядский. Новый способ производства ^{99}Mo в жидкосольевом фторидном топливе // *Атомная энергия*. 2009, т.107, с.46-154.
4. О. Прилепина. *Атомная медицина*. 2011. http://www.vechnayamolodost.ru/pages/investiciiive_nchur/atomnajamedicinaaaa.html
5. Ralph G. Bennett, Jerry D. Christian, David A. Petti, et al. A System of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ production based on distributed electron accelerators and thermal separation // *Nucl. Technology*. 1999, v.126, p.102-121.
6. N.I. Ayzatskiy, N.P. Diky, A.N. Dovbnya, et al. ^{99}Mo and ^{67}Cu isotope yields under production conditions on NSC KIPT electron accelerator KUT-30 // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nucl. Phys. Invest»*. 2010, №2(53), p.140-144.

7. В.А. Цымбал, Н.Д. Масалитин, С.А. Письменецкий и др. Оптимизация мишенного устройства источника нейтронов для максимальной наработки ^{99}Mo // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2009, №880, с.45-50.
8. Д. Блан. *Ядра, частицы, ядерные реакторы*. Москва: «Мир», 1989, 335с.
9. И.С. Григорьев и др. *Физические величины*. Москва: «Энергоатомиздат», 1991, 1232с.
10. А.Н. Довбня, В.А. Цымбал, Н.Д. Масалитин и др. Вклад резонансных нейтронов в активацию Mo на нейтронном генераторе // *Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2009, №880, с.51-55.
11. А.С. Герасимов, Т.С. Зарицкая, А.П. Рудик. *Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, 575с.
12. В.И. Левин. *Получение радиоактивных изотопов*. М.: «Атомиздат», 1972, 256 с.
13. <http://www.nndc.bnl.gov>
14. П.А. Демченко, В.А. Воронко, В.Я. Мигаленя и др. Применение малогабаритных линейных ускорителей для медицинских целей // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1997, в.4,5(31,32), с.168-170.

Статья поступила в редакцию 15.09.2011 г.

ESTIMATION OF ^{99}Mo AND $^{99\text{m}}\text{Tc}$ PRODUCTION ON KIPT $^9\text{Be(d,n)}$ GENERATOR

E.L. Kuplennikov, A.N. Dovbnya, V.A. Tsymbal, S.S. Kandybei, A.F. Stoyanov

A possibility of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ isotope production by using thermal neutron flux of NSC KIPT neutron generator based on $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$ nuclear reaction is considered. An estimation of ^{99}Mo radionuclide production on natural molybdenum target was done for 24 hours duration of irradiation. The activity of ^{99}Mo was obtained for the initial neutron flux density of $1 \cdot 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Estimation of molybdenum yield was performed for two samples with weight 43.25 and 100 g. Additional neutron contributions of the resonances, $^9\text{Be}(n,2n)$ reaction, ^{12}C reflector are taken into account. The accumulated activity of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ was defined for the tenfold extraction of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ from isotope generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ every 22.9 hours.

ОЦІНКА НАПРАЦЮВАННЯ ^{99}Mo ТА $^{99\text{m}}\text{Tc}$ НА $^9\text{Be(d,n)}$ ГЕНЕРАТОРІ ХФТІ

Е.Л. Купленников, А.М. Довбня, В.А. Цымбал, С.С. Кандибей, О.Ф. Стоянов

Розглянута можливість напрацювання ізоотопів ^{99}Mo та $^{99\text{m}}\text{Tc}$ за допомогою теплових нейтронів нейтронного генератора ННЦ ХФТІ на основі ядерної реакції $^{98}\text{Mo}(n\gamma)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$. Оцінка напрацювання радіонукліда ^{99}Mo на мішені з молібдену природного ізотопного складу проведена для часу опромінення 24 години і щільності потоку нейтронів $1 \cdot 10^{12} \text{ нейтр.} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Вихід ^{99}Mo оцінювався для двох зразків вагою 43,25 та 100 г. Враховано додатковий внесок резонансних нейтронів, нейтронів реакції $^9\text{Be}(n,2n)$ та ^{12}C рефлектора. Активність напрацьованого $^{99\text{m}}\text{Tc}$ визначена для десятикратної екстракції $^{99\text{m}}\text{Tc}$ з ізотопного генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ через кожні 22,9 години.