

DOI: 10.18721/JPM.14207
УДК 539.1.03

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПА МЕДИ-64 ИЗ ПРИРОДНОГО НИКЕЛЯ НА ЦИКЛОТРОНЕ

А. Тиба, Я.А. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена проблеме разработки технологии получения изотопа ^{64}Cu , важного для применения в ядерной медицине, путем циклотронного облучения протонами мишени из природного никеля. С этой целью проанализирована энергетическая зависимость сечений взаимодействия протонов, обладающих начальной кинетической энергией 10 – 15 МэВ, с мишенью из никеля (природная смесь изотопов). Кроме того, рассмотрены величины периодов полураспада образующихся изотопов. На основе проведенного анализа определены оптимальные условия получения изотопа ^{64}Cu (энергия пучка протонов и время выдержки после облучения) из природного никеля. Установлено, что в условиях, близких к идеальным (случай полного отделения изотопов никеля и кобальта от требуемого изотопа меди) можно ожидать, что радионуклидная чистота изотопа ^{64}Cu будет очень высокой и достигать не менее 99 %.

Ключевые слова: изотоп меди-64, циклотронное облучение, никелевая мишень, радионуклидная чистота, расчет выхода

Ссылка при цитировании: Тиба А., Бердников Я.А. Оптимизация получения изотопа меди-64 из природного никеля на циклотроне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 2. С. 81–89. DOI: 10.18721/JPM.14207

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

OPTIMIZATION OF THE COPPER-64 PRODUCTION FROM NATURAL NICKEL TARGET AT A CYCLOTRON

A. Tiba, Ya.A. Berdnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper is devoted to the problem of the copper-64 isotope production engineering that is important for application in the nuclear medicine. The production is carried out by proton irradiation of a nickel target (a natural mixture of isotopes). For this purpose, the energy dependence of the protons-nickel target interaction cross-sections, protons with initial kinetic energies of 10–15 MeV in this case, has been analyzed. Besides, the half-lives of the resulting isotopes were considered. Based on the analysis, the optimal conditions (the proton beam energy and the waiting time after irradiation) for obtaining the ^{64}Cu isotope from natural nickel were found. It was established that under conditions close to ideal, it could be expected that ^{64}Cu radionuclide purity would be very high and reach at least 99 %. Ideal conditions mean complete separation of nickel and cobalt isotopes from the required copper one.

Keywords: copper-64 isotope, cyclotron irradiation, nickel target, radionuclide purity, yield calculation

Citation: Tiba A., Berdnikov Ya.A., Optimization of the copper-64 production from natural nickel target at a cyclotron, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (2) (2021) 81–89. DOI: 10.18721/JPM.14207

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Хорошо известно, что изотоп ^{64}Cu испытывает радиоактивное превращение в результате трех процессов: позитронного и электронного распада и захвата электронов. Указанный изотоп испускает β^+ -, β^- -частицы (их энергии равны соответственно 0,65 и 0,57 МэВ, а значения выхода 17,6 и 38,5 %) с периодом полураспада 12,7 ч. Он играет важную роль среди бифункциональных радиоизотопов как для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), так и для лучевой радионуклидной терапии. Период полураспада ^{64}Cu позволяет производить этот изотоп на региональных или национальных циклотронных установках и распределять его по местным отделениям ядерной медицины с потерей не более одного (примерно) периода полураспада [1, 2].

Кроме того, период полураспада изотопа ^{64}Cu совместим с временными масштабами, необходимыми для введения радиофармпрепарата (содержащего молекулярный носитель: пептиды, антитела, наночастицы и т. п.), его распределения в теле пациента и накопления в организме.

Изотоп ^{64}Cu лучше подходит для ПЭТ-визуализации высокого разрешения, чем для терапии, благодаря его низкой средней энергии β^+ -частиц (278 кэВ) и очень низкой интенсивности сопутствующего гамма-излучения (1345,77 кэВ, с выходом 0,475 %). В то же время, его средняя энергия β^- -частиц подходит для радионуклидной терапии небольших опухолей [1, 2].

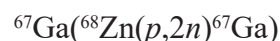
Изотоп ^{64}Cu имеет многочисленные преимущества перед ПЭТ-изотопами ^{18}F (его период полураспада $t_{1/2} = 109,8$ мин) и ^{11}C ($t_{1/2} = 20,4$ мин), используемыми в настоящее время в клиниках. Поскольку период полураспада как ^{18}F , так и ^{11}C относительно мал, эти изотопы обычно готовятся на циклотронах, расположенных рядом с клиниками.

Изотоп ^{64}Cu может быть получен на реакторе с помощью реакции захвата тепловых нейтронов $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ или с помощью реакции быстрых нейтронов $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$.

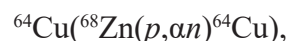
Однако выходы реакций для получения ^{64}Cu на ядерном реакторе низки [3].

Следует отметить, что в настоящее время для производства ^{64}Cu используются два циклотронных метода. Один из них основан на использовании в качестве мишени изотопа ^{64}Ni , а другой – изотопа ^{68}Zn .

Производство изотопа ^{64}Cu на основе реакции $^{68}\text{Zn}(p,\alpha n)^{64}\text{Cu}$ с использованием протонов имеет определенные преимущества, поскольку в этом случае возможна одновременная наработка используемых в медицине изотопов



и



производимых из одной и той же мишени [5].

Однако у этого метода есть ряд недостатков:

во-первых, требуется наличие циклотрона с более высокой энергией – 30 МэВ;

во-вторых, возникает необходимость сложного радиохимического разделения;

в-третьих, производство изотопов в этом случае дает высокое загрязнение (в виде отходов) от нескольких радионуклидных примесей;

в-четвертых, выход изотопов ^{64}Cu невелик, поскольку сечение реакции мало (около 20 мб при энергии протонов 30 МэВ) [5, 6].

Как было отмечено выше, для получения ^{64}Cu возможно использование реакции $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ как на природной, так и на никелевой мишени, обогащенной изотопом ^{64}Ni , с использованием относительно низкой энергии протонов – 10 МэВ (это существенно ниже 30 МэВ). Недостатком использования мишени, обогащенной ^{64}Ni , является очень высокая цена изотопа ^{64}Ni [4].

Использование относительно дешевой мишени из природного никеля представляется более привлекательным, но недостатком в этом случае выступает низкое содержа-

ние изотопа ^{64}Ni в мишени и, следовательно, недостаточно высокая эффективность производства ^{64}Cu , а также образование большого количества других примесей в процессе облучения и требования к сложным химическим процедурам для разделения и выделения ^{64}Cu из этих примесей [5].

Однако правильный выбор начальной энергии протонов, соответствующей максимуму величины сечения реакции $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ (647 мб при энергии 10,5 МэВ [11]), и оптимизация времени выдержки после облучения позволяют в значительной степени обойти это трудности.

Целью настоящей работы является анализ возможностей и оптимизация получения изотопа ^{64}Cu из природного никеля с использованием протонов с энергией 10 – 15 МэВ на циклотроне МГЦ-20 Санкт-Петербургского политехнического университета.

Методика анализа выхода изотопов в никелевой мишени (природная смесь) при облучении пучком протонов с энергией 10 – 15 МэВ

Как было отмечено выше, для получения изотопа ^{64}Cu можно использовать пучок протонов с энергией 10 – 15 МэВ. Мишенью служит природная смесь изотопов никеля: ^{58}Ni (68 %), ^{60}Ni (26 %), ^{61}Ni (1,14 %), ^{62}Ni (3,71 %) и ^{64}Ni (0,926 %) [7].

Протоны с энергиями 10 – 15 МэВ могут вызывать в мишени различные ядерные реакции на разных изотопах никеля и таким образом приводить к образованию разных изотопов в качестве побочных продуктов, которые будут мешать как процессу выделения изотопа ^{64}Cu из смеси полученных изотопов, так и определению количества наработанного изотопа ^{64}Cu спектрометрическими методами.

Из вышеизложенного следует, что полезно знать суммарный выход каждого из изотопов в результате различных реакций (см. табл. 1) и сравнивать его с выходом изотопа ^{64}Cu . Изотопы, образующиеся в мишени при облучении протонами природной смеси изотопов никеля, приведены в табл. 1 [8 – 12].

При определении выходов изотопов при облучении протонами природной смеси изотопов никеля, необходимо учитывать потери энергии протона на возбуждение и ионизацию при прохождении через вещество мишени [13]:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{nz^2}{\beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} \right) \right], \quad (1)$$

где $-dE/dx$, МэВ/см, – удельные ионизационные потери (x – глубина проникновения протонов); z – зарядовые числа снаряда; m_e , г, – масса электрона; e , Кл, – заряд электрона; c , см/с, – скорость света; β – отношение скорости снаряда к скорости света ($\beta = v/c$); I , эВ, – средний ионизационный потенциал; ϵ_0 , Ф/м, – электрическая постоянная; n , см $^{-3}$, – электронная концентрация мишени,

$$n = \frac{N_A Z \rho}{A M_u};$$

N_A , 1/мол, – постоянная Авогадро; ρ , г/см 3 , – плотность мишени; Z – зарядовые числа мишени; A – атомная масса; M_u , г/мол, – молярная масса.

Средний ионизационный потенциал никеля составляет, как и средний ионизационный потенциал для других элементов, $I = 328 \pm 10$ эВ [14].

В нерелятивистском случае $\beta^2 \ll 1$, и с учетом того, что частицей-снарядом является протон ($z = 1$), формула (1) упрощается:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = \left(\frac{144\rho Z z^2}{AE} \right) \ln \left[\frac{2179E}{I} \right]. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) дает зависимость $E(x)$ – средней энергии протонов E от глубины x .

Наработка всех изотопов на различной

Таблица 1

**Характеристики изотопов, образующихся в мишени
в результате ядерных реакций при облучении протонами p
природной смеси изотопов никеля [8 – 12]**

Изотоп	Период полураспада	Ядерная реакция	E_{thr} , МэВ	σ , мб, при энергии	
				15 МэВ	10 МэВ
^{55}Co	17,5 ч	$^{58}\text{Ni}(p,\alpha)$	1,36	35,7	8,7
^{57}Co	271,74 сут	$^{58}\text{Ni}(p,2p)$	8,3	149,3	4,9
		$^{58}\text{Ni}(p,p+n)^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co}$	12,3		
		$^{60}\text{Ni}(p,\alpha)$	0,3		
		$^{61}\text{Ni}(p,n+\alpha)$	8,2		
		$^{62}\text{Ni}(p,2n+\alpha)$	18,9		
		$^{58}\text{Ni}(p,d)$	10,0		
^{58}Co	70,86 сут	$^{61}\text{Ni}(p,\alpha)$	0,7	0,88	0,78
		$^{62}\text{Ni}(p,\alpha+n)$	10,3		
^{57}Ni	35,6 ч	$^{58}\text{Ni}(p,p+n)$	12,4	8,8	–
		$^{58}\text{Ni}(p,d)$	10,1		
^{60}Cu	23,7 мин	$^{64}\text{Ni}(p,n)$	7,0	58,8	79,8
^{61}Cu	3,3 ч	$^{61}\text{Ni}(p,n)$	3,1	186	472
		$^{62}\text{Ni}(p,2n)$	13,0		
^{62}Cu	9,67 мин	$^{62}\text{Ni}(p,n)$	5,0	359,3	498,9
^{64}Cu	12,7 ч	$^{64}\text{Ni}(p,n)$	2,5	206,0	647,0

Обозначения: E_{thr} – пороговая энергия реакции, σ – сечение реакции (для двух значений начальной кинетической энергии протонного пучка).

глубине мишени при этом будет определяться по следующей формуле [15]:

$$N_i(\tau, t_{rad}) = \int_0^\tau dx \left\{ \frac{dN_i}{dx} \right\}. \quad (4)$$

$$\frac{dN_i}{dx} = \left(\frac{Jn_f}{\lambda e} \right) (1 - \exp(-t_{rad}\lambda)) \sigma(x), \quad (3)$$

где N_i , см⁻³, – количество атомов типа i производимого радиоизотопа; J , А, – ток циклотрона; n_f – концентрация ядер изотопа никеля в природном никеле; λ , с⁻¹, – постоянная распада производимого радионуклида; t_{rad} , с, – время облучения мишени.

Интегрируя распределение (3) от нуля до толщины мишени τ , получим зависимость наработки производимых радиоизотопов в мишени толщиной τ :

Уменьшением потока протонов с глубиной, а также наличием других процессов, выводящих протоны из пучка, в данном случае можно пренебречь.

С помощью уравнений (2), (4) и значений сечения реакций σ (см. табл. 1), была определена активность каждого изотопа при использовании протонов с начальными кинетическими энергиями 15 (рис. 1, a,b) и 10 МэВ (рис. 1, c,d), тока циклотрона, равного 2 мкА, и мишени из природного никеля. На рис. 1 представлены результаты вычисления активности изотопов ^{55}Co и ^{64}Cu для мишеней различной толщины и различных времен облучения.

Анализ рис. 1 показывает, что для началь-

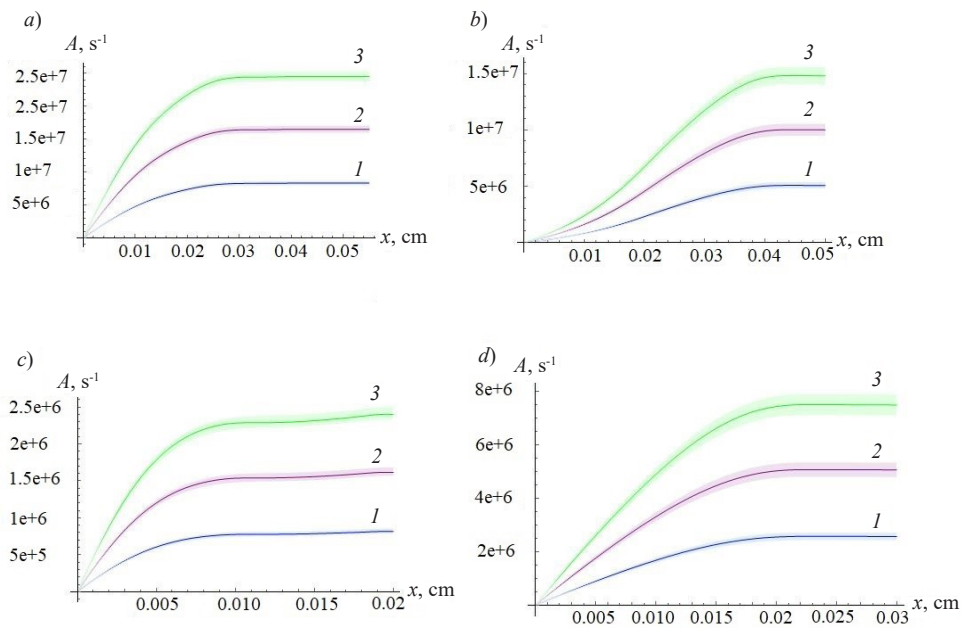


Рис. 1. Зависимости наработанной активности радиоизотопов ^{55}Co (a,c) и ^{64}Cu (b,d) от толщины мишени из природного никеля при использовании протонов с начальной кинетической энергией 15 МэВ (a,b) и 10 МэВ (c,d), для различного времени облучения, ч: 0,5 (1), 1,0 (2), 1,5 (3).
 Линиями показаны кривые зависимостей, а полосами – погрешности их определения (связаны с погрешностями нахождения сечения реакции)

ной энергии протонов 15 МэВ достаточной толщиной мишени является значение 400 мкм, при которой пропадает зависимость наработанной активности от толщины мишени. При начальной энергии 10 МэВ это значение составляет 200 мкм.

Для расчета активности каждого изотопа после окончания облучения и после различных времени ожидания использовалось уравнение

$$A_t = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

где A_0 , с^{-1} , – активность изотопа при $t = 0$; A_t , с^{-1} , – активность изотопа после времени ожидания t , с; λ , с^{-1} , – постоянная распада изотопа.

Результаты вычислений активности и отношений активностей наработанных изотопов к активности наработанного изотопа ^{64}Cu для различных времен выдержки после окончания облучения приведены в табл. 2 (время облучения мишени – 1,5 ч, $E = 15$ и

10 МэВ, ток циклотрона – 2 мкА).

После завершения облучения никелевой мишени (природная смесь изотопов) необходимо провести процедуру выделения изотопа ^{64}Cu из мишени. Обычно это делается с помощью хорошо известного метода хроматографии на колонке ионообменной смолы (Dowex1-8X [1] или AG1-X8 [16]). Поскольку в мишени при облучении образуется ряд радиоизотопов с малым периодом полураспада (см. табл. 1), целесообразно перед хроматографией выдержать мишень в течение 12 – 17 ч (как это следует из данных табл. 2) с целью ослабления активности изотопов ^{60}Cu и ^{62}Cu . При этом достигается их ослабление более чем в 1 млн. раз. Процесс химического разделения занимает в среднем около 20 ч. Как следует из данных табл. 2, можно достичь очень высокой радионуклидной чистоты изотопа ^{64}Cu , не менее 99 %, если полностью отделить его (идеальный случай) от изотопов никеля и кобальта).

Сравнение значений активности наработанных изотопов, образующихся в мишени в результате ядерных реакций при облучении природной смеси изотопов никеля протонами

Изотоп	Активность A_i, c^{-1} (Отношение $A_i/A_i(^{64}\text{Cu})$)						
	$t=0$	$t=9,67$ мин	$t=23,7$ мин	$t=3,3$ ч	$t=12,7$ ч	$t=17,5$ ч	$t=50$ ч
<i>Начальная кинетическая энергия пучка протонов – 15 МэВ</i>							
^{55}Co	$\frac{2,5 \cdot 10^7}{(2,3)}$	$\frac{2,4 \cdot 10^7}{(2,4)}$	$\frac{2,4 \cdot 10^7}{(2,5)}$	$\frac{2,1 \cdot 10^7}{(2,3)}$	$\frac{1,5 \cdot 10^7}{(2,8)}$	$\frac{1,2 \cdot 10^7}{(2,85)}$	$\frac{3,4 \cdot 10^6}{(4,8)}$
^{57}Co	$\frac{2,3 \cdot 10^5}{(0,02)}$	$\frac{229996}{(0,02)}$	$\frac{229990}{(0,02)}$	$\frac{229919}{(0,02)}$	$\frac{229689}{(0,04)}$	$\frac{229572}{(0,05)}$	$\frac{229781}{(0,32)}$
^{58}Co	$\frac{17500}{(0,002)}$	$\frac{17498}{(0,002)}$	$\frac{17497}{(0,002)}$	$\frac{17476}{(0,001)}$	$\frac{17409}{(0,003)}$	$\frac{17375}{(0,004)}$	$\frac{17147}{(0,02)}$
^{57}Ni	$\frac{4,15 \cdot 10^5}{(0,04)}$	$\frac{413699}{(0,04)}$	$\frac{413819}{(0,038)}$	$\frac{389166}{(0,04)}$	$\frac{324061}{(0,06)}$	$\frac{295139}{(0,07)}$	$\frac{156722}{(0,22)}$
^{60}Cu	$\frac{6,0 \cdot 10^8}{(54,5)}$	$\frac{4,5 \cdot 10^8}{(45,0)}$	$\frac{3,0 \cdot 10^8}{(28,0)}$	$\frac{1,8 \cdot 10^6}{(0,19)}$	–	–	–
^{61}Cu	$\frac{3,7 \cdot 10^7}{(3,4)}$	$\frac{3,5 \cdot 10^7}{(3,5)}$	$\frac{3,4 \cdot 10^7}{(3,2)}$	$\frac{1,8 \cdot 10^7}{(1,9)}$	$\frac{2,5 \cdot 10^6}{(0,5)}$	$\frac{9,3 \cdot 10^5}{(0,2)}$	$\frac{1024}{(0,001)}$
^{62}Cu	$\frac{5,7 \cdot 10^8}{(51,8)}$	$\frac{2,8 \cdot 10^8}{(28)}$	$\frac{1,0 \cdot 10^8}{(9,3)}$	–	–	–	–
^{64}Cu	$\frac{1,1 \cdot 10^7}{(1,0)}$	$\frac{1,09 \cdot 10^7}{(1,0)}$	$\frac{1,07 \cdot 10^7}{(1,0)}$	$\frac{9,1 \cdot 10^7}{(1,0)}$	$\frac{5,4 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{4,2 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{7,0 \cdot 10^5}{(1,0)}$
<i>Начальная кинетическая энергия пучка протонов – 10 МэВ</i>							
^{55}Co	$\frac{2,4 \cdot 10^6}{(0,30)}$	$\frac{2,4 \cdot 10^6}{(0,32)}$	$\frac{2,3 \cdot 10^6}{(0,30)}$	$\frac{2,1 \cdot 10^6}{(0,30)}$	$\frac{1,5 \cdot 10^6}{(0,40)}$	$\frac{1,2 \cdot 10^5}{(0,40)}$	$\frac{3,3 \cdot 10^5}{(0,66)}$
^{57}Co	$\frac{12500}{(0,001)}$	$\frac{12499}{(0,001)}$	$\frac{12499}{(0,001)}$	$\frac{12495}{(0,001)}$	$\frac{12483}{(0,003)}$	$\frac{12476}{(0,004)}$	$\frac{12433}{(0,02)}$
^{58}Co	$\frac{5500}{(0,0007)}$	$\frac{5499}{(0,0007)}$	$\frac{5499}{(0,0007)}$	$\frac{5492}{(0,0008)}$	$\frac{5471}{(0,001)}$	$\frac{5460}{(0,001)}$	$\frac{5389}{(0,01)}$
^{60}Cu	$\frac{1,8 \cdot 10^8}{(24,0)}$	$\frac{1,3 \cdot 10^8}{(17,5)}$	$\frac{9,0 \cdot 10^7}{(12,3)}$	$\frac{5,5 \cdot 10^5}{(0,08)}$	–	–	–
^{61}Cu	$\frac{2,2 \cdot 10^7}{(2,90)}$	$\frac{2,1 \cdot 10^7}{(2,83)}$	$\frac{2,0 \cdot 10^7}{(2,74)}$	$\frac{1,1 \cdot 10^7}{(1,70)}$	$\frac{1,5 \cdot 10^6}{(0,4)}$	$\frac{5,5 \cdot 10^5}{(0,2)}$	$\frac{609}{(0,001)}$
^{62}Cu	$\frac{2,9 \cdot 10^8}{(38,6)}$	$\frac{1,4 \cdot 10^8}{(19,0)}$	$\frac{5,3 \cdot 10^7}{(7,3)}$	–	–	–	–
^{64}Cu	$\frac{7,5 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{7,4 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{7,3 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{6,3 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{3,7 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{2,8 \cdot 10^6}{(1,0)}$	$\frac{0,5 \cdot 10^6}{(1,0)}$

Пр и м е ч а н и я. 1. Представлены значения активности наработанных изотопов A_i , а также отношений величины A_i к соответствующей активности наработанного изотопа ^{64}Cu (в скобках) для различных времен выдержки t после окончания облучения. 2. Время облучения мишени – 1,5 ч, ток циклотрона – 2 мкА. 3. Прочерки обозначают, что активность изотопа ниже 1 распада в секунду.



Заключение

В настоящей работе выполнен анализ технологии получения изотопа ^{64}Cu , важного для применения в ядерной медицине, путем циклотронного облучения протонами мишени из природного никеля (значения начальной кинетической энергии протонного пучка – 10 и 15 МэВ, ток циклотрона – 2 мкА) для различных периодов времени облучения. Установлено, что в условиях, близких к идеальным (случай полного отделения изотопов никеля и кобальта от требуемого изотопа

меди) можно ожидать, что радионуклидная чистота изотопа ^{64}Cu будет очень высокой и достигать не менее 99 %.

Благодарность

Авторы благодарят Анатолия Юрьевича Егорова, ассистента Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, за полезные советы и содержательные обсуждения материалов проведенного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szucs Z., Takacs S., Alirezapour B. Development of cost-effective method for production of ^{64}Cu from nat. Ni // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 302. No. 2. Pp. 1035–1038.
2. Jalilian A.R., Jr J.O. The current status and future of theranostic copper-64 radiopharmaceuticals // *Iran Journal of Nuclear Medicine*. 2017. Vol. 25. No. 1. Pp. 1–10.
3. Qaim S.M. The present and future of medical radionuclide production // *Radiochimica Acta*. 2012. Vol. 100. No. 9. Pp. 635–651.
4. Ma M.T., Donnelly P.S. Peptide targeted copper-64 radiopharmaceuticals // *Journal of Current Topics in Medicinal Chemistry*. 2011. Vol. 11. No. 5. Pp. 500–520.
5. Van So Le., Howse J., Zaw M., Pellegrini P., Katsifis A., Greguric I., Weiner R. Alternative method for ^{64}Cu radioisotope production // *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2009. Vol. 67. No. 7. Pp. 1324–1331.
6. Hilgers K., Stoll T., Skakun Y., Coenen H.H., Qaim S.M. Cross-section measurements of the nuclear reactions nat. Zn(d,x) ^{64}Cu , $^{66}\text{Zn}(d,a)^{64}\text{Cu}$ and $^{68}\text{Zn}(p,\alpha)^{64}\text{Cu}$ for production of ^{64}Cu and technical developments for small-scale production of ^{67}Cu via the $^{70}\text{Zn}(p,\alpha)^{67}\text{Cu}$ process // *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2003. Vol. 59. No. 6. Pp. 343–351.
7. Rosman K.J.R., Taylor P.D.P. Isotopic compositions of the elements // *Pure and Applied Chemistry*. 1998. Vol. 70. No. 1. Pp. 217–235.
8. Amjed N., Hussain M., Aslam M.N., Tarkanyi F., Qaim S.M. Evaluation of nuclear reaction cross sections for optimization of production of the emerging diagnostic radionuclide ^{55}Co // *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2016. Vol. 108. February. Pp. 38–48.
9. Tarkányi F.T., Ignatyuk A.V., Hermanne A., et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic positron emitters // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019. Vol. 319. No. 2. Pp. 533–666.
10. Khandaker M.U., Kim K., Lee M., Kim K.S., Kim G. Excitation functions of (p,x) reactions on natural nickel up to 40 MeV // *Journal of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Part B*. 2011. Vol. 269. No. 10. Pp. 1140–1149.
11. Aslam M.N., Sudár S., Hussain M., Malik A.A., Shah H.A., Qaim S.M. Charged particle induced reaction cross section data for production of the emerging medically important positron emitter ^{64}Cu : A comprehensive evaluation // *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. No. 12. Pp. 669–686.
12. Uddin M.S., Chakraborty A.K., Spellerberg San, Shariff M.A., Das S., Rashid M.A., Spahn I., Qaim S.M. Experimental determination of proton induced reaction cross sections on nat. Ni near threshold energy // *Radiochimica Acta*. 2016. Vol. 104. No. 5. Pp. 305–314.
13. Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K., et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // *Physical Review. D*. 2018. Vol. 98. No. 3. P. 030001.

14. **Seltzer S.M., Berger M.J.** Evaluation of the collision stopping power of elements and compounds for electrons and positrons // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 1982. Vol. 33. No. 11. Pp. 1189–1218.

15. International Atomic Energy Agency. Cyclotron produced radionuclides: physical charac-

teristics and production methods. Technical Reports Series. No. 468. Vienna: IAEA, 2009. 266 p.

16. **Jeffery C.M., Smith S.V., Asad A.H., Chana S., Price R.I.** Routine production of copper-64 using 11.7 MeV protons // AIP (American Institute of Physics). Conference Proceedings. 2012. Vol. 1509. No. 84. Pp. 84–90.

Статья поступила в редакцию 14.05.2021, принята к публикации 26.05.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИБА Али – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alitiba1991@gmail.com

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
berdnikov@spbstu.ru

REFERENCES

1. **Szucs Z., Takacs S., Alirezapour B.**, Development of cost-effective method for production of ^{64}Cu from nat. Ni, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 302 (2) (2014) 1035–1038.

2. **Jalilian A.R., Jr J.O.**, The current status and future of theranostic copper-64 radiopharmaceuticals, Iran Journal of Nuclear Medicine. 25 (1) (2017) 1–10.

3. **Qaim S.M.**, The present and future of medical radionuclide production, Radiochimica Acta. 100 (9) (2012) 635–651.

4. **Ma M.T., Donnelly P.S.**, Peptide targeted copper-64 radiopharmaceuticals, Journal of Current Topics in Medicinal Chemistry. 11 (5) (2011) 500–520.

5. **Van So Le, Howse J., Zaw M., et al.**, Alternative method for ^{64}Cu radioisotope production, Journal of Applied Radiation and Isotopes. 67 (7) (2009) 1324–1331.

6. **Hilgers K., Stoll T., Skakun Y., et al.**, Cross-section measurements of the nuclear reactions nat. $\text{Zn}(d,x)^{64}\text{Cu}$, $^{66}\text{Zn}(d,a)^{64}\text{Cu}$ and $^{68}\text{Zn}(p,an)^{64}\text{Cu}$ for production of ^{64}Cu and techni-

cal developments for small-scale production of ^{67}Cu via the $^{70}\text{Zn}(p,a)^{67}\text{Cu}$ process, Journal of Applied Radiation and Isotopes. 59 (6) (2003) 343–351.

7. **Rosman K.J.R., Taylor P.D.P.**, Isotopic compositions of the elements, Pure and Applied Chemistry. 70 (1) (1998) 217–235.

8. **Amjed N., Hussain M., Aslam M.N., et al.**, Evaluation of nuclear reaction cross sections for optimization of production of the emerging diagnostic radionuclide ^{55}Co , Journal of Applied Radiation and Isotopes. 108 (February) (2016) 38–48.

9. **Tarkányi F.T., Ignatyuk A.V., Hermanne A., et al.**, Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic positron emitters, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 319 (2) (2019) 533–666.

10. **Khandaker M.U., Kim K., Lee M., et al.**, Excitation functions of (p,x) reactions on natural nickel up to 40 MeV, Journal of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Part B. 269 (10) (2011) 1140–1149.

11. **Aslam M.N., Sudár S., Hussain M., et al.**, Charged particle induced reaction cross section da-



ta for production of the emerging medically important positron emitter ^{64}Cu : A comprehensive evaluation, *Radiochimica Acta*. 97 (12) (2009) 669–686.

12. **Uddin M.S., Chakraborty A.K., Spellerberg San, et al.**, Experimental determination of proton induced reaction cross sections on nat. Ni near threshold energy, *Radiochimica Acta*. 104 (5) (2016) 305–314.

13. **Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K., et al.** (Particle Data Group), Review of Particle Physics, *Physical Review, D*. 98 (3) (2018) 030001.

14. **Seltzer S.M., Berger M.J.**, Evaluation of

the collision stopping power of elements and compounds for electrons and positrons, *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 33 (11) (1982) 1189–1218.

15. International Atomic Energy Agency, Cyclotron produced radionuclides: physical characteristics and production methods, Technical Reports Series. No. 468. IAEA, Vienna, 2009.

16. **Jeffery C.M., Smith S.V., Asad A.H., et al.**, Routine production of copper-64 using 11.7 MeV protons, *AIP (American Institute of Physics). Conference Proceedings*. 1509 (84) (2012) 84–90.

Received 14.05.2021, accepted 26.05.2021.

THE AUTHORS

TIBA Ali

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

alitiba1991@gmail.com

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

berdnikov@spbstu.ru