

# ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ $^{13}\text{N}$ И $^{15}\text{O}$ В ВОЗДУХЕ ОТ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ И СПЕКТРА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А.В. Ганн, В.В. Ганн, Г.Д. Пугачев, И.И. Шаповал, И.А. Шаповал\*, В.С. Шестакова*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*

*Харьков, Украина;*

*\*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

*E-mail: isharoval@kipt.kharkov.ua*

При использовании электронных пучков в физических экспериментах, медицине и промышленности происходит их конвертирование в тормозное излучение, которое производит радиолиз воздуха практически во всей рабочей камере ускорителя (РК). Запретный период входа в РК при энергии ускоренных электронов выше 30 МэВ определяется концентрацией  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе РК. Однако, в настоящее время в литературе и нормативной документации нет данных для расчета концентрации радиоактивных газов в РК в режиме работы ускорительной установки с тормозным излучением. С помощью пакета GEANT-4 вычислены спектры тормозного и нейтронного излучений, образующихся при взаимодействии электронного пучка с толстой мишенью, а затем и зависимость постоянно скорости образования радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе при энергиях ускоренных электронов от 25 до 100 МэВ. Полученные результаты могут быть использованы для расчета концентраций радиоактивных газов в РК и в атмосферных выбросах.

## ВВЕДЕНИЕ

В Санитарных правилах размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ (СП 1858-78) [1] и в унифицированных правилах гамма-электрон [2] дана детальная методика расчета наработки озона, окислов азота и изотопов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе РК при энергиях ускоренных электронов до 30 МэВ. При энергии выше 30 МэВ преобладающим становится образование  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$ . Предполагается, что чем быстрее из РК будет происходить выброс воздуха, тем будет меньше запретный период (ЗП) входа в РК после выключения ускорителя. Если воздух не содержит кроме озона и азота других токсичных элементов, его выброс в атмосферу может производиться без предварительной очистки. При расчете необходимых кратностей воздухообмена в РК мощных ускорителей электронов с энергией выше 30 МэВ возникает проблема с приземными концентрациями вредных веществ в атмосферном воздухе на значительных расстояниях от источника выброса, так как период полураспада  $^{13}\text{N}$  составляет 10 мин,  $^{15}\text{O}$  – 2 мин, а период распада озона – 50 мин. Особенно существенным это становится при создании технологических ускорителей электронов для наработки медицинских радионуклидов и подкритической сборки, управляемой электронным ускорителем с энергией до 100 МэВ и мощностью 100 кВт.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью пакета GEANT-4 были вычислены спектры тормозного  $f(E_{\gamma_{\max}}, E_{\gamma})$  и нейтронного  $f(E_n)$  излучений, образующиеся при взаимодействии электронного пучка с танталовой мишенью, а затем и зависимости постоянной скорости образования радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе РК. В расчетах учтены электромагнитные процессы, включая все стандартные: тормозное излучение, комптон, конверсия фото-

нов в пару  $e^+ e^-$ , аннигиляция  $e^+ e^-$ , фотоэффект, ионизация электроном, многократное кулоновское рассеяние. Также учтены адронные фотоядерные реакции, электроядерные, упругое и неупругое рассеяние нейтрона, распад нейтрона, индуцированное нейтроном деление ядра, захват нейтрона. Сопровождаются все адроны, необходимые для вышеописанных процессов. Для сохранения единого подхода к методике расчета наработки радиоактивных газов тормозным и нейтронным излучением, образующимся на толстой мишени, толщина танталовой мишени была выбрана 7 мм (1.67 радиационной длины), которая соответствует пробегу электрона с энергией 30 МэВ. Таким образом, вычисленные спектры можно считать спектрами фотонов и нейтронов, полученными при взаимодействии электронов с толстой мишенью. Нарботка ядер  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  к моменту времени  $t$  будет:

$$N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_n}^{E_{\max}} \sigma(E_{\gamma}) f(E_{\gamma_{\max}}, E_{\gamma}) dE_{\gamma}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – число ядер облучаемого элемента на пути  $\gamma$ -квантов;  $\sigma(E_{\gamma})$  – сечение образования нарабатываемого изотопа в зависимости от энергии  $\gamma$ -кванта;  $E_n$  – порог реакции;  $E_{\gamma_{\max}}$  – максимальная энергия в спектре фотонов;  $f(E_{\gamma_{\max}}, E_{\gamma})$  – функция, описывающая энергетический спектр фотонов (спектр тормозного излучения из танталовой мишени.);  $\lambda$  – постоянная распада.

Сечение для реакции  $\gamma + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{O} + n$  взято из работ [3], [4], а  $\gamma + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{N} + n$  из работы [5]. Усреднение сечений производилось в интервале шириной 1 МэВ.

Аналогичные расчеты проведены и для  $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{N} + 2n$  и  $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{O} + 2n$  реакций. Для проверки правильности методики расчета были проведены расчеты для наработки изотопов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  при условии облучения 1 г исходного вещества электро-

нами с энергией 25 МэВ в условиях, близких к экспериментальным. Толщина конвертера принималась равной 3 мм. Угол детектирования  $\gamma$ -квантов был выбран  $\leq 10^\circ$ . Экспериментальные результаты других авторов и нашего расчета в Бк/(г·мкА) приведены в Табл.1. Вместе с активностью образцов в таблице указано и время их облучения.

Таблица 1

Изотоп	[6]	[7]	[8]	Настоящая работа
$^{13}\text{N}$	$3,76 \cdot 10^6$ 1 ч	$1,4 \cdot 10^6$	$1,67 \cdot 10^6$ 10 мин	$2,94 \cdot 10^6$ 1 ч
$^{15}\text{O}$	$3,2 \cdot 10^6$ 1 ч	$8,4 \cdot 10^6$	2,5 10 мин	$4,21 \cdot 10^6$ 1 ч

Из таблицы видно, что наши расчеты (учитывая некоторые отличия наших условий расчета от экспериментальных) находятся в согласии с результатами, полученными в различных лабораториях мира.

Для упрощения расчета скорости наработки изотопов в воздухе будем считать, что все  $\gamma$ -кванты и нейтроны, вылетающие в угол  $4\pi$ , падают на столб воздуха площадью  $1 \text{ см}^2$  и длиной 1 м. В расчетах принималось содержание в воздухе азота 75,5% и кислорода 23,15%. Усреднение скорости наработки изотопов в воздухе РК проведено в  $4\pi$ . Получено, что вклад образовавшихся нейтронов в процесс образования ядер  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  не превышает 1% при  $E_0=25 \text{ МэВ}$ , и 5% для  $E_0=100 \text{ МэВ}$ . Так как работа ускорителя возможна только при наличии вентиляции, то всегда выполняется условие  $\lambda \cdot t < 1$  и активность нуклида будет

$$A = N \lambda t. \quad (2)$$

Результаты расчета постоянной скорости образования  $C'_\gamma = N_0 \cdot \lambda$  радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе при конвертировании на танталовой мишени толщиной 7 мм электронов с энергиями 25, 30, 60, 80 и 100 МэВ приведены в Табл.2.

Таблица 2

Изотоп	$E_0$ (МэВ)				
	25	30	60	80	100
$C'_\gamma$ ( $^{13}\text{N}$ )	5,2	9,5	22,1	25	26,6
$C'_\gamma$ ( $^{15}\text{O}$ )	12,4	31	92,5	80	97,7

Данные приведены в единицах Ки/(А·м·ч·МэВ), чтобы можно было использовать формулу [4.10] нормативного документа [1] для расчета концентрации радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе РК в режиме работы установки с тормозным излучением. Аналогично режиму работы ускорителя с электронным пучком концентрация радиоактивного газа в воздухе РК ускорителя может быть рассчитана по формуле:

$$C_{^{13}\text{N}}^{\text{кам}} = \frac{C'_\gamma E_0 \cdot I \cdot d}{V_{\text{кам}} \left( K_{\text{кам}} + \frac{0.693}{T_{\text{расп}}} \right)} \left[ 1 - e^{-\left( K_{\text{кам}} + \frac{0.693}{T_{\text{расп}}} \right)} \right], \quad (3)$$

где  $C'_\gamma$  – постоянная скорость образования нуклида в воздухе;  $I$  – ток пучка, А;  $d$  – средний радиус рабочей камеры, м;  $E_0$  – энергия ускоренных электронов, МэВ;  $V_{\text{кам}}$  – объем рабочей камеры,  $\text{м}^3$ ;  $K_{\text{кам}}$  – кратность воз-

духообмена в РК, 1/ч;  $T_{\text{расп}}$  – период полураспада радиоизотопа.

На Рис.1 показано нормированное на один запуск электрона угловое распределение  $\gamma$ -квантов с энергией выше 8 МэВ при  $E_0=25 \text{ МэВ}$ . Видно, что максимальное число  $\gamma$ -квантов вылетает под углом меньше  $30^\circ$ , что согласуется с результатами [9]. Уменьшение толщины конвертера до 3 мм, увеличивает выход фотонов с энергией выше 9 МэВ на  $\sim 20\%$ . Эти данные можно использовать для более точного определения среднего размера РК, с учетом расположения выхода пучка в зале и геометрии самого зала.

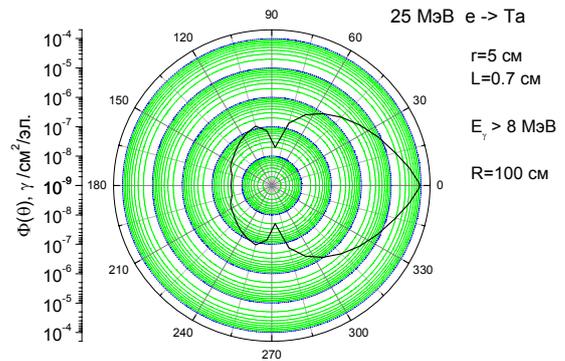


Рис.1. Нормированное угловое распределение  $\gamma$ -квантов с энергией выше 8 МэВ, которые вылетают из танталового конвертера толщиной 7 мм при энергии падающих электронов  $E_0=25 \text{ МэВ}$

В Табл.3 приведено отношение скорости наработки изотопов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$ ,  $C'_e / C'_\gamma$ , в режиме работы с электронным пучком и в режиме тормозного излучения с толстой мишенью.

Таблица 3

$C'_e / C'_\gamma$	$E_0$	
	25 МэВ	30 МэВ
$^{13}\text{N}$	5,9	4,2
$^{15}\text{O}$	5,7	4,8

Из таблицы видно, что скорость наработки изотопов на один ускоренный электрон при энергии до 30 МэВ в режиме работы с электронным пучком в несколько раз выше, чем в режиме работы ускорителя с тормозным излучением. Расстояние от выходного окна ускорителя до мишени в десятки и сотни раз меньше среднего диаметра рабочей камеры ускорителя. С увеличением энергии ускоренных электронов отношение  $C'_e / C'_\gamma$  падает. Поэтому наработка радионуклидов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  в воздухе РК  $\gamma$ -квантами тормозного излучения будет больше и при расчете системы вентиляции и режима ее работы нужно учитывать режим работы ускорителя и пробеги электронов и фотонов в воздухе РК.

## ВЫВОДЫ

Так как при работе электронных ускорителей с большими токами при энергиях электронов больше 25 МэВ пробег электронов в воздухе от выходного окна до мишени составляет несколько сантиметров, а размеры рабочей камеры ускорителя согласно [1] не ниже  $100 \text{ м}^2$ , то определяющим для расчетов системы

вентиляції становить вплив тормозного випромінювання на утворення ізотопів  $^{13}\text{N}$  і  $^{15}\text{O}$ . При товщині танталового конвертера 3 мм вихід тормозних  $\gamma$ -квантів з енергією вище 9 Мев збільшується на 20%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарні правила розміщення і експлуатації прискорювачів електронів з енергією до 100 Мев. СП 1858-78. Москва, 1981.
2. «Уніфіковані правила пристроїв і безпечної експлуатації радіаційно-технологічних установок». («Уніфіковані правила гамма-електронів»). Москва, 1988.
3. В.В. Варламов, Н.Г. Ефимкин, Б.С. Ишханов, В.В. Сапуненко // *ВАНТ. Серія "Ядерні константи"*. 1993, в.1, с.52.
4. P. Carlos, H. Beil, R. Bergère, et al. Photoneutron cross sections for oxygen from 24-133 MeV // *Nuclear Physics A*, 1982, v.378, Issue 2, p.317-339.
5. I.M. Dixon. Giant resonance reaction products. In: Proc. Int. Conf. Photonuclear Reactions and Applications // *Asilomar*. 1973, p. 727.
6. M.N. McGregor. Isotope Production with 10-kw Linear Accelerators // *Nucleonics*. 1957, v.15, N 11, p.176-180.
7. G.I. Lutz // *Anal. Chem.* 1969, v.41, p.424-427.
8. A.N. Dovbnya, A.S. Zadvorny, B.I. Shramenko. «Production of short-lived radionuclides on the electron linac for PET» // *ВАНТ. Серія: «Ядерно-фізическі дослідження»*. 1999. №3(34), с.105-107.
9. Н.А. Довбня, Г.Д. Пугачев, И.И. Шаповал. Получение фотонных пучков высокой яркости на электронных ускорителях // *Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Серія фізическа. «Ядра частини, поля»*. 2008, в.1(37), №294, с.90-94.

Стаття надійшла в редакцію 07.09.2009 г.

#### DEPENDENCE OF RATE OF $^{13}\text{N}$ AND $^{15}\text{O}$ RADIONUCLIDES PRODUCTION IN AIR FROM THE MAXIMAL ENERGY AND THE SPECTRUM OF BREMSSTRAHLUNG

*A.V. Gann, V.V. Gann, G.D. Pugachev, I.I. Shapoval, I.A. Shapoval, V.S. Shestakova*

While using electron beams in physical experiments, medicine and industry their converting in bremsstrahlung takes place which leads to air radiolysis practically in all accelerating chamber (ACH). Forbidden period of an entrance to ACH at energy of accelerated electrons above 30 MeV is determined by the concentration of  $^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$  in ACH air. However, now in the literature and normative documentation there is no data for concentration calculation of radioactive gases in ACH in an operational mode of accelerating setup with bremsstrahlung. By means of GEANT 4 package spectra of bremsstrahlung and neutron radiations are calculated, which are formed at interaction of an electron beam with a thick target. Also the dependence of constant rate for  $^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$  radionuclides production in air are estimated at the energy of accelerated electrons from 25 up to 100 MeV. Obtained results can be used for calculation of concentration of radioactive gases in ACH and in atmospheric emissions.

#### ЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ УТВОРЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ $^{13}\text{N}$ І $^{15}\text{O}$ У ПОВІТРІ ВІД МАКСИМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ Й СПЕКТРА ГАЛЬМОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*A.V. Gann, V.V. Gann, G.D. Pugachev, I.I. Shapoval, I.A. Shapoval, V.S. Shestakova*

При використанні електронних пучків у фізичних експериментах, медицині і промисловості відбувається їхнє конвертування в гальмове випромінювання, що робить радіоліз повітря практично у всій робочій камері прискорювача (РК). Заборонний період входу в РК при енергії прискорених електронів вище 30 Мев визначається концентрацією  $^{13}\text{N}$  і  $^{15}\text{O}$  у повітрі РК. Однак у літературі і нормативній документації немає даних для розрахунку концентрації радіоактивних газів у РК у режимі роботи прискорювача з гальмовим випромінюванням. За допомогою пакета GEANT-4 обчислені спектри гальмового й нейтронного випромінювань, що утворюються при взаємодії електронного пучка з товстою мішенню, а потім залежність постійно швидкості утворення радіонуклідів  $^{13}\text{N}$  і  $^{15}\text{O}$  у повітрі при енергіях прискорених електронів від 25 до 100 Мев. Отримані результати можуть бути використані для розрахунку концентрацій радіоактивних газів у РК і в атмосферних викидах.