

КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИИЗОТОПНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

*А. Н. Довбня, В. И. Никифоров, В. Л. Уваров*¹

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Проанализирована эффективность производства изотопов на ускорителе электронов. В качестве критерия эффективности предложен коэффициент использования тормозных фотонов с энергией выше порога реакции в процессе активации мишени. Показана возможность значительного увеличения эффективности путем применения в качестве выходного устройства ускорителя набора из последовательно размещенных изотопных мишеней специально подобранного состава. Первая мишень одновременно является конвертером тормозного излучения. В качестве примера предложен вариант устройства для одновременной наработки изотопов ^{192}Ir , ^{67}Cu , ^{57}Co и ^{11}C . Методом компьютерного моделирования на основе программной системы PENELOPE/2008 исследованы теплофизические и радиационные условия для каждой мишени в диапазоне значений энергии электронов 30–45 МэВ. Получены данные по выходу изотопов в случае применения предложенного устройства на ускорителе КУТ-30 ННЦ ХФТИ.

The efficiency of isotope production at the electron accelerator has been analyzed. The utilization factor of bremsstrahlung photons of energies above the reaction threshold in the process of target activation has been chosen as the efficiency criterion. It is demonstrated that the efficiency can be substantially increased by the use of a stack of successively arranged isotopic targets of dedicated composition as an output device of the accelerator. The first target also serves as a bremsstrahlung converter. As an example, consideration is given to the device version for simultaneous production of ^{192}Ir , ^{67}Cu , ^{57}Co and ^{11}C isotopes. The computer simulation technique based on the PENELOPE-2008 code has been used to investigate thermophysical and radiation conditions for each target in the electron energy range from 30 to 45 MeV. The isotope yield data have been obtained for the case of using the proposed device at the NSC KIPT accelerator KUT-30.

PACS: 07.85.-m; 81-40wx; 87.53-j

ВВЕДЕНИЕ

Практически все изотопы, применяемые в медицине, получают на ядерных реакторах и ускорителях тяжелых частиц. Значительное число изотопов можно получать также на относительно недорогих ускорителях электронов в реакциях под воздействием тормозных фотонов [1]. Ранее этот метод считался малоперспективным ввиду сравнительно низких сечений фотоядерных реакций [2]. Вместе с тем развитие ядерной медицины

¹E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua

сопровождается возрастанием спроса на радионуклидную продукцию в отношении как ее объема, так и расширения номенклатуры. Поэтому создание новых, особенно нереакторных, технологий становится актуальным [3]. В частности, ведутся работы в области фотоядерного производства ^{99}Mo , ^{67}Cu , ^{195m}Pt и др. (см., например, [4–6]).

Одной из особенностей этого метода является существенная неоднородность поля тормозного излучения, которым активируются изотопную мишень. Так, в работе [7] показано, что нормированный на один ускоренный электрон с энергией E_0 выход изотопов $y_i(E_0)$ в цилиндрической мишени, облучаемой выходящими из конвертера тормозными фотонами с гауссовым распределением плотности потока, может быть представлен в виде

$$y_i(E_0) = \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{R^2}{2\delta_r^2} \left(d + a + \frac{H}{2} \right) \right] \right\} \{ 1 - \exp [-\mu(k_i)H] \} y_i^\infty(E_0), \quad (1)$$

где $y_i^\infty(E_0)$ — выход в полубесконечной мишени, определяемый выражением

$$y_i^\infty(E_0) = 2\eta(E_0, d)n_i\mu^{-1}(k_i)S_i(E_0)\sigma_i^{\max}, \quad (2)$$

R и H — соответственно радиус и высота мишени; d — толщина конвертера; a — расстояние от мишени до конвертера; δ_r — среднее квадратичное отклонение распределения плотности потока тормозных фотонов; $\eta(E_0, d)$ — эффективность конверсии энергии электронов в тормозное излучение; n_i — объемная концентрация ядер-мишеней; $\mu(k)$ — линейный коэффициент ослабления фотонов с энергией k в материале мишени; k_i — энергия фотонов, соответствующая максимуму сечения реакции σ_i^{\max} ; $S_i(E_0)$ — свертка линеаризованного спектра фотонов и функции возбуждения i -реакции в форме Брейта–Вигнера [8], нормированных надлежащим образом.

Как следует из формулы (1), размеры фотоядерной мишени $R \approx \delta_r(d + a + H/2)$, $H \leq \mu^{-1}(k_i)$ являются близкими к оптимальным. Действительно, при их увеличении выход изотопа несколько возрастает, однако резко снижается удельная активность мишени. Вместе с тем оказывается, что при этих размерах мишени с ней взаимодействует лишь $\sim 30\%$ тормозных фотонов, имеющих энергию выше порога реакции.

1. МИШЕННОЕ УСТРОЙСТВО

Для увеличения эффективности использования высокоэнергетичных тормозных фотонов предлагается использовать устройство в виде набора из последовательно размещенных вдоль оси излучения мишеней специальной геометрии и состава [9]. На рис. 1 представлена схема варианта такого устройства. Оно включает основную мишень 5 из цинка для производства ^{67}Cu по реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ [5]. Дополнительно предлагается производить наработку изотопа ^{192}Ir по реакции $^{193}\text{Ir}(\gamma, n)^{192}\text{Ir}$ непосредственно в конвертере из иридия. Учитывая также, что интенсивность потока высокоэнергетичных фотонов за основной мишенью достаточно велика, в этой области можно разместить мишени-сателлиты. В данном варианте одной из них является пластина 9 из никеля для наработки ^{57}Co одновременно по двум реакциям $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co}$ и $^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$ [10]. Другая представляет собой цилиндр с циклогексаном для производства используемого в ПЭТ изотопа ^{11}C по реакции $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$.

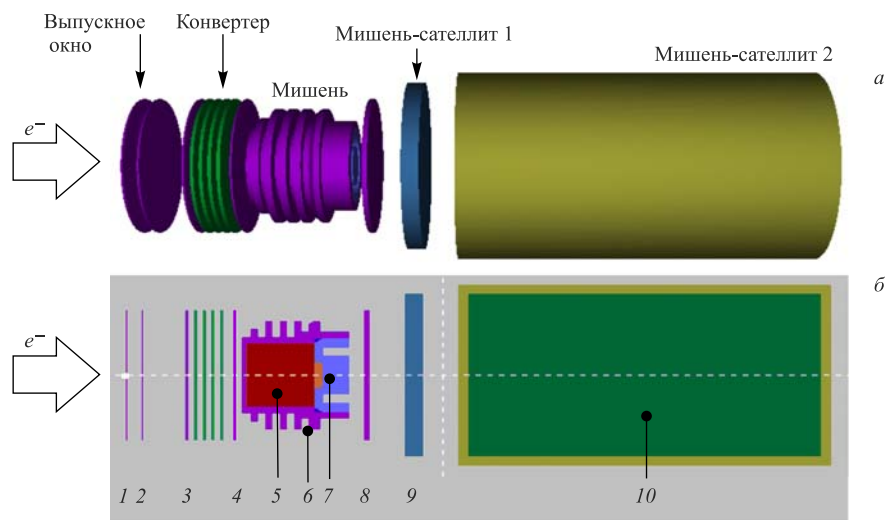


Рис. 1. Конфигурация элементов мишенного устройства

2. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование выхода изотопов в предлагаемом мишенном устройстве, а также поглощенной энергии излучения в его элементах производилось методом компьютерного моделирования на основе программной системы PENELOPE-2008 [11], дополненной данными по сечениям фотоядерных реакций [8]. Ранее было показано, что такой подход дает хорошее согласие с результатами эксперимента [5].

Условия моделирования соответствовали характеристикам ускорителя КУТ-30 [12]. Его выпускное окно состоит из двух титановых фольг (поз. 1 и 2 на рис.1, б) толщиной 50 мкм каждая, разделенных промежутком 4 мм для охлаждающей воды. Узел конвертера включает входную 3 и выходную 4 фольги из титана. Между ними находятся четыре пластины из природного иридия толщиной 1 мм, охлаждаемые водой. Основная мишень представляет собой цилиндр 5 из природного цинка диаметром и высотой 2 см. Мишень помещена в капсулу 6 из титана, имеющую развитую поверхность для улучшения теплоотвода. Капсула герметически закрыта болт-крышкой 7 из нержавеющей стали.

За задней стенкой 8 корпуса основной мишени в воздухе размещена мишень-спутник 9 в виде пластины из природного никеля диаметром 5 и толщиной 0,5 см. За ней находится еще одна мишень-спутник 10, представляющая собой заполненный циклогексаном алюминиевый цилиндр диаметром 5 и высотой 10 см с толщиной стенок 3 мм.

На рис. 2 приведены сечения реакций, использованные при моделировании.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены зависимости поглощенной мощности излучения в конвертере и мишенях от энергии электронов. Из полученных данных следует, что наиболее энергонапряженными элементами устройства являются конвертер и основная мишень, которые

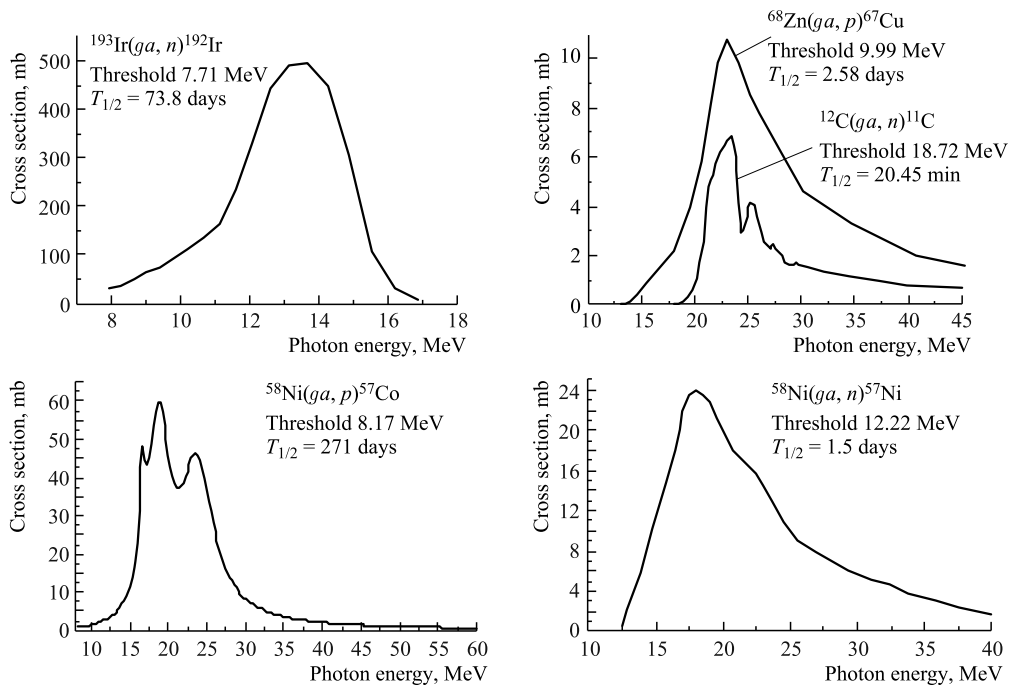


Рис. 2. Сечения реакций

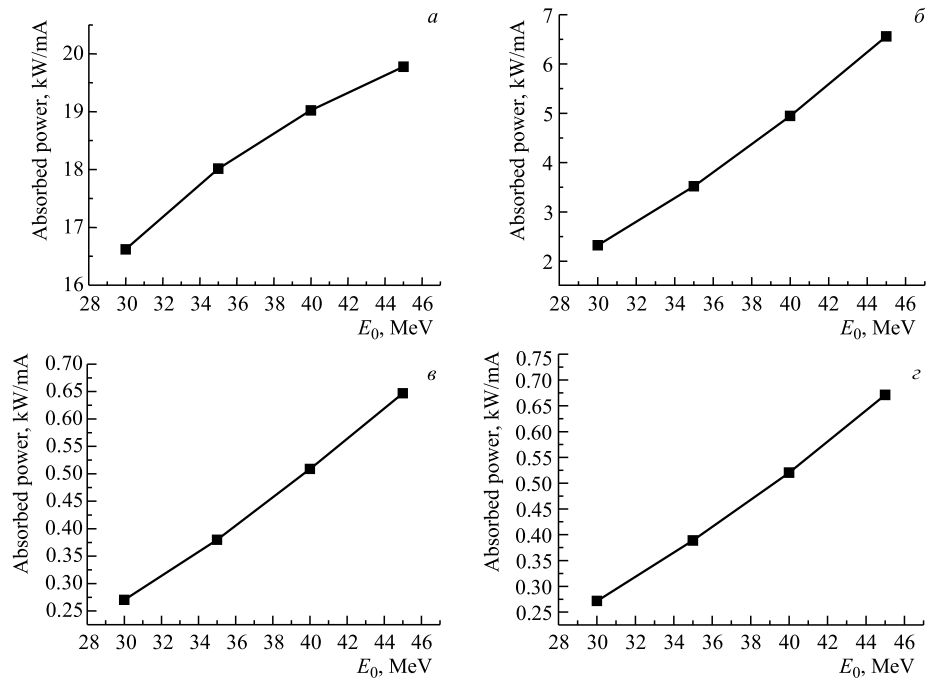
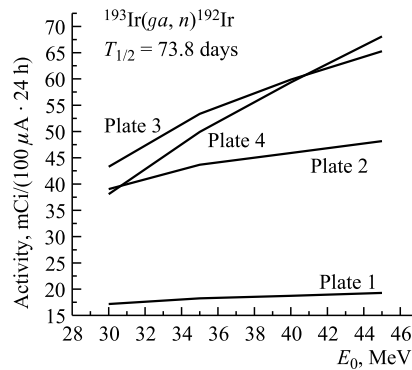


Рис. 3. Поглощенная мощность излучения в конвертере (а), основной мишени (б), спутнике-1 (в) и спутнике-2 (г)

Рис. 4. Зависимость выхода ^{192}Ir в пластинах конвертера от энергии электронов**Выход изотопов (мКи/100 мкА · ч)**

Изотоп	Энергия, МэВ			
	30	35	40	45
^{192}Ir	5,75	6,91	7,69	8,4
^{67}Cu	0,58	1,13	1,76	2,41
^{57}Co	0,07	0,11	0,15	0,19
^{57}Ni	5,57	8,77	12,23	15,64
^{11}C	106,8	216,2	337,0	473,2

при токе пучка 100 мкА и более требуют интенсивного принудительного охлаждения. В то же время мишени-сателлиты в нем не нуждаются и могут охлаждаться только за счет конвекции.

На рис. 4 приведены данные по наработке ^{192}Ir в отдельных пластинах конвертера за сутки облучения, а в таблице — полный выход изотопов с учетом распада целевого изотопа за время активации каждой мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании для фотоядерного производства изотопов одной мишени с размерами, оптимизированными по соотношению ее общей и удельной активности, большая часть надпороговых тормозных фотонов не участвует в процессе активации. Эффективность технологии можно повысить путем применения выходного устройства в виде последовательности мишеней, первой из которых является конвертер. В нем, в зависимости от материала, можно производить ^{181}W , ^{180}Ta , $^{193m}, ^{195m}\text{Pt}$, ^{192}Ir и др. За основной мишенью можно разместить дополнительные мишени. В каждом случае состав мишеней и режим их активации целесообразно оптимизировать методом моделирования с учетом сечения реакции и периода полураспада целевого изотопа. Так, в рассмотренном варианте выходного устройства при его облучении в режиме (40 МэВ, 200 мкА), характерном для ускорителя КУТ-30 ННЦ ХФТИ, в основной мишени из природного цинка

массой 45 г за 60 ч можно нарабатывать до 240 мКи изотопа ^{67}Cu . Этой активности достаточно для терапии 10–12 пациентов. Дополнительно можно произвести до 27 Ки ^{192}Ir в конвертере (за 74 сут), а также до 2 Ки ^{57}Co (270 сут) и 200 мКи ^{11}C (20 мин) в мишенях-сателлитах. Выхода ^{11}C , в частности, достаточно для обеспечения работы позитрон-эмиссионного томографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oka Y. et al. The Yields of Radioactivities Induced by (γ, n) Reactions with 20 MeV Bremsstrahlung // Bull. Chem. Soc. Jap. 1967. V. 15. P. 176–180.
2. Дмитриев С. Н., Зайцева Н. Г. Радионуклиды для биомедицинских исследований. Ядерные данные и методы получения на ускорителях заряженных частиц // ЭЧАЯ. 1996. Т. 27, вып. 4. С. 977–1042.
3. Making Medical Isotopes: Report on the Task Force on Alternatives for Medical Isotopes Production. TRIUMF. Canada. 2008. <http://www.triumf.ca/report-medical-isotope-production>.
4. Гэрвиш Ш. и др. Применение установки ИРЕН для получения радионуклидов. Препринт ОИЯИ Р18-2006-116. Дубна, 2006. 11 с.
5. Ayzatskiy N. I. et al. ^{99}Mo and ^{67}Cu Isotope Yields under Production Conditions of NSC KIPT Electron Accelerator KUT-30 // Probl. Atom. Sci. and Technol. 2010. N2. Ser.: «Nucl. Phys. Invest.» (53). P. 140–144.
6. Dikiy N. P. et al. Photonuclear Production of $^{193m,195m}\text{Pt}$ and Synthesis of Radioactive Cisplatin // J. Labell. Comp. Radiopharm. 2007. V. 50. P. 480–482.
7. Никифоров В. И., Уваров И. Л. Оценка фотоядерного выхода изотопов в технологических мишенях // Радиохимия. 2009. Т. 52. С. 268–273.
8. Handbook on Photonuclear Data for Applications. Final Report of Coordinated Researched Projects. IAEA. TECDOC. Draft N3 (Culham). 2000.
9. Уваров В. Л. Установка для производства изотопов. Патент Украины № 20879 от 15.02.2007. 2007. Бюл. № 2.
10. Dikiy N. P. et al. Electron Linac Production of Co-57 for Gamma-Chamber Calibration // Probl. Atom. Sci. and Technol. 2001. N5. Ser.: «Nucl. Phys. Invest.» (39). P. 200–202.
11. Solvat F., Fernandez-Varea J. M., Sempau I. PENELOPE-2008 a Code System for Monte-Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. OCED Nucl. Ener. Agency (Issules-Moulineous), France, 2008.
12. Ayzatskiy N. I. et al. High-Power 40 MeV Electron Linac // Probl. Atom. Sci. and Technol. 2008. N3. Ser.: «Nucl. Phys. Invest.» (49). P. 25–29.