

РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УСТАНОВКИ АМРМІ

*В.А. Воронко, А.Н. Довбня, Н.Д. Масалитин, Г.Д. Пугачев, О.А. Репихов,
А.Ф. Стоянов, В.А. Цымбал, И.И. Шаповал, Д.Ю. Шахов*

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

E-mail: aizatsky@kipt.kharkov.ua

Установка АМРМІ (альтернативный метод производства медицинских изотопов) с энергией ускоренных дейтронов 2,2 МэВ и средним током ускоренных дейтронов 20 мА создана в расширенном бункере ускорителя электронов ЛУЭ-2000 для получения интенсивных пучков нейтронов. Расчеты показывают, что при взаимодействии ускоренных дейтронов с бериллиевой мишенью образуется 4 энергетические группы нейтронов с энергиями 2,26; 3,8; 5,5; и 5,6 МэВ. Кроме того, нейтроны образуются в реакции $d + d \rightarrow n + {}^3\text{He}$ в выходных устройствах ускорителя и поворотном магните в результате набивки дейтронов в материалы этих устройств. Ожидаемый выход нейтронов – $6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с. Установлено, что существующая бетонная защита ЛУЭ-2000 и вновь установленная защита из графита и тяжелого бетона обеспечивают соблюдение проектного контрольного уровня мощности дозы для персонала категории «А» на рабочих местах.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ННЦ ХФТИ создается ускоритель дейтронов АМРМІ в бункере здания №2 для наработки медицинских радионуклидов, нейтронной терапии и активационного анализа. Управление установкой АМРМІ осуществляется из пультовой, расположенной на первом этаже здания №2. Ускоритель работает в режиме непрерывного излучения. На Рис.1 показано продольное сечение расширенного бункера здания №2, проходящее через вертикальную ось ускорителя АМРМІ и ось повернутого пучка от поворотного магнита до бериллиевой мишени. На Рис.2 показано поперечное сечение расширенного бункера, проходящее через точку В и вертикальную ось ускорителя АМРМІ. Взаимодействие пучка дейтронов с мишенью из бериллия происходит в точке А, а взаимодействие с поворотным магнитом – в точке В. Основным фактором, определяющим величину радиационной защиты ускорителя, являются нейтроны. Кроме того, в воздухе под воздействием нейтронов образуется ${}^{41}\text{Ar}$.

2. РАСЧЕТ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ АМРМІ ОТ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Расчет мощности эквивалентной дозы проведен для точек, расположенных в поперечном сечении расширенного бункера здания №2, которое проходит через бериллиевую мишень (точки А_i), и во втором сечении, проходящем через вертикальную ось ускорителя (точки В_i), расположенных аналогично точкам А_i), так как в этих точках ожидается максимальный уровень излучения. Мощность дозы нейтронов на расстоянии R от мишени определяется по формуле:

$$\dot{H} = \frac{\alpha Y}{4\pi R^2 10^4 K}, \quad (1)$$

где Y – поток нейтронов из мишени, нейтр./с; α – коэффициент перевода плотности потока нейтронов в мощность дозы [1]; α = 1,7 мкЗв·см²·с /ч; R – расстояние от мишени до расчетной точки; K – кратность ослабления мощности дозы нейтронов в материале защиты. Расчет кратности ослабления мощности дозы нейтронов в защите проведен методом длин релаксации:

$$K_{H_i} = e^{\lambda_i d_i}, \quad (2)$$

где d_i – толщина радиационной защиты из i-го материала, см; d_1 – толщина защиты из графита; d_2 – толщина защиты из тяжелого бетона; d_3 – толщина защиты из обычного бетона; d_4 – толщина защиты из железа (корпус и узлы ускорителя дейтронов); d_5 – толщина грунтовой обваловки снаружи здания; λ_i – длина релаксации нейтронов в i-м материале (см). При взаимодействии дейтронного пучка с энергией 2,2 МэВ с бериллиевой мишенью образуются 4 группы нейтронов в реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ [1]. Под углом 90° к направлению пучка дейтронов их энергии будут составлять 5,6; 5,4; 3,8; 2,3 МэВ. Вклад этих групп в полный поток энергии нейтронного излучения составляет 30, 30, 20 и 20 %. Общий выход нейтронов ожидается $6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с. Потери пучка в поворотном магните (точка В) ожидаются ~ 1 %. Ускоренные дейтроны набиваются на внутреннюю поверхность латунной камеры (образуется дейтронная мишень). После 100 часов работы ускорителя в результате реакции $d + d \rightarrow n + {}^3\text{He}$ выход нейтронов ожидается ~ $2,5 \cdot 10^8$ нейтр./с. Кроме того, в магните (точка В) будут попадать по дейтронпроводу нейтроны, образующиеся в точке А. Суммарный выход быстрых нейтронов из точки В ожидается $1 \cdot 10^9$ нейтр./с [3], [4]. Кратность ослабления мощности дозы нейтронов в расчетных точках без радиационной защиты будет

$$K_R = 4\pi R^2 \cdot 10^4, \quad (3)$$

где R – расстояние до расчетной точки (м). С учетом кратности ослабления в каждом материале защиты, общая кратность ослабления нейтронной дозы будет

$$K = K_R \cdot K_{d_1} \cdot K_{d_2} \cdot K_{d_3} \cdot K_{d_4} \cdot K_{d_5}. \quad (4)$$

Длины релаксации нейтронов с энергиями от 2,3 до 5,6 МэВ составляют: при взаимодействии с графитом – 13,2 см, бетоном – 16 см, тяжелым бетоном – 12,7 см, с железом – 6,5 см, с сырым грунтом – 22 см [5]. Кратность ослабления мощности дозы нейтронов, определяемая расстоянием K_{RA} , материалом защиты K_{di} и общая кратность ослабления K для нейтронов, образующихся в бериллиевой мишени, приведены в Табл.1.

Таблица 1

| Точки | A ₁ | A ₂ | A ₃ | A ₄ | A ₅ | A ₆ | A ₇ | A ₈ |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| K _{RA} | 8·10 ⁶ | 1,1·10 ⁷ | 7,8·10 ⁶ | 5,6·10 ⁶ | 1,4·10 ⁷ | 9,9·10 ⁶ | 9,1·10 ⁶ | 7,8·10 ⁶ |
| K _{d1} | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 |
| K _{d2} | 2,8·10 ⁴ | 2,8·10 ⁴ | | | | 2,8·10 ⁴ | | |
| K _{d3} | 2,7·10 ⁵ | 2,7·10 ⁵ | 2,8·10 ² | 1,2·10 ⁴ | 1,2·10 ⁴ | 9,7·10 ² | 1,2·10 ⁴ | 4,2·10 ² |
| K _{d5} | | | 3,6·10 ³ | | | | | 3,6·10 ³ |
| K _A | 5,7·10 ¹⁸ | 7,8·10 ¹⁸ | 7,4·10 ¹⁴ | 6,3·10 ¹² | 1,6·10 ¹³ | 7·10 ¹⁵ | 1·10 ¹² | 1,1·10 ¹⁴ |

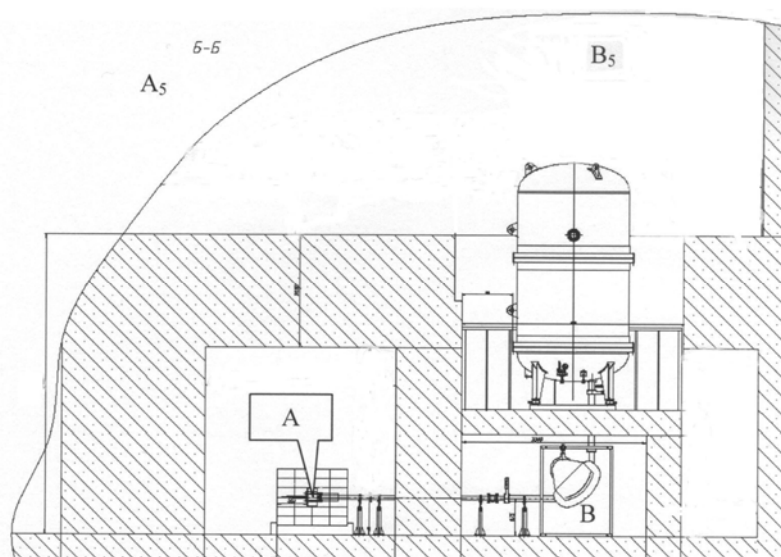


Рис. 1. Продольное сечение расширенного бункера здания №2, проходящее через вертикальную ось ускорителя АМРМІ и ось повернутого пучка от поворотного магнита до бериллиевой мишени

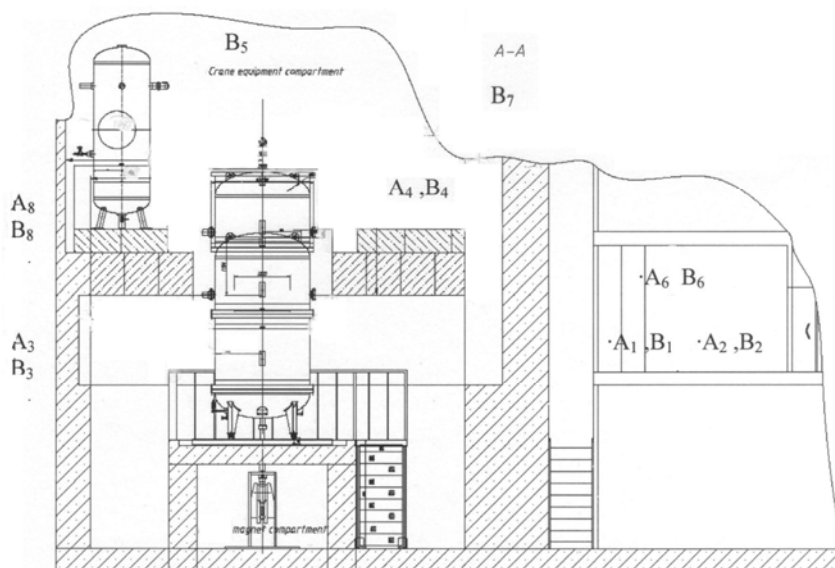


Рис. 2. Поперечное сечение расширенного бункера, проходящее через точку В и вертикальную ось ускорителя АМРМІ

Кратность ослабления мощности дозы нейтронов K_{RB} , определяемая расстоянием от расчетных точек, материалом защиты K_{d1} и общая кратность ослабле-

ния K для нейтронов, образующихся в результате реакции $d+d \rightarrow n+{}^3\text{He}$ в латунной камере (точка В), приведены в Табл.2.

Таблица 2

| Точки | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | B ₅ | B ₆ | B ₇ | B ₈ |
|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| K _{RB} | 8·10 ⁶ | 1,1·10 ⁷ | 7,8·10 ⁶ | 5,6·10 ⁶ | 1,4·10 ⁷ | 8,9·10 ⁶ | 9,1·10 ⁶ | 7,8·10 ⁶ |
| K _{d2} | 1,1·10 ² | 1,1·10 ² | 2,5·10 ² | 23 | 23 | 1,1·10 ² | 23 | 5,4·10 ² |
| K _{d3} | 1,4·10 ⁵ | 1,4·10 ⁵ | 1,5·10 ² | 1,2·10 ⁴ | | 9,7·10 ² | | 42 |
| K _{d4} | | | | | 23 | | 23 | |
| K _{d5} | | | 3,6·10 ³ | | | | | 3,6·10 ³ |
| K _B | 1,2·10 ¹⁴ | 1,7·10 ¹⁴ | 1·10 ¹⁵ | 1,5·10 ¹¹ | 7,4·10 ⁹ | 9,5·10 ¹¹ | 4,8·10 ⁹ | 6,4·10 ¹⁴ |

Плотность потока нейтронов с энергиями от 2,3 до 5,6 МэВ в расчетных точках будет

$$\Phi_A = \frac{Y_A}{K_A} \quad \text{и} \quad \Phi_B = \frac{Y_B}{K_B}, \quad (5)$$

где $Y_A = 6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с, а $Y_B = 10^9$ нейтр./с. С учетом коэффициента запаса 2, проектная плотность потока нейтронов для персонала категории А будет

$$\Phi = 1,38 \text{ нейтр./см}^2 \cdot \text{с.}$$

Плотность потока нейтронов на рабочих местах персонала в точках A_1, A_2, A_6 будет значительно меньше 1 нейтр./см²·с. В точках A_3 и A_8 имеется возможность усиления защиты в случае необходимости. Точки A_4, A_5, A_6 находятся в помещении, куда во время работы ускорителя персоналу не будет доступа.

Во всех точках B_i радиационная обстановка полностью будет определяться выходом нейтронов из точки А. Плотность потока нейтронов не будет превышать величину 1 нейтр./см²·с.

3. РАСЧЕТ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ АМРМ ОТ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Расчеты показывают, что 94 % быстрых нейтронов из $6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с замедляются в графитовом блоке до тепловых. После прохождения графита остается $\sim 6 \cdot 10^{11}$ нейтр./с быстрых нейтронов и $\sim 6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с – тепловых. Тепловые нейтроны обладают большей проникающей способностью, чем быстрые. Так, длина релаксации тепловых нейтронов в железе составляет 25 см, в бетоне – 27 см, в графите – 38 см. В тяжелом бетоне $\rho = 3,3$ г/см³ длину релаксации примем 27 см. Длина графитового замедлителя составляет 60 см, поэтому поглощение тепловых нейтронов не будем учитывать, так как оно составляет $\sim 10\%$ от всех нейтронов. Для поглощения тепловых нейтронов за графитом будут установлены листы борала с коэффициентом ослабления тепловых нейтронов $K_{\text{дбор}} = 10^3$ [6].

Таблица 3

| Точки | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| K_{RA} | $8 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^7$ | $7,8 \cdot 10^6$ | $5,6 \cdot 10^6$ | $1,4 \cdot 10^7$ | $9,9 \cdot 10^6$ | $9,1 \cdot 10^6$ | $7,8 \cdot 10^6$ |
| K_{d2} | $1,2 \cdot 10^2$ | $1,2 \cdot 10^2$ | | | | | | |
| K_{d3} | $1,6 \cdot 10^3$ | $1,6 \cdot 10^3$ | 28 | $2,6 \cdot 10^2$ | $2,6 \cdot 10^2$ | $2,6 \cdot 10^2$ | $2,6 \cdot 10^2$ | 9 |
| K_{d5} | | | $1,5 \cdot 10^2$ | | | | | $1,5 \cdot 10^2$ |
| $K_{\text{дбор}}$ | 10^3 | 10^3 | 10^3 | 10^3 | 10^3 | 10^3 | 10^3 | 10^3 |
| $K_{\text{Атепл}}$ | $1,5 \cdot 10^{15}$ | $2,1 \cdot 10^{15}$ | $3,3 \cdot 10^{13}$ | $1,4 \cdot 10^{12}$ | $3,6 \cdot 10^{12}$ | $2,6 \cdot 10^{13}$ | $2,4 \cdot 10^{12}$ | $1,0 \cdot 10^{13}$ |

Кратность ослабления мощности дозы тепловых нейтронов $K_{\text{Атепл}}$, образующихся при замедлении быстрых нейтронов в графите, определяемая расстоянием до расчетных точек A_i , и кратность ослабления, определяемая материалом защиты, приведены в Табл.3.

Из таблицы видно, что при данной кратности ослабления в защите максимальная плотность потока тепловых нейтронов составляет менее 17 нейтр./см², что значительно ниже нормы.

Для расчета плотности потока тепловых нейтронов в точках B_i необходимо вычислить поток тепловых нейтронов, приходящих в камеру с магнитом (В) через стенку между этой камерой и камерой с бериллиевой мишенью. Кроме того, в камеру с магнитом по дейтронопроводу диаметром 10 см будут попадать тепловые нейтроны из графитового блока. Поток тепловых нейтронов от замедлителя через стенку в камеру с магнитом равен $3 \cdot 10^7$ нейтр./с, а поток тепловых нейтронов через дейтронопровод в направлении магнита равен $5,1 \cdot 10^9$ нейтр./с. После отражения от магнита и прохождения через бораль поток тепловых нейтронов будет составлять $\Phi_{\text{тн}} = 1,2 \cdot 10^6$ нейтр./с.

Таким образом, плотность потока тепловых нейтронов в расчетных точках будет определяться их отражением от магнита и бетонной поверхности

камеры, а также ослаблением в материалах защиты (бетон и железо ускорителя). Плотность потока тепловых нейтронов, падающих на потолок камеры с магнитом, ожидается приблизительно 500 нейтр./см²·с с равномерным распределением по поверхности. Поток с равномерной плотностью нейтронов от потолка камеры с магнитом в направлении точек B_4, B_5 и B_7 согласно [7] приблизительно можно считать как излучение дискового источника для точек, расположенных на оси диска:

$$\Phi_{\text{тн}} = \frac{S_A}{2} (1 - \cos \theta_0), \quad (6)$$

где S_A – удельная мощность излучающей пластины (составляет 500 нейтр./см²·с), θ_0 – $\arcsin \frac{R_1}{R_2}$, а – эквивалентный радиус диска, R_1 – расстояние от диска (потолка камеры) до расчетной точки B_i .

Для точек B_1, B_2, B_3, B_6 и B_8 ослабление мощности дозы можно считать как для дискового источника в точках, расположенных вне оси симметрии диска. Кратности ослабления мощности дозы тепловых нейтронов K_{RB} , выходящих из потолка камеры с поворотным магнитом в направлении расчетных точек B_i , приведены в Табл.4. Обозначения K_i аналогичны обозначениям Табл.1; $K_{\text{тн}}$ – кратность ослабления плотности потока тепловых нейтронов согласно формуле (4).

Таблица 4

| Точки | B_1 | B_2 | B_3 | B_4 | B_5 | B_6 | B_7 | B_8 |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| $K_{\text{тн}}$ | 83 | 91 | 46 | 2 | 2 | 175 | 2 | 16 |
| K_{d2} | 9 | 9 | 13 | 4,4 | 4,4 | 9 | 4,4 | 19 |
| K_{d3} | $1,6 \cdot 10^3$ | $1,6 \cdot 10^3$ | 28 | $2,6 \cdot 10^2$ | | $2,6 \cdot 10^2$ | | 9 |
| K_{d4} | | | | | 2,3 | | 2,3 | |
| K_{d5} | | | $1,4 \cdot 10^2$ | | | | | $1,4 \cdot 10^2$ |
| K_B | $1,2 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^6$ | $2,3 \cdot 10^6$ | $2,3 \cdot 10^3$ | 20 | $4,1 \cdot 10^5$ | 20 | $1,1 \cdot 10^5$ |

Из Табл.3 и 4 видно, что плотность потока тепловых нейтронов на рабочих местах персонала не превышает ПДК_А [1]. Плотность потока γ -квантов, образующихся в результате реакции захвата тепловых нейтронов ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{Be}$ [6] (за плоской защитой в камере с мишенью, имеющей форму плиты), будет

$$\Phi_{\gamma} = \frac{\Phi_{ТН} \cdot \Sigma_{n,\gamma} \cdot e^{-\Sigma \delta}}{2\Sigma} \left\{ e^{\Sigma \delta} \cdot E_1(\mu\delta) - E_1[(\mu - \Sigma)\delta] - \ln\left(\frac{\mu - \Sigma}{\mu}\right) \right\}, \quad (7)$$

где $\Phi_{ТН}$ – плотность потока тепловых нейтронов, падающих на плоскую плиту (выход γ -квантов с противоположной стороны плиты); $\Sigma_{n,\gamma}$ – сечение захвата тепловых нейтронов в материалах плиты (см^{-1}); μ – линейный коэффициент ослабления захватных γ -квантов (см^{-1}); $1/\Sigma$ – длина релаксации тепловых нейтронов (см); δ – толщина защиты (см); $E_1(x)$ – интегральная экспонента [6].

При захвате тепловых нейтронов железо активируется с образованием ${}^{59}\text{Fe}$ по реакции ${}^{58}\text{Fe}(n,\gamma){}^{59}\text{Fe}$ ($T_{1/2} = 45,1$ дней), излучающего γ -кванты с энергией $E_{\gamma} = 1,2$ и $1,29$ МэВ. Кроме того, в других изотопах железа возникают мгновенные γ -кванты с энергией $7,6$ МэВ. После замедления в графите и поглощения в борале поток тепловых нейтронов падает на плоскую плиту из тяжелого бетона. Плотность потока составляет $1,7 \cdot 10^7$ нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Плотность потока мгновенных γ -квантов из плиты тяжелого бетона будет $\Phi_{\gamma} = 4,3 \cdot 10^4$ γ -квант /($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), а мощность дозы, создаваемая этими γ -квантами $P_{\gamma} = 92$ мкР/с. Защита из бетона толщиной 2 м с учетом фактора накопления ослабляет мощность дозы до $3,6 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч. Таким образом, γ -кванты не будут давать существенного вклада в мощность дозы на рабочих местах (A_1, A_2).

4. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ

Для получения максимального потока нейтронов в качестве мишени выбран бериллий. Согласно [2] по нашим оценкам величина потока по реакции ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{Be}$ составит $Y \sim 6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с с практически изотропным распределением в 4 п. Энергии нейтронов будут от $2,3$ до $5,6$ МэВ, а длина их замедления – от $18,2$ до 21 см. После прохождения 60 см графита более 95% нейтронов будут иметь энергию $< 1,44$ эВ. Для упрощения расчетов будем считать, что весь поток нейтронов ($6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с) взаимодействует со столбом воздуха площадью 1 см^2 и длиной R . Содержание аргона-40 в воздухе составляет $1,29\%$.

В установленном режиме выход ядер ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$, и ${}^{41}\text{Ar}$ в результате реакции ${}^{40}\text{Ar}(n,\gamma){}^{41}\text{Ar}$ будет

$$N = N_o \int_{E_n}^{E_{n\max}} \sigma(E_n) f(E_n) dE_n, \quad (8)$$

где N – количество ядер нарабатываемого изотопа в секунду; N_o – число ядер исходного изотопа на пути нейтронов; $\sigma(E_n)$ – сечение реакции в зависимости от энергии нейтрона (см^2); E_n – порог реакции (МэВ); $E_{n\max}$ – максимальная энергия нейтронов в спектре (МэВ); $f(E_n)$ – функция, описывающая энергетический спектр нейтронов. Ядерные данные для расчета активации воздуха взяты из [8]. Концентрация нарабатываемого изотопа в установленном режиме будет

$$C_{\text{кам.}} = N(\text{Ки}) / [(K_{\text{кам.}} + 0,693/T_{1/2}) \cdot V_{\text{кам.}}]; \text{ Ки/м}^3, \quad (9)$$

где $T_{1/2}$ – период полураспада нарабатываемого изотопа; $K_{\text{кам.}}$ – кратность воздухообмена в рабочей камере; $V_{\text{кам.}}$ – объем рабочей камеры.

Запретный период входа в рабочую камеру ускорителя будет составлять

$$T_{\text{запр.}} = \ln(C_{\text{кам.}} / \text{ПДК}) / (K_{\text{кам.}} + 0,693/T_{1/2}), \quad (10)$$

где ПДК – предельно допустимая концентрация нарабатываемого радионуклида.

В установленном режиме $N = 5,52 \cdot 10^8$ ядер ${}^{41}\text{Ar}/\text{с}$, а объемная скорость его наработки $C_{{}^{41}\text{Ar}} = 20,4$ Ки/м³·ч

$$C_{\text{кам.}} = 20,4 / 15,38 \cdot 60 = 0,222 \text{ Ки/м}^3.$$

Тогда запретный период входа в рабочую камеру ускорителя, определяемый ${}^{41}\text{Ar}$, будет

$$T_{\text{запр.}} = (\ln 0,222 / 2,2 \cdot 10^{-4}) / 15,38 = 0,3 \text{ ч} = 20 \text{ мин.}$$

Применение борала в качестве поглотителя нейтронов ослабит их поток в 1000 раз и, соответственно, снизит запретный период входа в рабочую камеру. Из-за очень малого сечения взаимодействия нейтронов с энергией до 6 МэВ с ядрами азота и кислорода их активация будет очень мала по сравнению с генерацией ${}^{41}\text{Ar}$.

5. РАСЧЕТ НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Чтобы свести до минимума активацию оборудования АМРМИ, все выходные узлы и дейтронопровод изготовлены из алюминия. На бериллиевой мишени также не будет остаточной активности. Активация камеры из латуни и расположенного за ней цилиндра Фарадея из меди будет за счет нейтронов от бериллиевой мишени, которые замедлились до тепловых и по дейтронопроводу попали обратно в камеру с поворотным магнитом. Основной вклад в уровень активности в камерах поворотного магнита и бериллиевой мишени будут давать γ -кванты, образующиеся в магните, изготовленном из железа, и железе, входящем в состав тяжелого бетона. Поток тепловых нейтронов в камере магнита будет составлять $1 \cdot 10^9$ в секунду (пропорционально площади сечения дейтронопровода). В расчетах принималось, что все образующиеся нейтроны ($6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с) замедляются в графите до тепловых. Количество изотопа Fe-58 составляет $0,33\%$ в железе естественного состава. Для изотопов меди, цинка и железа поиск сечений захвата нейтронов с энергиями от 0 до 10 МэВ был произведен в ENDF/B-VII. Равновесная активность достигается за время работы ускорителя, равное примерно 3 периодам полураспада нарабатываемого изотопа. В камере магнита напротив отверстия дейтронопровода от алюминиевой мишени поставлен бораль с коэффициентом поглощения тепловых нейтронов 10^3 . Мощность дозы, создаваемая нарабатываемым изотопом, определяется по формуле [7]:

$$\dot{H} = 2,8 \text{ М} \cdot K_{\gamma} / R^2, \text{ мкЗв/с}, \quad (11)$$

где K_{γ} – гамма-постоянная, взятая из работ [9,10]; М – активность нарабатываемого изотопа, выраженная в мКи; R – расстояние от источника, выраженное в см. Расчет наработки ядер изотопов меди, цинка и железа производился аналогично описанному в разд. 4.

Результаты расчета вкладов различных изотопов в мощность дозы (в мкЗв /ч) сразу после выключения пучка, создаваемую цилиндром Фарадея, камерой из латуни и поворотным магнитом из железа после его облучения вплотную и на расстоянии 10 и 50 сантиметров от магнита (точка В), приведены в Табл.5. Результаты расчета вклада различных изотопов и мощность дозы (в мкЗв/ч) от времени, прошедшего после выключения ускорителя, создаваемая цилиндром Фарадея, камерой из латуни и поворотным магнитом из железа на расстоянии 10 см от мишени (точка А), приведены в Табл.6.

Таблица 5

| $\begin{matrix} \square \\ H \\ \text{изотоп} \end{matrix}$ | Вплотную | R = 10 см | R = 50 см |
|---|-------------------|-----------|-----------|
| ^{64}Cu | $1,35 \cdot 10^4$ | 135 | 5,4 |
| ^{66}Cu | $1,89 \cdot 10^4$ | 189 | 7,6 |
| ^{65}Zn | $3,6 \cdot 10^2$ | 3,6 | 0,14 |
| ^{69}Zn | $2,7 \cdot 10^3$ | 27 | 1,1 |
| ^{59}Fe | $1,1 \cdot 10^4$ | 110 | 4,4 |

Таблица 6

| $\begin{matrix} \square \\ H \\ \text{изотоп} \end{matrix}$ | После выключения | 1 час | 24 часа | 5 дней |
|---|------------------|---------------------|---------|--------|
| ^{64}Cu | 135 | 125 | 21 | 0,012 |
| ^{66}Cu | 189 | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | - | - |
| ^{65}Zn | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,56 |
| ^{69}Zn | 27 | 11,4 | - | - |
| ^{59}Fe | 110 | 110 | 105 | 100 |

Из таблиц 5 и 6 видно, что основной вклад в мощность поглощенной дозы через 24 часа после выключения дает ^{59}Fe ($T_{1/2} = 45,1$ дней), излучающий γ -кванты с энергией 1,1 и 1,29 МэВ. Будем считать, что все образовавшиеся в бериллиевой мишени нейтроны ($6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с), замедляются до тепловых и попадают на стенки из тяжелого бетона. У стены внутри камеры мощность дозы, создаваемая ^{59}Fe , образовавшимся в тяжелом бетоне, будет составлять 11 мкЗв/ч. Для ослабления потока тепловых нейтронов и, следовательно, для снижения уровня наведенной активности в железе необходимо применить бораль, изготовленный в виде листов алюминия, между которыми засыпана порошкообразная смесь карбида бора с алюминием. Лист борала толщиной 4,4 мм с массовым содержанием B_4C (30 %) снижает плотность потока тепловых нейтронов в 1000 раз.

Можно использовать также лист из борного графита толщиной 2,5 см и содержанием бора до 4 %, с коэффициентом ослабления тепловых нейтронов 400. С помощью борала можно понизить наработку изотопов меди и цинка в латунной камере.

ВЫВОДЫ

Радиационная обстановка на рабочих местах (в точках $A_1, A_2, A_6, B_1, B_2, B_6$) полностью будет определяться выходом нейтронов из бериллиевой мишени. Плотность потока быстрых нейтронов на рабочих местах будет значительно меньше 1 нейтр./с·см². Плотность потока тепловых нейтронов на рабочих местах будет создавать мощность эквивалентной дозы значительно меньше контрольной мощности дозы (КМД_д). Гамма-кванты не будут давать существенного вклада в мощность дозы на рабочих местах. Через 24 часа после выключения ускорителя основной вклад в мощность дозы дает ^{59}Fe с периодом полураспада, равным 45,1 дней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) // Санитарные правила и нормативы 2.6.1 2573-2010 РФ. Киев, 1997.
2. Н.А. Власов. *Нейтроны*. М.: «Наука», 1971.
3. М.А. Lone, et al. Characteristics of Neutrons from Be Target Bombarded by Protons, Deuterons and Alpha Particles // *Nucl. Instrum. and Methods*. 1981, v.189, p.515-523.
4. Investigation on neutron fields produced in $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ and $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{Be}$ reactions. L. Olah, A.M. El-Megrab et al. // *Nucl. Instrum. and Methods*. 1998, A 404, 373-380.
5. В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. *Защита от ионизирующих излучений* / Справочник. Москва: «Энергоатомиздат», 1995.
6. Б.П. Голубев. *Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений*. Москва: «Атомиздат», 1976.
7. *Защита от ионизирующих излучений* / Под редакцией Н.Г. Гусева. 3-е изд. Переработанное и дополненное. Москва: «Энергоатомиздат», 1989.
8. ENDF/B-VII
9. *Справочник по радиоактивным излучениям и защитам* / Н.Г. Гусев. Москва: «Медгиз», 1956.
10. Catalog of Gamma Rays from Radioactive Decay // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1983, v.29, №2, p.190-406.

Статья поступила в редакцию 04.10.2011 г.

DESIGNING OF RADIATION SHIELDING OF INSTALLATION OF AMPMI

V.A. Voronko, A.N. Dovbnya, N.D. Masalitín, G.D. Pugachev, O.A. Repikhov, A.F. Stoyanov, V.A. Tsymbal, I.I. Shapoval, D.Yu. Shakhov

Installation of AMPMI (Alternative method of production of medical isotopes) with energy of deuterons 2,2 MeV and middle current of 20 mA is created in the extended bunker of electron linac of LUE-2000 for the receipt of intensive beam of neutrons. Calculations show that at interaction of deuterons with a beryllium target appears 4 power groups of neutrons with energies 2,26; 3,8; 5,5; and 5,6 MeV. In addition, neutrons appear in the reaction of $d + d = n + {}^3\text{He}$ at the outputs devices of the accelerator and turning magnet as a result of stuffing of deuterons in materials of these devices. Expected neutron yield is $6 \cdot 10^{13}$ n/s. It is got, that existent concrete shielding of LUE-2000 and reset shielding from a graphite and heavy concrete provide the observance of project control level of power of dose for the personnel of category of «A» in the workplace.

РОЗРОБКА РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ УСТАНОВКИ АМРМІ

В.О. Воронко, А.М. Довбня, М.Д. Масалітін, Г.Д. Пугачов, О.О. Репіхов, О.Ф. Стоянов, В.О. Цимбал, І.І. Шаповал, Д.Ю. Шахов

Установка АМРМІ (альтернативний метод виробництва медичних ізотопів) з енергією прискорених дейтронів 2,2 МеВ і середнім струмом прискорених дейтронів 20 мА створена в розширеному бункері прискорювача електронів ЛПЕ-2000 для отримання інтенсивних пучків нейтронів. Розрахунки показують, що при взаємодії прискорених дейтронів з берилієвою мішенню утворюється 4 енергетичних групи нейтронів з енергіями 2,26; 3,8; 5,5; і 5,6 МеВ. Крім того, нейтрони утворюються в реакції $d + d = n + {}^3\text{He}$ у вихідних пристроях прискорювача і поворотному магніті в результаті набивання дейтронів в матеріали цих пристроїв. Очікуваний вихід нейтронів – $6 \cdot 10^{13}$ нейтр./с. Отримано, що існуючий бетонний захист ЛПЕ-2000 і знов встановлений захист з графіту і важкого бетону забезпечують дотримання проектного контрольного рівня потужності дози для персоналу категорії «А» на робочих місцях.