

УДК 539.124.17:616.001.28

ОТРИМАННЯ ФОТОННИХ ПУЧКІВ ВИСОКОЇ ЯСКРАВОСТІ НА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ

Н.А. Довбня, Г.Д. Пугачов, І.І. Шаповал

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна

E-mail: ishapoval@kipt.kharkov.ua

Надійшла до редакції 8 лютого 2008 р.

Розглянута можливість конвертування імпульсного електронного пучка з енергією 25 – 40 МеВ та середньою потужністю ~20 кВт у фотонний пучок високої яскравості. Поперечний розмір електронного пучка на конверторі $\sigma \sim 3$ мм. Охолодження обертаючогося танталового конвертора здійснюється випромінням. Щільність потужності електронного пучка 100 – 150 кВт/см². У пакеті GEANT здійснено розрахунок розподілу фотонів та електронів на мішені для наробки ізотопів за енергії прискорених електронів 25 та 40 МеВ та різних товщин танталових конверторів. Розподіл щільності електронного пучка на конверторі приймався Гаусовим з $\sigma \sim 3$ мм. Отриманий кутовий розподіл та енергетичний спектр фотонів з енергією вище 9 МеВ (порога реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$) узгоджуються з експериментальними результатами. Щільність потоку фотонів, що вилітають з усіх танталових конверторів товщиною від 1 до 7 мм максимальна для кутів, що менше 10° та різко збільшується із ростом енергії прискорених електронів. Проведений розрахунок теплових навантажень та механічних напружень, що виникають за взаємодії потужного електронного пучка з танталовим конвертором. Показано, що така схема конвертування забезпечує отримання фотонного пучка з високою яскравістю, а матеріал конвертора здатен витримати за цього тривалі теплові та механічні навантаження. Параметри такого фотонного пучка дозволять отримати високу питому активність опромінених матеріалів та технологічність радіохімічних процесів, а з тим і конкурентоздатність наробки медичних та інших радіоізотопів на електронних прискорювачах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фотонний пучок високої яскравості, наробка радіоізотопів, чисельні розрахунки, конвертор, теплові навантаження.

Широке застосування радіонуклідів в медицині зажадало розробки промислових засобів їхньої наробки в реакторах та на прискорювачах [1 – 4]. Більш прийнятним шляхом збільшення наробки радіонуклідів на прискорювачах є підняття середнього струму прискорювача, позаяк зміна енергії електронів на ту, що вище порога двочасткових реакцій, веде до наробки небажаних домішок. Окрім того, збільшення енергії прискорювача призводить до різкого потовщення радіаційного захисту і, отже, вартості самого прискорювача і створеної на ньому продукції. Тому для кожного конкретного радіонукліду необхідний вибір своєї оптимальної енергії прискорених часток, бо тільки висока питома активність і технологічність радіохімічних процесів може забезпечити конкурентоздатність наробки ізотопів на прискорювачах. З метою збільшення максимальної швидкості наробки радіонукліду та його питомої активності необхідно мати максимальну щільність фотонного пучка на мішені, в якій виробляються радіонукліди, для чого необхідно наблизити мішень до конвертора. Проте, на цьому шляху є серйозні проблеми.

Найповніші розрахунки та експериментальне моделювання промислової наробки ^{99}Mo для малих поперечних розмірів нуклідопродукуючої мішені проведені в роботі [3]. Розрахунки наробки ^{99}Mo для середнього струму прискорених електронів 350 мкА і його щільності більше 2700 мкА/см² при енергії прискорених електронів $E_0 = 40$ МеВ були проведені без обліку термальних навантажень. Експериментальне моделювання цього процесу було виконане для середнього струму 15 мкА. У роботі [3] не наведено як будуть вирішені теплові проблеми у реальному експерименті, які, як показано нижче, виявляються критичними (досягається температура плавлення конвертора).

Метою роботи є демонстрація можливості отримання фотонних пучків високої яскравості для практичного застосування, зокрема, для наробки медичних радіонуклідів.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Для вибору реальної схеми наробки радіонуклідів були проведені розрахунки щільності фотонних пучків та електронів на мішені при $E_0 = 25$ і 40 МеВ у пакеті 'GEANT' при різноманітних товщинах танталових конверторів зі статистикою 10^6 запусків електронів. Розподіл густини електронного пучка на конверторі приймався Гаусовим з $\sigma = 3$ мм. Фотони з енергією вище 9 МеВ, що вилітають з конвертора на мішень, та електрони з енергією від 0 до E_0 згруповані по кутовим інтервалам 5 ± 5 , 15 ± 5 , 25 ± 5 і т. д., градусів. Кутовий розподіл фотонів з енергією вище

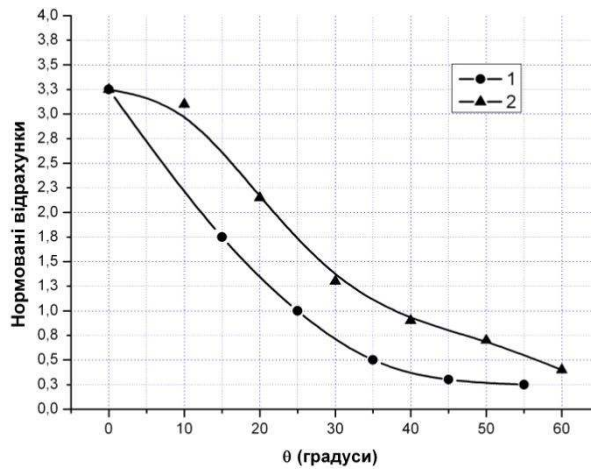


Рис. 1. Кутовий розподіл фотонів: 1 - розрахунковий розподіл фотонів з енергіями від 9 до 25 MeV, товщина Ta 7 мм, енергія електронів $E_0 = 25$ MeV; 2 - експериментальний розподіл фотонів за енергії електронів $E_0 = 22$ MeV [5].

9 MeV (порога реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$) при $E_0 = 25$ MeV і товщині конвертора 7 мм наведений на рис. 1. Наробку радіонуклідів можна вважати пропорційною числу фотонів з енергією вище порога реакції. Результати нормовані на експериментальні дані при $E_0 = 22$ MeV для кута 0° [5]. Розрахункова крива 1 та експериментальна крива 2 засвідчують, що максимальне випромінювання γ -квантів з енергією більше 9 MeV навіть для товстих конверторів спрямоване під кутами 10° – 20° .

Кутовий розподіл фотонів з енергією вище 9 MeV для енергії прискорених електронів E_0 і різних товщин танталових конверторів приведений у таблиці. Число фотонів, що вилітають з усіх конверторів максимально для кутів, менших 10° і різко зростає зі збільшенням енергії прискорених електронів.

Таблиця. Кутовий розподіл фотонів з енергією вище 9 MeV для енергії прискорених електронів E_0 і різних товщин танталових конверторів

θ (градуси)/ E_0	5	15	25	35	45	55
25 MeV, 7 мм Ta	3,30	1,70	0,87	0,60	0,24	0,16
25 MeV, 3 мм Ta	3,58	2,02	1,30	0,80	–	–
40 MeV, 1 мм Ta	14,57	4,22	0,71	0,105	0,021	0,0063

На рис. 2 показані нормовані на один запуск електрона спектри фотонів, що вилітають з танталового конвертора товщиною 3 та 7 мм, відповідно, під кутом 0° – 10° за енергії падаючих електронів $E_0 = 25$ MeV. Отримано, що потовщення конвертора від 3 мм, коли маємо максимальний вихід фотонів, до 7 мм зменшує вихід фотонів приблизно на 20%. Натомість у фотонному пучку буде значно менше домішок електронів ніж за товщини 3 мм.

На рис. 3а представлений нормований на запуск одного електрона спектр вихідних електронів з танталового конвертора товщиною 1 мм під кутом 0° – 10° при $E_0 = 40$ MeV. Інтегруючи спектр отримуємо, що у фотонному пучку на мішені присутні 30% електронів від їх числа, що падають на конвертор (проводилось 10^6 запусків). Слід наголосити, що навіть такий електронний пучок важко вивести через вихідну фольгу, і він може розплавити конвертор та саму мішень. Тому схема наробки ^{99}Mo на прискорювачі, згідно розрахунку [3], нам видається важко виконуваною на практиці. На рис. 3б показаний спектр електронів з танталового конвертора

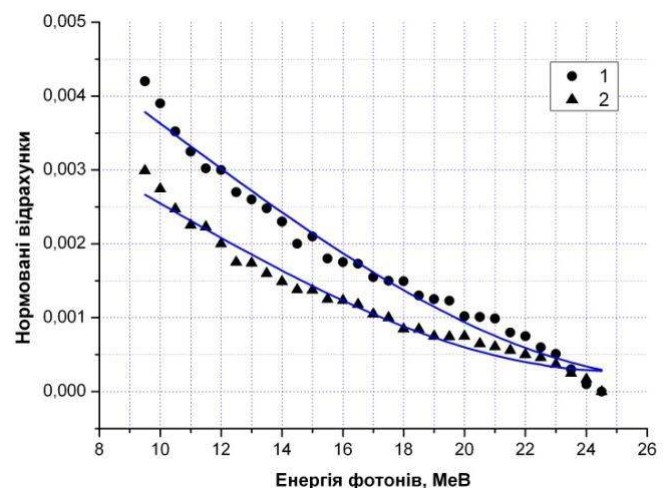


Рис. 2. Нормовані спектри фотонів, що вилітають з танталового конвертора товщиною 3 мм (крива 1) та 7 мм (крива 2), відповідно, під кутом 0° – 10° при енергії падаючих електронів $E_0 = 25$ MeV (криві отримані по лоренцівській підгонці). Статистика – 10^6 запусків електронів.

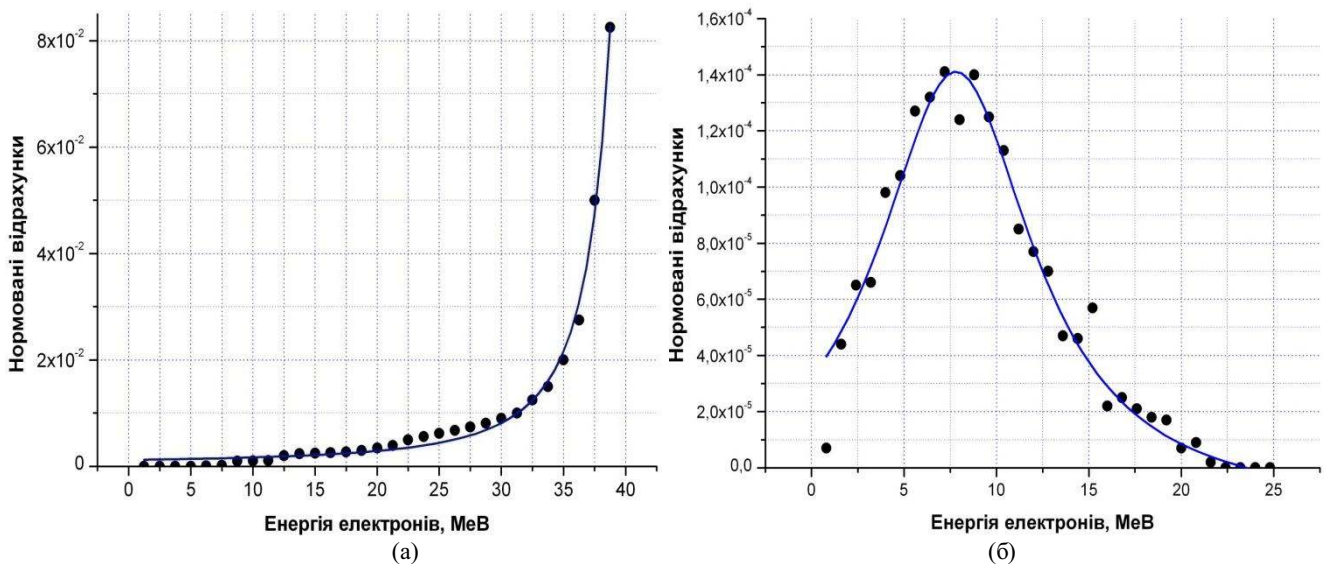


Рис. 3. Нормовані спектри електронів під кутом 0^0-10^0 з танталового конвертора: (а) – товщиною 1 мм при енергії падаючих електронів $E_0 = 40$ MeV; (б) – товщиною 7 мм при енергії падаючих електронів $E_0 = 25$ MeV (криві отримані по лоренцівській підгонці). Статистика – 10^6 запусків електронів.

товщиною 7 мм під кутом 0^0-10^0 при $E_0 = 25$ MeV. Для електронів з енергією 25 та 40 MeV пробіг у танталі складає 7 та 8 мм відповідно. Кількість електронів у цьому випадку не перевищує 0,2 % від первинного пучка електронів.

ТЕРМІЧНА ПРОБЛЕМА ТА ШЛЯХ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

За наведених вище умов у самій нуклідопродукууючій мішені виділятиметься невелика кількість тепла, яку можна зняти обдувом. Проте, при середніх струмах 400 мкА та $\sigma = 3$ мм у місці попадання пучка на нерухомий конвертор за декілька секунд температура підвищиться до точки плавлення металу. Охолодження водою при такій щільності теплової потужності на товстому конверторі неможливе, позаяк коефіцієнт теплообміну води, що рухається, та води, що кипить, не перевищує 500 – 5000 ккал/($\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}$). Використання тонких дисків і охолодження їх проточною водою [6] дуже збільшує загальну товщину конвертора і, отже, зменшує щільність потоку фотонів на мішені. Крім того, відбувається скид енергії електронів у воді за рахунок іонізаційних та радіаційних втрат і збільшується середньоквадратичний кут розсіювання електронів. Та як видно з таблиці 1, це призведе до зменшення ефективного значення E_0 та щільності потоку гальмівних γ -квантів із енергією вище 9 MeV.

Використання мішеней з дорогих ізотопів пов'язано із збільшенням щільності фотонного пучка на цій мішені. Це досягається зменшенням загальної товщини конвертора і максимальним наближенням мішені до конвертора. Як видно з рис. 3 при товщині у 7 мм за танталовим конвертором маємо замало електронів під кутом меншим 10^0 і мішень можна наблизити до конвертора на стільки, на скільки це дозволить вихідна фольга прискорювача. Отриманий фотонний пучок із такою малою домішкою електронів легко вивести з вакууму через титанову фольгу. Зменшення відстані від конвертора до мішені з 20 мм до 10 мм і за розмірів пучка на конверторі із $\sigma = 3$ мм дозволяє збільшити щільність фотонів на

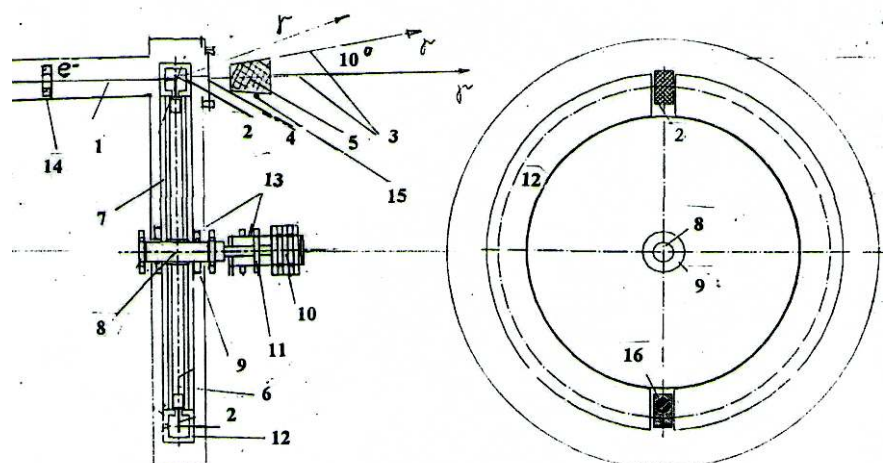


Рис. 4. Обертаючийся конвертор електронного пучка (1 - електронний пучок, 2 - пластини танталового конвертера, 3 - фотонний пучок, 4 - вихідна фольга прискорювача, 5 - мішень, 6 - титановий диск, 7 - кожух диска, 8 - валець обертання, 9 - підшипники, 10 - ввід обертання, 11 - датчик обертання, 12 - охолодження кожуха, 13 - вакуумна камера, 14 - датчик положення електронного пучка, 15 - датчик температури мішені, 16 - болометричний датчик)

молібденовій мішені довжиною 15 мм у 2,8 рази.

Для збільшення площі, на якій поглинається теплова потужність пучка, потрібно створити мішень, що обертається у вакуумній камері прискорювача, перед вихідною фольгою, а тепло від конвертора відводить випромінюванням, аналогічно [7, 8] (див. рис. 4). Конвертор є диском, що обертається у вакуумі. На обводі диску закріплені танталові пластини шириною 2 см. Частота обертання диску обертається у залежності від частоти роботи прискорювача. Частота обертання диску вибрана таким чином, щоб за час одного оберту диску пучок рівномірно по всій довжині потрапляв у обвід. За енергії прискорених електронів у 25 МеВ і середньому струмі 400 мкА біля 60% потужності пучка буде виділятися у формі тепла у танталовому обводі. Збільшення енергії прискорених електронів з 25 до 35 - 40 МеВ при одному і тому ж струмі збільшує число фотонів у 3 - 4 рази, у той час, як теплові навантаження збільшуються лише на 15%. Рівняння, що описує променевий теплообмін між довільно зорієнтованими поверхнями dS_1 та dS_2 , має вид [9, с. 482-490]

$$d^2Q = \sigma \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi d^2} dS_1 dS_2 \varepsilon(T_1)(T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

де dS_1 – елемент площі випромінюючого танталового конвертора, dS_2 – елемент площі поглинаючого охолоджуваного кожуха, d – відстань між елементами площі dS_1 і dS_2 , σ – стала Стефана–Больцмана, $\varepsilon(T_1)$ – випромінювальна спроможність танталу, T_1 – температура танталового конвертора, (К); T_2 – температура охолоджуваного водою кожуха, (К). У запропонованій конструкції випромінююча поверхня конвертора та внутрішня поверхня охолоджуваного кожуха розташована паралельно, тому кути β_1 та β_2 , утворені нормальними до цих поверхонь з лініями, що поєднують ці поверхні, дорівнюють нулю. Поверхня конвертора повністю оточена охолоджуваним кожухом, тому кутівий коефіцієнт dQ/dS_2 , який визначається чисто геометричним співвідношенням, та відстань d покладаємо рівними 1. Кількість тепла, що випромінюється танталовим обводом та поглинається охолоджуваним кожухом, матиме вид

$$Q = 2\sigma S \varepsilon(T_1)(T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

де S – площа танталового обводу.

Розрахунки показують, що за наведених параметрів пучка частина об'єму конвертора, по якій проходить електронний пучок, буде нагріватися в початковому режимі при частоті 300 Гц на 46°C за імпульс. За декілька десятків секунд встановиться теплова рівновага між випромінюючим танталовим обводом з радіусом 35 см та охолоджуваним водою кожухом. Температурна радіальна напруга у стаціонарному режимі на відстані 2 мм від центру пучка із $\sigma = 3$ мм досягатиме $6,9$ кГ/мм². До досягнення температури T_1 конвертор буде працювати при більших температурних напруженнях, бо питома теплоємність Ta при T_1 у 2 рази вище, ніж при кімнатній температурі. Теплові навантаження можна знизити у 2 рази, якщо конвертор встановити під кутом 30° до пучка.

Слід зазначити, що такий конвертор може використовуватися як нейтронне джерело з щільністю до $1,8 \cdot 10^{11}$ та $5,7 \cdot 10^{11}$ н/(см² · сек), на відстані 2 та 1 см від конвертора, відповідно, при $E_0 = 25$ МеВ.

ВИСНОВКИ

У роботі показана можливість отримання фотонних пучків високої яскравості при конвертуванні електронного пучка з високою щільністю на конверторі, що рухається та охолоджується випромінюванням. Проведено розрахунки теплових навантажень на конвертор і показано, що запропонована система для конвертування електронних пучків високої яскравості працюватиме у рівноважному по поглинанню потужності пучка та випроміненою теплової енергії стані.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Uvarov V.L., Dikiy N.P., Dovbnya A.N. et. al. Electron accelerator's production of technetium – 99m for nuclear medicine // Bull. Amer. Phys. Soc. –1997. –Vol. 42, №3. –P.1338-1345.
2. Dikiy N.P., Dovbnya A.N., Maryokhin S.V., Uvarov V.L. On production efficiency of medical and biophysical isotopes using electron accelerator // VANT. –1999. –№3(34). –P. 91-92.
3. Bennet R.G., Christian J.D., Petti D.A., Terry W.K. and Grover S.B. A system of ⁹⁹Te production based on distributed electron accelerator and thermal separation // Nuclear Technology. –1999. –Vol.126. –P.102-121.
4. Верёвкин А.А., Стервиедов Н.Г., Ковтун Г.П. Получение и применение короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов в медицине // Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна, серія фізична "Ядра, частинки, поля". –2006. – №746, вип. 4(32). –С.54-70.
5. Pugachev G.D., Biller E.Z., Dovbnya A.N., Pugachev D.G., Shestakova V.S. Design of the target for ⁹⁹Mo production in the electron linear accelerator // VANT. –1999. –Vol.3(34). –P.95-96.
6. Дубровин К.П., Зенкевич В.С., Кереновский С.В., Мурадян Г.В. Мишень линейного прискорювача «Факел» для нейтронно-спектрометрических исследований // Атомная энергия. –1995. –Т.29, в.2. –С.117-120.

7. Avilov M.S., Gubin K.V., Kot N.Kh., Lebedev N.N., Logatchev P.V., Martyshkin P.V., Morozov S.N., Pivovarov I.L., Shiyankov S.V., Starostenko A.A., Tecchio L. Project of deuteron accelerator based neutron source for RIB production // VANT. –2001. –Vol.5(39). –P.197-199.
8. Dovbnya N.A., Pugachev G.D., Shapoval I.N., Shapoval I.I. Converting high-current pulsed electron beams of small transverse dimensions // VANT. –2001. –Vol.5(39). –P.217-219.
9. Эджерт Э.Р. и Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. –Москва: Государственное энергетическое издательство, 1961. – 680с.

HIGH LUMINOSITY PHOTON BEAMS PRODUCTION ON ELECTRON ACCELERATORS

N.A. Dovbnya, G.D. Pugachov, I.I. Shapoval

National scientific center «Kharkiv institute of physics and technology», Ukraine

E-mail: ishapoval@kipt.kharkov.ua

The possibility of a pulsed electron beam conversion with the energy of 25 – 40 MeV and the mean power of ~20 kW into a high luminosity photon beam is considered. Electron beam transverse dimension on the convertor is $\sigma \sim 3$ mm. Cooling of rotating tantalum convertor is performed with thermal radiation. Power density of electron beam is 100 – 150 kW/cm². The GEANT package is used for calculation of photon and electron beam density on the target for isotopes production on the 25 and 40 MeV electron energy and with various tantalum convertors thickness. Electron beam density distribution on the convertor was taken as normal with $\sigma \sim 3$ mm. Obtained angle distribution and energy photon spectrum with the energy above 9 MeV ($^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ reaction threshold) is consistent with experimental results. Photon flux density emitted from all tantalum convertors with the 1 – 7 mm thickness is maximal for angles smaller than 10° and sharply increase while the electrons beam energy growth. The calculation of thermal load and mechanical stress, which occurs due to power electron beam interaction with the tantalum convertor, is done. It is shown that such conversion scheme provides high luminosity photon beam production, and the convertor material is able to stand continuous thermal and mechanical load. Parameters of such photons beam will allow getting high specific activity of radiated materials and technological effectiveness of radiochemical processes, and, as a result, competitiveness of medical and other radioisotopes production on electron accelerators.

KEY WORDS: high luminosity photon beams, radioisotopes production, numerical simulation, convertor, thermal load.