Pol J Med. Phys Eng 2011;17(4):189-206 PL ISSN 1425-4689 doi: 10.2478/v10013-011-0019-y website:http://www.pjmpe.waw.pl

Mieczysław Zielczyński¹, Natalia Golnik², Michał A. Gryziński¹

Sposób wyznaczania przestrzennego współczynnika jakości neutronów prędkich w polach promienowania mieszanego wykorzystujacy zaawansowane metody rekombinacyjne

A method of determination of ambient quality factor of fast neutrons in mixed radiation fields using advanced recombination methods

¹Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock-Świerk, Polska e-mail: m.gryzinski@cyf.gov.pl
²Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Warszawska e-mail: golnik@mchtr.pw.edu.pl

Przedstawiono sposób wyznaczania przestrzennego współczynnika jakości neutronów prędkich, $Q_n^*(10)$, w polu promieniowania mieszanego o nieznanym, lecz ograniczonym, widmie energii neutronów. W tym sposobie wykorzystuje się korelacje między wartościami $Q_n^*(10)$, obliczonymi metodą Monte Carlo dla neutronów monoenergetycznych, a parametrami doświadczalnych charakterystyk nasycenia komory rekombinacyjnej, umieszczonej we wzorcowych polach neutronów monoenergetycznych wraz z towarzyszącym promieniowaniem gamma. Omija się przy tym szereg niepewności, m.in. związanych z brakiem pełnej odpowiedniości między współczynnikiem jakości promieniowania a parametrami, od których zależy lokalna rekombinacyjnej z tzw. kulą MKJR (ang. ICRU) definiującą wielkości operacyjne H*(10) i Q*(10).

The paper presents a method for determination of ambient quality factor for fast neutrons, $Q_n^*(10)$, in mixed radiation fields with unknown neutron energy spectrum of limited energy range. The method uses a correlation between the $Q_n^*(10)$ values, calculated by Monte-Carlo method for monoenergetic neutrons,

with parameters of saturation curves of the recombination chamber, determined experimentally in the fields of monoenergetic neutrons and accompanying gamma radiation. In such a way, a number of discrepancies can be omitted, among them those associated with limited conformity between radiation quality factor and parameters of initial recombination of ions, as well as between construction of the recombination chamber and ICRU sphere, for which the quantities $H^{*}(10)$ and $Q^{*}(10)$ were defined.

Słowa kluczowe: dozymetria, ochrona radiologiczna, współczynnik jakości promieniowania, neutrony prędkie, komora rekombinacyjna.

Key words: radiation dosimetry, radiation protection, radiation quality factor, fast neutrons, recombination chamber.

Wstęp

Współczynnik jakości promieniowania neutronowego na głębokości 10 mm w tzw. kuli Międzynarodowej Komisji Jednostek i Pomiarów Radiologicznych (MKJR, ang. ICRU), nazwany tu przestrzennym współczynnikiem jakości neutronów $Q_n^*(10)$, jest ilorazem przestrzennego równoważnika dawki $H_n^*(10)$ i przestrzennej dawki pochłoniętej $D_n^*(10)$, neutronów padających na kulę MKJR:

$$Q_n^*(10) = H_n^*(10) / D_n^*(10)$$
(1)

W dalszej części tej pracy powyższe symbole będą oznaczone krócej, bez "(10)".

Zazwyczaj (prawie zawsze) neutronom towarzyszy promieniowanie gamma, a w przypadku wielkich energii – również inne rodzaje promieniowania. Doświadczalne wyznaczanie Q_n^* w polu promieniowania mieszanego o nieznanym widmie energii neutronów może sprawiać istotne trudności. Znajomość wartości Q_n^* w określonym obszarze pola promieniowania, np. w pobliżu urządzeń jądrowych, ułatwia monitorowanie obszaru z punktu widzenia ochrony radiologicznej. Poza tym znajomość Q_n^* pomaga w interpretacji dozymetrycznych pomiarów porównawczych z wykorzystaniem różnych detektorów i metod oraz pozwala wyznaczyć efektywną energię neutronów, rozumianą jako energia neutronów monoenergetycznych, odznaczających się taką samą wartością Q_n^* jak neutrony z realnym widmem energii w rozpatrywanym polu promieniowania. Tak rozumiana energia efektywna ma niejednoznaczną wartość w przypadku istotnego udziału (w dawce pochłoniętej w tkance MKJR) neutronów o energii zarówno mniejszej niż 200 keV jak i większej niż 900 keV, tj. z obu stron zakresu energii odznaczającego się maksymalną wartością Q_n*. W pozostałych przypadkach zdefiniowana wyżej efektywna energia neutronów ma wartość zbliżoną do średniej energii neutronów ważonej poprzez H*(10).

Jednym z celów tej pracy było przeprowadzenie analizy, wyjaśniającej przyczyny rozbieżności między wartościami Q_n*, wyznaczanymi różnymi metodami pomiarowymi, w szczególności metodą pomiaru składowych dawki pochłoniętej, pochodzących od neutronów i od fotonów, za pomocą dwóch detektorów o zróżnicowanej czułości neutronowej, z jednoczesnym pomiarem H_n* za pomocą remomierza ze spowalniaczem, a metodą rekombinacyjną z zastosowaniem skróconej (dwuskładnikowej) analizy charakterystyki nasycenia komory rekombinacyjnej aproksymującej kulę MKJR [19]. Wspomniane rozbieżności były szczególnie istotne w przypadku neutronów, o energii poniżej 1 MeV, m.in. w polu fotoneutronów przy akceleratorze medycznym 15 MV, a także w polu promieniowania rozproszonego, pochodzącego od izotopowych źródeł neutronowych (za stożkiem cienia).

Zależność Q_n* od energii neutronów

Istnieją powszechnie dostępne tabele wartości H_n^* i D_n^* na jednostkową fluencję neutronów, obliczone metodą Monte Carlo na podstawie odpowiednich modeli oddziaływań, z wykorzystaniem dostępnych danych o przekrojach czynnych i wartości liniowego przekazania energii, LPE (ang. LET) cząstek naładowanych wyzwalanych neutronami. Wartości H_n^* podane w tabelach różnią się między sobą, szczególnie dla energii powyżej 20 MeV, w granicach kilku do kilkunastu procent. Wykorzystując dane literaturowe obliczyliśmy, zgodnie ze wzorem (1), wartości Q_n^* . Są one przedstawione w Tab. 1 i na Rys. 1 w postaci zależności Q_n^* od energii neutronów (E_n), obejmującej 16 rzędów wielkości (od 1 meV do 10 TeV).

Dla neutronów o energii do 200 MeV skorzystaliśmy z danych H_n^* (na jednostkę fluencji), przedstawionych w raporcie ICRU-66 [8]. W zakresie

200 MeV – 5 GeV wykorzystaliśmy dane opublikowane przez Sannikowa i Sawicką [11], które wynikały z rozpatrywania oddziaływań neutronów nie w kuli, lecz w płycie, co, jak uzasadniają autorzy, ma tylko nieznaczny wpływ na wartości H_n* i D_n*. W zakresie 20 MeV – 200 MeV obliczyliśmy Q_n* korzystając z danych obu prac [8, 11]. Maksymalna rozbieżność wartości Q_n*, obliczonych według prac [8] i [11], ma miejsce dla energii 150 MeV i wynosi 16,2%. Dla zakresu energii 5 GeV – 5 TeV wartości H_n* i D_n* [5] dotyczą nieco innych warunków obliczeniowych i mogą różnić się (szacunkowo do 20%) od wartości, jakie uzyskano by prowadząc obliczenia zgodnie z aktualnymi zaleceniami Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (MKOR, ang. ICRP) [6] oraz z aktualnie powszechnie stosowanymi wartościami LPE protonów i cząstek alfa, opublikowanymi w raporcie ICRU-49 [7]. Dane dotyczące D_n* dla neutronów o energii do 20 MeV braliśmy z pracy Leutholda i in. [9].

Bardzo interesująca jest jedna z ostatnich prac [1], w której przedstawiono dane obliczeń w szerokim zakresie energii neutronów (do 10 TeV), uwzględniono aktualne zalecenia międzynarodowe, a także uwzględniono szereg jądrowych oddziaływań w kuli MKJR, nieuwzględnianych w poprzednich pracach. Niestety Autorzy tej pracy przeprowadzili obliczenia tylko dla 19 wartości energii, tj. przeważnie tylko dla jednej wartości energii na dekadę. Uwzględniając wartości Q_n* podane dla tych energii, arbitralnie skorygowaliśmy wartości Q_n* dla wartości pośrednich (tam gdzie występują rozbieżności), zachowując kształt energetycznej zależności wynikającej z danych prac rozpatrujących szczegółowe wartości energii [8,11,5]. Tak uzyskane wartości są traktowane przez nas jako najbardziej prawdopodobne (do czasu pojawienia się nowych bardziej dokładnych danych szczegółowych) i są przedstawione w Tab. 1 oraz na Rys. 1.

Doświadczalne wyznaczenie współczynnika jakości promieniowania mieszanego

Wartość współczynnika jakości promieniowania Q, jest zdefiniowana w zaleceniach ICRP-103 [6] poprzez zależność od nieograniczonego LPE w wodzie. Wartość LPE różnych cząstek naładowanych w wodzie tylko nieznacznie różni się od LPE w materiałach dozymetrycznie równoważnych tkance (MRT), dlatego,

przy doświadczalnym wyznaczaniu współczynnika jakości promieniowania mieszanego, wykorzystuje się detektory z elektrodami wykonanymi z MRT. Przestrzenny współczynnik jakości Q*, powinien być w zasadzie mierzony detektorem aproksymującym kulę MKJR, albo, w przypadku małogabarytowego detektora dozymetrycznie równoważnego tkance, powinien być wyznaczany posługując się odpowiednim fantomem, najlepiej kulistym [13].

En	Q _n *(10) [Sv/Gy]	En	Q _n *(10) [Sv/Gy]	En	Q _n *(10) [Sv/Gy]
0,001 eV	4.8	252 keV	19.3	18 MeV	7.4
0,01	4.9	300	20.3	19	7.6
0,02	5.0	376	19.6	20	6.8
0,023	5.1	500	19.6	25	6.4
0,05	5.0	646	20.0	30	6.1
0,08	5.1	700	20.2	40	5.7
0,1	5.0	825	19.4	50	5.3
0,2	5.0	900	18.8	60	5.3
0,5	4.8	1 MeV	16.8	80	5.5
1	4.5	1,2	16.3	100	5.7
2	4.4	1,5	15.3	150	5.8
5	4.1	2	14.0	200	5.8
10	4.0	2,1	13.5	300	5.7
20	4.0	2,7	11.8	400	5.6
50	4.1	3	10.0	500	5.5
100	4.3	3,5	9.2	600	5.5
200	4.1	4	9.0	800	5.3
500	3.8	4,4	8.8	1 GeV	5.2
1 keV	3.6	5	8.6	1,5	4.9
2	3.4	5,5	8.4	2	4.9
5	3.6	6	7.9	3	4.6
10	4.2	7	7.5	4	4.4
20	3.6	8	7.2	5	4.3
23	6.3	9	7.0	10	3.3
30	6.9	10	7.1	30	3.1
50	9.2	12	7.3	100	3.0
70	11.7	13,5	7.0	300	3.0
100	14.7	14	7.0	1 TeV	3.0
150	17.4	15	7.1	5	3.1
200	18.9	16	7.3	10	3.1

 Tabela 1. Przestrzenny współczynnik jakości neutronów monoenergetycznych



Rysunek 1. Zależność Q_n*(10) od energii neutronów E_n

Ze znanych sposobów wyznaczania współczynnika jakości promieniowania można wymienić wyznaczanie poprzez widmo LPE, mierzone proporcjonalnym licznikiem równoważnym tkance, albo poprzez analizę śladów ciężkich cząstek naładowanych w odpowiednich foliach, a także posługując się detektorami analogowymi, których czułość zależy od LPE. Do tej ostatniej grupy należą komory rekombinacyjne - detektory najczęściej używane do wyznaczania w tym przestrzennego współczynnika współczynnika jakości, jakości promieniowania mieszanego. Istnieje szereg takich metod, m.in. metody oparte o korelację wartości współczynnika z nachyleniem górnej części charakterystyki nasycenia komory rekombinacyjnej [12], o rekombinacyjne wskaźniki jakości [15], o napięciowe wskaźniki jakości [18], metoda niewymagająca wyznaczania prądu nasycenia komory rekombinacyjnej [20], metoda bezpośredniego odczytu Q* poprzez prąd różnicowej komory rekombinacyjnej z nierównymi objętościami [14], a także zaawansowane metody rekombinacyjne, oparte o analizę charakterystyk nasycenia komory. Do tych ostatnich metod należą: rekombinacyjna metoda mikrodozymetryczna (RMM) [3], oraz rekombinacyjna metoda ekstrapolacyjna (RME) [19].

Wszystkie wyżej wymienione metody pozwalają wyznaczać współczynnik jakości promieniowania mieszanego, bądź współczynnik jakości skojarzony z określonym przedziałem LPE cząstek jonizujących, co w zasadzie nie jest równoznaczne z wyznaczaniem współczynnika jakości neutronów. Duże komory

rekombinacyjne z elektrodami wykonanymi z MRT, np. REM-2, REM-2-2, KR-7 [17] mogą aproksymować kulę MKJR i spełniać rolę detektorów do wyznaczania wielkości operacyjnych: D*, H*, Q*. Taką rolę mogą też spełniać w ukierunkowanym polu promieniowania małogabarytowe komory rekombinacyjne (np. F1, F2, F4) umieszczone w fantomie kulistym wypełnionym cieczą równoważną tkance. Proste metody rekombinacyjne pozwalają wyznaczać wielkości operacyjne dotyczące promieniowania mieszanego (łącznie). Natomiast zaawansowane metody rekombinacyjne dają możliwość wyodrębnienia wielkości D_{wys} i Q_{wys} (dawki pochłoniętej i współczynnika jakości cząstek o wysokim LPE, jonizujących gaz komory rekombinacyjnej), jak również wyodrębnienia D_{wys}* i Q_{wys}* – w przypadku użycia dużych komór rekombinacyjnych.

Istnieją też dozymetryczne metody i zestawy detektorów, które w polach promieniowania mieszanego fotonowo-neutronowego o ograniczonym zakresie energii pozwalają wyznaczać wielkości operacyjne oddzielnie dla fotonów i neutronów, a więc także wyznaczać Q_n*. Metody te zazwyczaj wykorzystują detektory o istotnie zróżnicowanej czułości na oba rodzaje promieniowania. Nie należą one do metod wskazanych w tytule niniejszej pracy i nie będą tu rozpatrywane.

Wyznaczanie współczynnika jakości promieniowania metodami analizującymi charakterystyki nasycenia komory rekombinacyjnej

Zaawansowane metody rekombinacyjne wymagają na ogół wyznaczenia charakterystyki nasycenia komory, czyli zależności skuteczności zbierania jonów (f) w komorze rekombinacyjnej od napięcia polaryzującego (U) przykładanego do komory. W polu promieniowania o wysokim LPE w komorach rekombinacyjnych praktycznie nie osiąga się prądu nasycenia. Doświadczalnie wyznacza się więc względną charakterystykę nasycenia:

$$f'(U) = \frac{i(U)}{i(U_{max})}$$
(2)

gdzie i(U_{max}) jest prądem komory rekombinacyjnej przy maksymalnej wartości napięcia przykładanego do komory, a bezwzględną wartość skuteczności

zbierania jonów, zatem i prąd nasycenia, wyznacza się w razie potrzeby, stosując RMM, albo przeprowadzając ekstrapolacje metodą Zanstry lub, w przypadku promieniowania o niskim LET – ekstrapolację odwrotności prądu w funkcji odwrotności przykładanego napięcia.

Skuteczność zbierania jonów w procesie rekombinacji lokalnej, w komorze rekombinacyjnej napełnionej gazem o gęstości $5 \pm 2 \text{ kg/m}^3$, może być, w szerokich granicach napięcia przykładanego do komory, wyrażona wzorem:

$$f = \frac{1}{1 + \frac{1 - f_{\gamma}}{f_{\gamma}} \cdot \mu}$$
(3)

gdzie:

 f_{γ} – bezwzględna skuteczność zbierania jonów dla standardowego promieniowania gamma.

 μ – mikrodozymetryczny parametr, charakteryzujący przestrzenny rozkład jonizacji wytwarzanej przez cząstkę jonizującą, od którego zależy lokalna rekombinacja jonów. Wielkość μ praktycznie może być utożsamiana z względną lokalną gęstością jonizacji, przy czym lokalność dotyczy obszaru o liniowych rozmiarach rzędu kilkudziesięciu nanometrów w gazie, którego gęstość jest sprowadzona do gęstości jednostkowej (1 g/cm³). Pojęcie "względna" oznacza tu "względem średniej lokalnej gęstości jonizacji elektronów wyzwalanych fotonami izotopu Cs-137". Zatem dla promieniowania gamma Cs-137 μ = 1 z definicji. Doświadczalnie stwierdzono, że praktycznie taka sama wartość ($\mu \approx 1$) dotyczy dowolnego promieniowania gamma w zakresie energii od kilkudziesięciu keV do kilkunastu MeV, a także wszelkich cząstek naładowanych o niskim LPE.

Rekombinacyjny wskaźnik jakości promieniowania, Q_R [15], zdefiniowany jest jako stosunek skuteczności lokalnej rekombinacji jonów (1 – f) rozpatrywanego promieniowania do skuteczności lokalnej rekombinacji jonów w polu promieniowania gamma (R = 1 – f_y). Dla promieniowania o stałym μ , Q_R jest powiązany z parametrem μ następującym wzorem:

$$Q_R = \frac{\mu}{1 - R + R\mu} \tag{4}$$

W ochronie radiologicznej najczęściej wykorzystuje się rekombinacyjny wskaźnik Q₄, dotyczący takiego napięcia przykładanego do komory, przy którym skuteczność lokalnej rekombinacji jonów w polu standardowego promieniowania gamma wynosi 0,96, czyli R = 0,04 = 4%:

$$Q_4 = \frac{\mu}{0,96+0,04\mu}$$
(5)

W przypadku promieniowania mieszanego, skuteczność zbierania jonów, występującą we wzorze (3), należy rozpatrywać biorąc pod uwagę składowe jonizacji powodowane cząstkami o różnym LPE (różnym μ). Zaawansowane metody rekombinacyjne pozwalają wyznaczać te składowe. Stosując RMM wyznacza się zgrubny rozkład dawki względem LPE cząstek jonizujących gaz komory rekombinacyjnej, a mianowicie wyznacza się składową dawki o niskim ograniczonym LPE (poniżej 20 keV/µm) oraz kilka (do sześciu) składowych o wyższych LPE. Wymagane jest przy tym dokładne wyznaczenie charakterystyki nasycenia komory rekombinacyjnej, stosując co najmniej 15 wartości napięcia przykładanego do komory. Około 7 wartości napięcia wystarcza dla zastosowania uproszczonej RMM (RMM-2) [2] i RME [19]. Te metody (RMM-2 i RME) pozwalają wyznaczać dwie składowe dawki: o niskim ograniczonym LPE (D_{nis}) i o wysokim LPE (D_{wys}) oraz oszacować efektywną wartość µ cząstek jonizujących o wysokim LPE (μ_{wys}) a zatem i efektywną wartość LPE tych cząstek L_{wys}. Pod pojęciem efektywnej wartości (μ_{wys} , L_{wys}) rozumie się tu taką wartość μ lub L_{Δ} hipotetycznego promieniowania o stałym L_△ w rozpatrywanym przedziale LPE $(L_{\Delta} > 20 \text{ keV}/\mu\text{m})$, która zgodnie ze wzorem (3), zapewnia taką samą wartość skuteczności zbierania jonów, jaką zapewniają łącznie wszystkie cząstki (ściślej: wszystkie fragmenty torów cząstek), których L_A, na odcinku torów równoważnych ułamkom mikrometra wody, (µm H₂O), jest większe od $20 \text{ keV}/\mu\text{m H}_2\text{O}$ gazie komory rekombinacyjnej, w umieszczonej w rozpatrywanym polu promieniowania. W przypadku pól promieniowania mieszanego, o energii nieprzekraczającej 20 MeV, dwie wspomniane wyżej składowe D_{nis} i D_{wys} często utożsamiano ze składową pochodzącą od fotonów padających na komorę rekombinacyjną D_v oraz ze składową neutronową D_n . Dotyczy to również pomiarów w polach promieniowania mieszanego o energii do

20 MeV, wykonywanych za pomocą dużych komór rekombinacyjnych, aproksymujących kulę MKJR: Wielkości D_{nis}^* i D_{wys}^* , wyznaczane poprzez analizę charakterystyk nasycenia tych komór, traktowano, odpowiednio, jako składową dawki pochodzącą od padających na komorę fotonów D_{γ}^* i od neutronów D_n^* . Również μ_{wys} traktowano, jako dotyczące wszystkich cząstek jonizujących wyzwalanych (bezpośrednio lub pośrednio) neutronami, μ_n .

Ograniczenia i niepewności dotychczasowego sposobu wyznaczania Q_n* na podstawie analizy charakterystyk nasycenia komór rekombinacyjnych

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, przy pomiarach w polu promieniowania mieszanego (fotony plus neutrony prędkie), wartość Q_{wys}^* , obliczoną poprzez parametr μ_{wys} wyznaczony z charakterystyk nasycenia komory rekombinacyjnej aproksymującej kulę MKJR, dotychczas niejednokrotnie traktowano jako Q_n^* . Istnieją przynajmniej dwie grupy czynników ograniczających takie traktowanie.

Pierwsza grupa dotyczy braku całkowitej zgodności między wielkościami, od których zależy lokalna rekombinacja jonów, a wielkościami, od których zależy współczynnik jakości promieniowania.

- Lokalna rekombinacja jonów zależy od lokalnej gęstości wytwarzanych par jonów, która jest związana z lokalną (ograniczoną) LPE, L_Δ (Δ ≈ 500 eV), zaś współczynnik jakości promieniowania jest zdefiniowany poprzez nieograniczone LPE, L (Δ = ∞). Korelacja efektywnej wartości L_Δ z nieograniczonym LPE nie jest prosta i nie jest jednoznaczna dla różnych cząstek.
- Skuteczność lokalnej rekombinacji jonów rośnie z LPE, zaś współczynnik jakości promieniowania, zgodnie z aktualnymi zaleceniami MKOR, wykazuje maksimum przy L = 100 keV/μm, a powyżej tej wartości łagodnie spada.
- Skuteczność lokalnej rekombinacji jonów (a zatem parametr µ i wskaźniki jakości promieniowania wyznaczane metodami rekombinacyjnymi) w zakresie niskich LPE ma praktycznie stałą wartość (µ = 1 ± 0,1) przy L < 3,5 keV/µm i zauważalnie wzrasta z LPE powyżej L ≈ 3,5 keV/µm, zaś współczynnik jakości promieniowania, zgodnie z aktualnymi zaleceniami

MKOR, ma stałą wartość (równą 1) od najniższych wartości LPE aż do L = 10 keV/ μ m H₂O.

- Rekombinacja jonów zachodzi w gazie wypełniającym komorę rekombinacyjną (zazwyczaj głównymi składnikami mieszanki gazowej są węglowodory), zaś współczynnik jakości promieniowania jest zdefiniowany poprzez LPE w wodzie.
- 5. Wielkości operacyjne, w tym Q*, dotyczą promieniowania (pierwotnego i wtórnego) przekazującego energię na głębokości 10 mm w kuli MKJR, zaś wskaźniki jakości wyznaczane metodami rekombinacyjnymi dotyczą promieniowania wytwarzającego jony w komorze rekombinacyjnej, która zazwyczaj różni się od kuli MKJR zarówno kształtem, jak też masą oraz efektywną głębokością punktu odniesienia, a także składem atomowym.

Druga grupa czynników ograniczających dotyczy braku pełnej zgodności między Q_{wys}^* a Q_n^* , ponieważ neutrony wytwarzają (zarówno w kuli MKJR jak i w dużych komorach rekombinacyjnych) nie tylko cząstki o wysokim LPE, lecz także i o niskim LPE. Ograniczenia drugiej grupy powodują, że $D_{wys}^* < D_n^*$ oraz $\mu_{wys} > \mu_n$ i w konsekwencji $Q_{wys}^* > Q_n^*$.

- 6. Neutrony, zwłaszcza o energii poniżej 200 keV, wytwarzają promieniowanie gamma, które z kolei wyzwala elektrony dające wkład do dawki pochłoniętej i do jonizacji w zakresie niskich LPE. Na Rys. 2 pokazany jest udział promieniowania gamma w dawce pochłoniętej na kilku głębokościach w kuli MKJR dla neutronów prędkich [10]. Jak widać z tego rysunku, udziału promieniowania gamma nie można zaniedbać, szczególnie na większych głębokościach. Chociaż Q*(10) dotyczy tylko określonej głębokości (10 mm) w kuli MKJR, ale wtórne promieniowanie gamma, z reakcji (n,γ), w komorze rekombinacyjnej dotyczy też większych głębokości.
- Neutrony prędkie o stosunkowo wysokiej energii (powyżej 15 MeV) wytwarzają (zarówno w kuli MKJR jak i w komorze rekombinacyjnej) protony odrzutu, których LPE może być niższe od kilku keV/μm, zatem nie dające wkładu do D_{wys}.
- Protony, deuterony i cząstki alfa pochodzące z oddziaływań neutronów wielkich energii, mogą wytwarzać istotną liczbę elektronów delta o energii przekraczającej 500 eV, które nie należą do cząstek o wysokim LPE.

Ponadto istotnym czynnikiem ograniczającym jest:

 Uproszczenie, traktujące widmo LPE cząstek wyzwalanych (bezpośrednio lub pośrednio) neutronami, tj. głównie elektronów i jąder odrzutu (w tym protonów odrzutu) jako widmo dwuskładnikowe (tylko "niskie" i "wysokie" LPE).





Proponowany sposób wyznaczania Q_n*

Wszystkie dziewięć ograniczeń i niepewności wyznaczania Q_n* posługując się zaawansowanymi metodami rekombinacyjnymi, wyszczególnione w poprzednim rozdziale, można ominąć wykorzystując korelację między wskaźnikami jakości promieniowania wyznaczonymi doświadczalnie przy użyciu komory rekombinacyjnej w polu monoenergetycznych neutronów (i towarzyszących fotonów), a obliczonymi ("zalecanymi") wartościami Q_n*, przedstawionymi w Tab. 1.

Tab. 2 zawiera wartości μ_{wys} , wyznaczone doświadczalnie posługując się komorą rekombinacyjną typu REM-2, w polach neutronów monoenergetycznych Laboratorium Wzorców Pierwotnych PTB (Brunszwik, Niemcy) w zakresie energii neutronów 75 keV - 19 MeV [4]. W tej samej tabeli podano wartości Q_n* dla

200

odpowiednich energii neutronów (interpolacja wartości z Tab. 1). Korelację między μ_{wys} a $Q_n^{\,*}$ zilustrowano na Rys. 3.

Tabela 2. Zestawienie obliczonych wartości $Q_n^*(10)$ neutronów prędkich z wartościami parametrów wyznaczanych za pomocą komory rekombinacyjnej

E _n [MeV]	Q _n *(10) [Sv/Gy]	μ_{wys}	Q _{3wys}	Q _{4wys}	Q _{6wys}	Q _{wys} * [Sv/Gy]
0.075	12.3	46 ± 17	20	15.9	12.1	25.7
0.144	17.2	47 ± 5	19.7	16.5	12.5	24.9
0.5	19.6	47,7 ± 3,5	19.8	16.6	12.5	24.7
0.9	18.8	30,1 ± 1	16.3	13.9	11.0	28.4
1.2	16.3	24,9 ± 1,3	14.5	12.7	10.2	23.3
2.5	12.3	14,5 ± 0,9	10.3	9.4	8.0	13.1
4.2	8.9	11,6 ± 0,9	8.8	8.1	7.1	10.1
5	8.6	10,4 ± 0,8	8.1	7.5	6.6	8.9
13.9	7.0	11,4 ± 0,9	8.7	8.0	7.0	9.9
14.8	7.1	13,2 ± 1	9.7	8.9	7.6	11.7
18	7.4	16,6 ± 0,8	11.3	10.2	8.6	15.1
19	7.6	15,5 ± 0,7	10.8	9.8	8.3	14.0



Rysunek 3. Korelacja $Q_n^*(10)$ z μ_{wys} dla neutronów prędkich. Liczby przy punktach: energia neutronów [MeV]. Linia ciągła: zależność według wzoru (12)

Na Rys. 4, oprócz obliczeniowej zależności Q_n*(E_n) w zakresie energii do 20 MeV, przedstawiono wartości wykorzystujące dane doświadczalne dotyczące następujących wielkości:

- μ_{wys} których wartości wyznaczono w PTB [4] stosując RMM-2 [2]. Po kilku latach wyniki tych pomiarów opracowano przy użyciu RME [19] i uzyskano praktycznie te same wartości μ_{wys}.
- Rekombinacyjne wskaźniki jakości promieniowania Q_{3wys}, Q_{4wys}, Q_{6wys}, zgodnie z zależnością:

$$Q_{Rwys} = \frac{\mu_{Wys}}{1 - R + R \ \mu_{Wys}} \tag{6}$$

przy R = 0,03; 0,04; 0,06.

 Q*_{wys} – przestrzenny współczynnik jakości promieniowania składowej o wysokim LPE, wyznaczony na podstawie zależności Q(L), aktualnie zalecanej przez MKOR:

$$Q(L) = 0.32L \text{ [keV/}\mu\text{m]} - 2.2 \text{ dla } 10 < L \le 100 \text{ keV/}\mu\text{m}$$
 (7)

$$Q(L) = 300/\sqrt{L}$$
 [keV/µm] dla L > 100 keV/µm (8)

przy czym:

$$L = L_{wys} \approx L_0 \mu_{wys} W_{\gamma} / W_{wys}$$
⁽⁹⁾

$$(W_{wys}/W_{\gamma}) = 1 + 0.008 (Q_{4wys} - 1)$$
 [16] (10)

$$L_0 = 3.5 \text{ keV/}\mu\text{m}$$
 (11)

Dyskusja i wnioski

Jak należało spodziewać się i co wyraźnie widać na Rys. 3, zależność Q_n^* od mierzalnego parametru μ_{wys} nie jest jednoznaczna. Jeśli nie mamy żadnej informacji co do zakresu energii neutronów w badanym polu promieniowania mieszanego, to wyznaczenie przestrzennego współczynnika jakości promieniowania neutronowego poprzez μ_{wys} jest niemożliwe. Natomiast istnieje

202

taka możliwość, jeśli mamy przesłanki pozwalające przewidzieć górną i dolna granicę energii neutronów, wnoszących istotny wkład do H_n* w badanym polu promieniowania mieszanego.

Jeśli można przewidzieć, że udział neutronów o energii powyżej ok. 10 MeV jest nieistotny (typowe dla energetyki jądrowej, akceleratorów niskich energii, plazmotronów, izotopowych źródeł neutronowych, reaktorów jądrowych, zestawów krytycznych itp.) oraz można oszacować, że nieistotny jest również udział neutronów o energii poniżej ok. 500 keV (co można stwierdzić np. stosując detektor neutronów termicznych otoczony trzy-centymetrową warstwą polietylenu) – to, jak widać z Rys. 3, zależność Q_n* od μ_{wys} jest jednoznaczna i może być aproksymowana, z kilkuprocentową dokładnością, funkcją

$$Q_n^* = \mu_{wys} - 0.4 - 0.012(\mu_{wys})^2$$
(12)

albo funkcjami liniowymi:

$$Q_n^* = (5/6) \mu_{wys} \text{ przy } \mu_{wys} \le 15$$
 (13)

$$Q_n^* = 12 + 0.4 \ (\mu_{wys} - 13) \ \text{przy} \ 15 < \mu_{wys} \le 32$$
 (14)

$$Q_n^* = 19.5 \pm 0.8 \text{ przy } \mu_{wys} > 32$$
 (15)

Przestrzenny współczynnik jakości promieniowania neutronowego może być także wyznaczony poprzez rekombinacyjne wskaźniki jakości składowej o wysokim LPE, Q_{Rwys} . Jak widać z Tab. 2, i Rys. 4, stosowany w ochronie radiologicznej rekombinacyjny wskaźnik Q_4 , obliczony ze wzoru (6) przy R=0,04, może być miarą Q_n^* w całym rozpatrywanym zakresie energii neutronów (0,075 MeV do 19 MeV), ale tylko z niewielką dokładnością (odchylenie do 35%).

Z lepszą dokładnością (odchylenia nieprzekraczające kilkunastu procent) Q_n^* aproksymuje wskaźnik Q_3 , wyznaczony poprzez μ_{wys} , w zakresie energii neutronów od 0,2 MeV do 13 MeV.

Przy wyższych energiach (8 MeV < E_n < 20 MeV) Q_n^* może być nieźle (z dokładnością lepszą niż 15%) aproksymowany rekombinacyjnym wskaźnikiem $Q_{6wys} = \mu_{wys} / (0.94 + 0.06 \mu_{wys})$.



Rysunek 4. $Q_n^*(10)$ dla neutronów prędkich. Obliczenia Monte Carlo – linia ciągła; doświadczalne wartości: $\blacksquare - Q_{3wys}$, $\diamondsuit - Q_{4wys}$, $\blacktriangle - Q_{6wys}$

Współczynnik jakości wyznaczony na podstawie wzorów (7 ÷ 11) wyraźnie przewyższa wartość Q_n*, i to nie tylko na krańcach rozpatrywanego zakresu energii (co można tłumaczyć ograniczeniami omawianymi w punktach 6 ÷ 8, w rozdziale poświęconym ograniczeniom i niepewnościom), lecz także przy średnich energiach. Ten fakt może świadczyć o celowości rewizji wzoru (9) dotyczącego przybliżonej korelacji nieograniczonego LPE z parametrem μ_{wys} , albo przynajmniej rewizji liczbowej wartości L₀ w tym wzorze.

Literatura

- Ferrari A, Pelliccioni M. Fluence to dose equivalent conversion data and effective quality factors for high energy neutrons. Radiat Prot Dosim. 1998; 76(4): 215-254.
- [2] Golnik N. Determination of gamma component in mixed radiation fields from saturation curve of tissue-equivalent ionization chamber. Proc. 24th Symp. Rad. Prot. Phys., Gaussig (Germany). Dresden: Technical University; 1992: 253-258.
- [3] Golnik N. Recombination methods in the dosimetry of mixed radiation. Otwock-Świerk: IAE -20/A; 1996.

- [4] Golnik N, Brede H.J, Guldbakke S. Response of REM-2 recombination chamber to H*(10) of monoenergetic neutrons. Radiat Prot. Dosim. 1997; 74(3): 139-144.
- [5] Golovachik V.T, Potiomkin E.L, Lebedev W.N, Frolov W.W. Dawki cząstek wielkich energii (1 GeV – 5 TeV) w fantomach równoważnych tkance (w języku rosyjskim). Serpuchow, Raport IFWE; 1974.
- [6] ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication 103). Ann ICRP. 2007; 37(2-4).
- [7] ICRU. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles (Report 49). Bethesda, MD: ICRU Publications; 1993.
- [8] ICRU Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons (Report 66). Journal of the ICRU. 2001; 1(3).
- [9] Leuthold G, Mares V, Schraube H. Calculation of the neutron ambient dose equivalent on the basis of the ICRP revised quality factors. Radiat Prot Dosim. 1992; 40(2): 77-84.
- [10] Morhart A, Burger G. Axial kerma and dose equivalent for neutrons in the ICRU sphere. Munich: GSF-Bericht S-1072; 1984.
- [11] Sannikov A.V, Savitskaya, E.N. Ambient dose equivalent conversion factors for high energy neutrons based on the ICRP 60 recommendations. Radiat Prot Dosim. 1997; 70(1-4): 383-386.
- [12] Sullivan A.H, Baarli J. An ionization chamber for the estimation of the biological effectiveness of radiation. Geneva, CERN Report 63-17; 1963.
- [13] Zielczyński M, Marjańska S. Przyrząd do pomiaru wskaźnika równoważnika dawki promieniowania mieszanego (w języku rosyjskim). In: Advances in Radiation Protection Dosimetry. Vienna, IAEA-SM-229/127; 1979.
- [14] Zielczyński M., Golnik N. Device for direct determination of quality factor. Nukleonika. 1993; 38(1): 23 30.
- [15] Zielczyński M, Golnik N. Recombination index of radiation quality measuring and applications. Radiat Prot Dosim. 1994; 52: 419-422.
- [16] Zielczyński M, Golnik N. Energy expended to create an ion pair as a factor dependent on radiation quality. Proc. Int. Symp. on Measurement Assurance in Dosimetry, Vienna: IAEA-SM 330/74; 1994: 383-391.

- [17] Zielczyński M, Golnik N. Rekombinacyjne komory jonizacyjne. Otwock-Świerk: Monografie IEA, wolumin 3; 2000.
- [18] Zielczyński M, Golnik N. A simple indicator of radiation quality in mixed radiation fields. Pol. J. Med. Phys. Eng. 2002; 8(2): 71-80.
- [19] Zielczyński M. A new approach to the dosimetry of mixed radiation using a recombination chamber. Radiat Prot Dosim. 2004; 110(1-4): 267-271.
- [20] Zielczyński M, Gryziński M.A, Golnik N. Method for determination of gamma and neutron dose components in mixed radiation fields using a high-pressure recombination chamber. Radiat Prot Dosim. 2007; 126(1-4): 306-309.