

АКТИВАЦИОННАЯ ДОЗИМЕТРИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕАКЦИИ $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$

*В.И. Никифоров, А.Э. Тенишев, А.В. Торговкин, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко,
И.Н. Шляхов, Б.И. Шраменко*

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

E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua

Развитие фотоядерных технологий связано с использованием мощных источников тормозного излучения с верхней границей спектра до 100 МэВ. В таких условиях традиционные методы технологической дозиметрии оказываются мало пригодными. В статье изложены результаты исследования нового метода, основанного на активации высокоэнергетичным тормозным излучением мишени из In природного состава и установлении величины поглощенной в ней дозы по наведенной облучением удельной активности изомера $^{115\text{m}}\text{In}$. Методом моделирования было проведено предварительное исследование процессов фотоактивации этого изомера в диапазоне значений энергии электронов 8...70 МэВ. На ускорителях ЛУ-10 и ЛУ-40м ННЦ ХФТИ выполнены совместные измерения выхода изомера и поглощенной дозы.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появилось несколько работ, в которых изучалась возможность применения активации низкоэнергетичного изомера $^{115\text{m}}\text{In}$ (период полураспада 4,48 ч) для технологической дозиметрии квазимонохроматичного фотонного излучения радионуклидных источников на основе ^{60}Co с мощностью дозы до 10^2 Гр/с [1,2]. Достоинствами метода являются простота, линейность по отношению к интенсивности потока фотонов, независимость от внешних условий (давления, влажности и температуры), а также возможность многократного использования детекторов на основе природного индия.

Данная работа посвящена изучению возможности применения метода для дозиметрии высокоэнергетичного тормозного излучения, в частности, исследованию зависимости от энергии электронов отношения удельной активности изомера $^{115\text{m}}\text{In}$ к поглощенной дозе тормозного излучения в контактирующем с индием стандартном дозиметрическом материале.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для совместного исследования процессов активации изомера $^{115\text{m}}\text{In}$ и поглощения энергии тормозного излучения в индии в диапазоне значений энергии электронов $E_0=8...70$ МэВ были использованы два ускорителя ННЦ ХФТИ:

- ЛУ-10 ($E_0=8...12$ МэВ);
- ЛУ-40м ($E_0=35...95$ МэВ).

На Рис.1 представлена схема эксперимента на ускорителе ЛУ-10. За выпускным окном EW ускорителя размещался конвертер тормозного излучения С и фильтр F (их описание приведено в работе [3]).

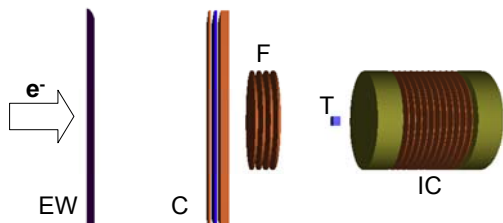


Рис.1. Конфигурация выходных устройств (ЛУ-10)

На расстоянии 5 см от последней пластины фильтра располагалась мишень Т, состоящая из двух дозиметров Harwell Red 4034 с размещенной между ними пластиной из природного индия размером $2 \times 1 \times 0,1$ см. Детекторы Harwell Red (HR) представляют собой пластины из окрашенного ПММА, являющиеся стандартным дозиметрическим материалом [4]. Выбор данного типа дозиметров определялся также возможностью измерения ими поглощенной дозы фотонного компонента в случае смешанного γ, n -излучения [5]. Данные радиационные условия являются характерными при генерации высокоэнергетичного тормозного излучения [6]. В качестве монитора интенсивности тормозного излучения использовалась толстостенная ионизационная камера IC.

Для экспериментов на ускорителе ЛУ-40м использовалось выходное устройство, схема которого приведена на Рис.2. За выходным окном ускорителя соосно его пучку были размещены последовательно конвертер тормозного излучения С, фильтр из алюминия F и три одинаковые мишени – T_1, T_2 и T_3 . За мишенью T_3 вплотную к ней располагался детектор интенсивности тормозного излучения DD на основе CVD-алмаза [7].

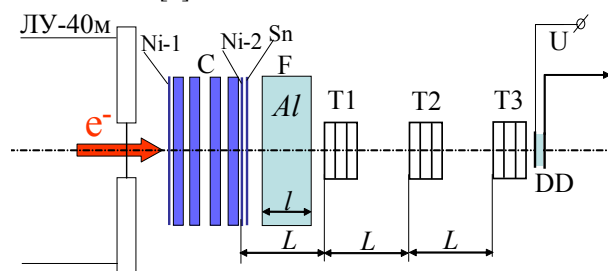


Рис.2. Конфигурация выходного устройства (ЛУ-40м)

Конвертер состоит из 4-х круглых танталовых пластин толщиной 1 мм и диаметром 30 мм каждая. Между пластинами имеются воздушные зазоры по 1 мм. Перед первой и после 4-й пластины вплотную были установлены фольги из никеля и олова для измерения профиля пучка электронов и тормозного излучения методом фотоядерного конвертера [8]. В качестве примера, на Рис.3 приведены результаты измерения профиля пучка тормозного излучения.

За конвертером устанавливались алюминиевые цилиндры-фильтры диаметром 8 и высотой 5, 7 и 9 см для значений энергии электронов $E_0=35, 52,5$ и 70 МэВ соответственно. Высота фильтра определялась из условия обеспечения максимума фактора вторичного излучения для каждого значения E_0 [9].

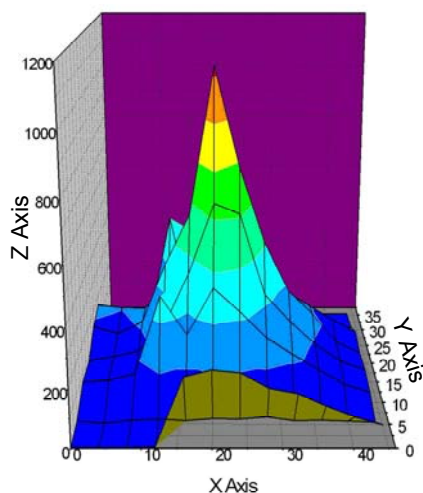


Рис.3. Распределение интенсивности тормозного излучения за конвертером ($E_0=70$ МэВ)

Мишени T_1, T_2 и T_3 были размещены на одинаковом расстоянии $L=10$ см друг за другом вдоль оси излучения. Каждая мишень состояла из пластины индия размером $2 \times 1 \times 0,1$ см, контактировавшего с ней HR-дозиметра, а также фольги из природного молибдена размером $2 \times 1 \times 0,1$ см. Подобные состав и места размещения мишеней выбирались из соображений повышения статистической надежности результатов измерений, а также оценки вклада (n, n') канала в активацию изомера ^{115m}In . Так, природный молибден состоит из семи стабильных изотопов, одним из которых является ^{92}Mo (14,84 %). Под воздействием тормозных фотонов на нем происходит реакция $^{92}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{90}\text{Mo}$, причем радионуклид ^{90}Mo в данных условиях генерируется только через этот канал. Поэтому реакцию можно использовать как реперную для сравнения с выходом других радионуклидов, получаемых как в фотоядерном, так и в нейтронном каналах. В частности, изотоп ^{99}Mo может генерироваться в реакциях $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ и $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В соответствии с геометрией и составом выходных устройств, приведенных на Рис.1,2, было проведено исследование процессов формирования поглощенной дозы в мишенях, а также активации изомера ^{115m}In методом компьютерного моделирования на основе программного пакета PENELOPE-2008 [10]. В расчетах использовались данные о сечении реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$, заимствованные из работы [11] и представленные на Рис.4. Порог этой реакции составляет 1078 кэВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.5 приведены результаты расчетов поглощенной энергии тормозного излучения в HR-дозиметрах и индии, а на Рис.6 – соотношение S удельной активности ^{115m}In и поглощенной дозы в

индии. Видно, что на нижней границе этой области энергий электронов значения поглощенной дозы в дозиметрах и в индии практически совпадают. Вместе с тем, с увеличением E_0 проявляется тенденция превышения дозы в индии. Это можно объяснить тем обстоятельством, что с ростом энергии фотонов величина их массового энергетического коэффициента ослабления у легких материалов ($Z < 16$) снижается, а при $Z > 16$ возрастает [12].

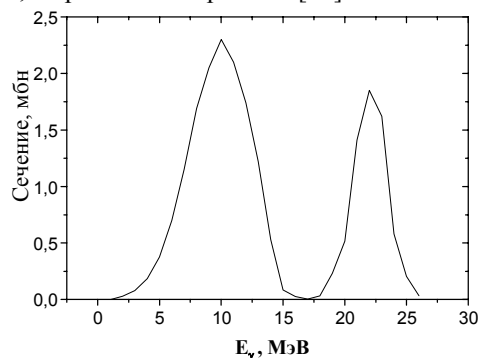


Рис.4. Сечение реакции $\text{In}^{115}(\gamma, \gamma')\text{In}^{115m}$

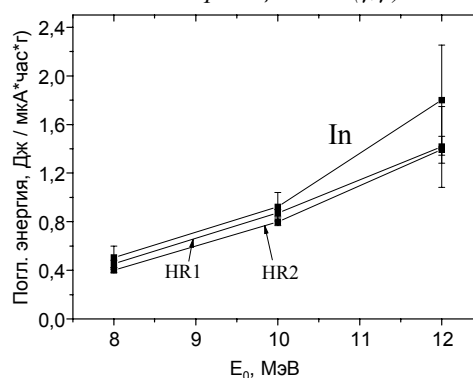


Рис.5. Зависимости поглощённой дозы в дозиметрах HR и индии от энергии электронов пучка

С учетом погрешности измерений и статистической неопределенности результатов моделирования можно утверждать, что их данные (см. Рис.6) находятся в удовлетворительном согласии.

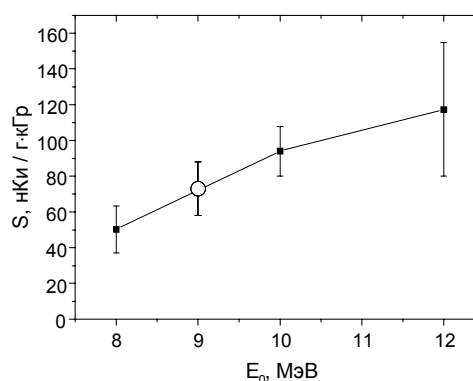


Рис.6. Отношение удельной активности изомера ^{115m}In в пластине индия к поглощённой в ней дозе тормозного излучения в зависимости от энергии электронов (○ - эксперимент, ■ - расчет)

На Рис.7 приведены результаты расчета нормированной на единицу тока пучка мощности поглощенной дозы в Harwell-дозиметрах и экспериментальные данные, полученные на ускорителе ЛУ-40м при энергии электронов 35, 52,5 и 70 МэВ соответственно (доза, полученная мишенью T_1 при энергии

электронов $E_0=70$ МэВ оказалась вне пределов рабочей области дозиметра).

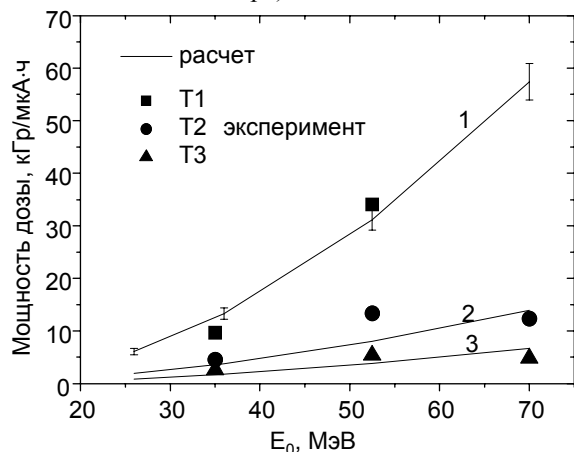


Рис.7. Зависимость мощности поглощенной дозы в ПММА от энергии электронов

На Рис.8 приведены результаты моделирования и эксперимента по определению соотношения S_1 удельной активности ^{115m}In и поглощенной дозы в контактирующем с ним HR-дозиметре. Видно, что полученные в эксперименте значения коэффициента S_1 слабо зависят от граничной энергии фотонов E_0 , а также интенсивности тормозного излучения и близки к средней величине $103(\pm 18)$ нКи/г·кГр. Вместе с тем, значения, рассчитанные методом моделирования, оказались систематически выше в 1,5-2,5 раза. Следует отметить, что превышение в несколько раз расчетных значений выхода реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ над экспериментальными было получено также в работе [13]. Это можно объяснить недостаточной надежностью данных по течению этой реакции, поскольку у разных авторов они существенно отличаются (см., например [11,13]).

В таблице приведены результаты измерений удельной активности изомера ^{115m}In и изотопа ^{90}Mo . Следует отметить, что при увеличении энергии электронов с 35 до 52,2 МэВ квазиизотропный поток фотонейтронов из конвертера возрастет \sim в 1,5 раза. Тем не менее при этом, как видно из данных таблицы, отношение активности ^{115m}In и ^{90}Mo в мишенях в пределах погрешности измерений практически не меняется. Это свидетельствует о малом вкладе (n, n') канала в активацию изомера ^{115m}In .

Удельная активность ^{115m}In и ^{90}Mo - ($\mu\text{Ci/g} \cdot \mu\text{A} \cdot \text{h}$)

E_0 , МэВ	N миш.	Эксперимент		Расчет
		^{115m}In	^{90}Mo	^{90}Mo
35	1	1,14	0,20	0,25
	2	0,49	0,09	0,10
	3	0,29	0,05	0,05
52,5	1	3,21	0,63	0,69
	2	1,22	0,29	0,28
	3	0,58	0,13	0,15

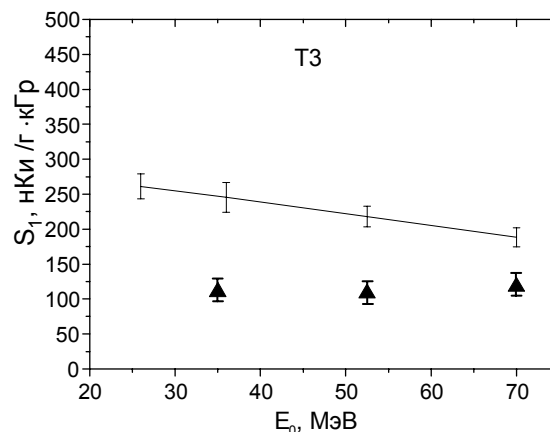
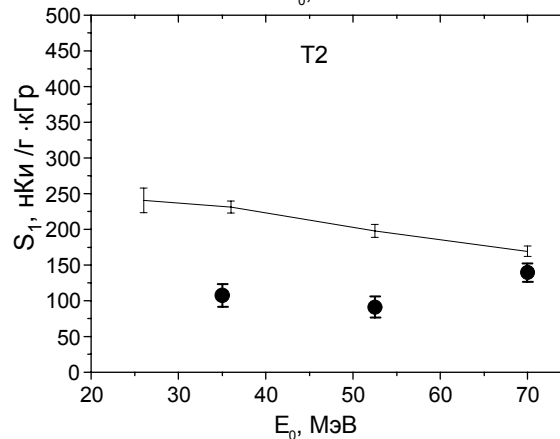
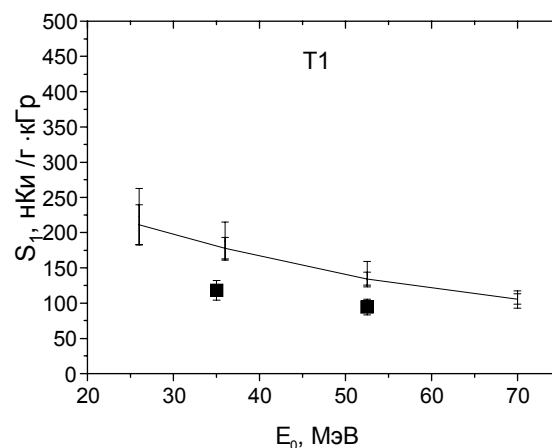


Рис.8. Зависимость отношения удельной активности индия к поглощенной дозе в ПММА от энергии электронов

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что реакцию $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ можно использовать для дозиметрии тормозного излучения большой мощности с верхней границей спектра до 70 МэВ и более. Отношение удельной активности изомера ^{115m}In к поглощенной дозе тормозного излучения в ПММА возрастает с 50 до ~ 110 нКи/г·кГр при изменении энергии электронов с 8 до 12 МэВ. При ее дальнейшем увеличении до 70 МэВ, как показали эксперименты, это отношение в пределах погрешности измерений практически не меняется.

Результаты расчетов поглощенной дозы тормозного излучения методом моделирования на основе программной системы PENELOPE-2008 удовлетворительно согласуются с экспериментальными, так же как данные по выходу изотопов ^{90}Mo и ^{99}Mo . В то же время расчетные значения выхода $^{115\text{m}}\text{In}$ оказались существенно выше экспериментальных. Это свидетельствует об адекватном описании электрон-фотонных каскадов пакетом PENELOPE, а также о необходимости более точного описания сечения реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J.-H. Chao, P.-Ch. Hsu, H.-M. Liu. Measurement of high-dose rates by photon activation of indium foils // *Appl. Rad. And Isot.* 2001, v.55, p.549-556.
2. A. Murataka, S. Endo, Y. Kojima, K. Shizuma. Dose rate estimation around ^{60}Co γ -ray irradiation source by means of $^{115\text{m}}\text{In}$ photoactivation // *J. Radiat. Res. Advance Publ.* 2010, p.1-7.
3. В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, А.Э. Тенишев и др. Стенд для радиационных испытаний с использованием тормозного излучения // *Настоящий журнал*, с.167-170.
4. Practice for use a Polymethylmethacrylate Dosimetry System. Standard ISO/ASTM 51276:2002.
5. A.F. Fernandez, B. Brichard, H. Doms, et al. Gamma dosimetry using Red 4034 Harwell dosimeters in mixed fission neutrons and gamma environments // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2005, v.52(2), p.505-509.
6. Т.В. Малыгина, А.В. Торговкин и др. Исследование поля смешанного X, γ -излучения при фото-ядерном производстве изотопов // *ВАНТ. Сер. «ЯФИ»*. 2010, №2(53), с.140-144.
7. P. Bergonzo, A. Brambilla, D. Tromson, et al. CVD diamond for nuclear detector applications // *NIM.* 2002, v.476A, p.694-700.
8. В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, В.А. Шевченко и др. Система измерения профиля потока высокоэнергетического тормозного излучения // *ВАНТ. Сер. «ЯФИ»*. 2008, №3(49), с.196-200.
9. В.И. Никифоров, В.Л. Уваров. Метод анализа и оптимизации выходных устройств ускорителя электронов в режиме генерации тормозного излучения // *ВАНТ. Сер. «ЯФИ»*. 2012, №3(79) с.207-210.
10. F. Salvat, J.M. Fernández-Varea and J. Sempau. "PENELOPE-2008, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport" (OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France, 2008).
11. V.S. Bokhinyuk, A.I. Guthy, A.M. Parlag, et al. Study of the effective excitation cross section of the $^{115\text{m}}\text{In}$ isomeric state in the (γ, γ') reaction // *Ukr. J. Phys.* 2006, v.51, p.657-660.
12. J.H. Hubbel. Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV // *J. Appl. Radiat. Isot.* 1982, v.33, p.1269-1290.
13. K. Kosako, K. Oishi, T. Nakamura, et al. Angular Distribution of Bremsstrahlung from Copper and Tungsten Bombarded by 18, 28 and 38 MeV Electrons // *J. Nucl. Sci. and Technol.* 2010, v.47, p.286-294.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

ACTIVATION DOSIMETRY OF HIGH-ENERGY BREMSSTRAHLUNG ON THE BASIS OF $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ REACTION

V.I. Nikiforov, A.Eh. Tenishev, A.V. Torgovkin, V.L. Uvarov, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyahov, B.I. Shramenko

Development of photonuclear technologies is connected with the use of powerful sources of bremsstrahlung with the end-point energy up to 100 MeV. In such conditions, the traditional methods of technological dosimetry appear a little suitable. The results of study of a new technique based on activation of a target from In of natural composition with high-energy bremsstrahlung and establishment of a dose absorbed in it on specific activity of the $^{115\text{m}}\text{In}$ isomer induced by irradiation are reported. Preliminary investigation of isomer photoactivation processes in the electron energy range 8...70 MeV was conducted by simulation method. Joint measurements of the $^{115\text{m}}\text{In}$ specific activity and absorbed dose were carried out at LU-10 and LU-40m electron accelerators of NSC KIPT.

АКТИВАЦІЙНА ДОЗИМЕТРІЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЇ $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$

В.І. Нікіфоров, А.Е. Тенішев, А.В. Торговкін, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко, І.М. Шляхов, Б.І. Шраменко

Розвиток фотоядерних технологій пов'язаний з використанням потужних джерел гальмівного випромінювання з верхньою межею спектру до 100 MeV. У таких умовах традиційні методи технологічної дозиметрії виявляються мало придатними. У статті викладені результати дослідження нового методу, заснованого на активації мішені з In природного складу високоенергетичним гальмівним випромінюванням і встановлені величини поглинутої в ній дози по наведеній опромінюванням питомій активності ізомеру $^{115\text{m}}\text{In}$. Методом моделювання було проведено попереднє дослідження процесів фотоактивації цього ізомеру в діапазоні значень енергії електронів 8...70 MeV. На прискорювачах ЛУ-10 і ЛУ-40м ННЦ ХФТІ виконані сумісні вимірювання виходу ізомеру і поглинутої дози.