

УДК 502.55:621.039.7

И.Ю. Чернявский, А.Н. Григорьев, З.В. Билык,
В.В. Марущенко, В.Б. Матыкин, А.С. Писарев

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОГО ФАКТОРА НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

В работе обосновывается необходимость учёта спектрально-угловых характеристик радиационного фактора путём анализа защитных свойств материалов, а также создаваемой гамма-нейтронным излучением неравномерности облучения.

Ключевые слова: гамма-нейтронный поток, эффективная толщина материала защиты

Вступительная часть

Постановка проблемы. При решении задачи прогнозирования воздействия проникающего излучения ядерного взрыва на объекты исчерпывающую информацию о поле несёт точечный функционал $f(R, E, t, \Omega)$ совместно с соответствующим функционалом погрешностей [1]. Функционал характеризует энергетическое (спектральное E), угловое (Ω), временное (t) распределение нейтронов или гамма-квантов на расстоянии (R) от центра взрыва, осуществлённого в заданных условиях. При этом важно учитывать, что спектрально-угловое распределения является обязательным для анализа воздействия практически на любой объект.

Во-первых, существующие подходы [2 – 4] в предсказании последствий острого лучевого поражения (acute radiation injury) человека, полученного как при авариях на АЭС, так и вследствие применения противником ядерного оружия, основываются на дозовой шкале равномерного облучения без учёта пространственного распределения поглощённой дозы, что, безусловно, создаёт существенную неопределённость в оценке тяжести радиационного поражения в современных условиях (рис. 1).

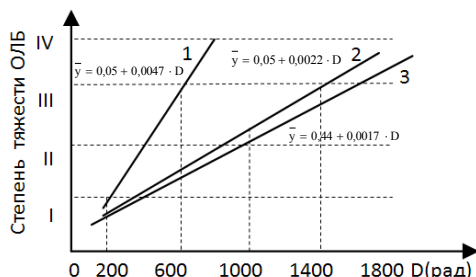


Рис. 1. Зависимость степени тяжести лучевой болезни от дозы радиации при равномерном и неравномерном облучениях: 1- равномерное гамма-нейтронное облучение; 2- преимущественное поражение части живота и конечностей; 3- преимущественное поражение верхней части тела (цит. по [2])

На практике неучёт спектрально-угловых характеристик воздействующего излучения приводит либо к завышению в оценке потерь дееспособности личного состава (по принципу наихудшей ситуации), либо к существенной недооценке тяжести радиационного поражения, особенно при воздействии нейтронной компоненты воздействующего радиационного фактора.

Другая сторона этой проблемы – эффект неравномерности радиационного облучения [4] – обусловлен не только спектром гамма-нейтронного излучения ($E_{\gamma/n}$); соотношением компонент гамма-нейтронного излучения (D_{γ}/D_n); расстоянием между человеком и источником; положением тела человека по отношению к источнику, но также и частичным экранированием тела человека складками местности, фортификационными укрытиями и защитными элементами военной техники.

За счёт особенностей ослабления защитным материалом компонент гамма-нейтронного излучения, в принципе, любая защита создаёт перепад доз, который целесообразно рассматривать как крайний случай неравномерности, особенно при воздействии гамма-нейтронного излучения [4]. Попытки оценить такую неравномерность только соотношением коэффициентов ослабления ($K_H = K_{осл}^{\gamma}/K_{осл}^n$), зависящих от энергии излучения (тип боеприпаса), без учёта угловых характеристик, представляется недостаточно полным подходом. Это связано, прежде всего, с существующей зависимостью эффективной толщины материала защиты от угла прямого падения излучения, а также неравномерностью распределения толщины защитного материала в вооружении и военной технике. Кроме того, объекты, защищённые от действия проникающей радиации (ПР), идущей из зоны ядерного взрыва, будут подвергаться воздействию не только прямого, но и рассеянного в воздухе излучения, расчёт которого более сложен, однако, также технически возможен, учитывая со-

временный уровень как ядерного приборостроения, так и методов и способов обработки информации.

Данные вопросы в литературе практически не освещены, а для обоснования необходимости учёта спектрально-угловых характеристик при прогнозировании дозовых нагрузок [5, 6] требуют проверки и уточнений. Вследствие этого, **целью работы** было обосновать необходимость учёта геометрии воздействия радиационного фактора при прогнозировании дозовых нагрузок в современных условиях, проанализировать влияния спектрально-угловых характеристик $S(E_{\gamma/n}, \theta_i)$ воздействующего гамма-нейтронного излучения на защитные свойства основных материалов и оценить создаваемую неравномерность.

1. Оценка спектрально-угловых характеристик прямого гамма-нейтронного излучения

Оценка защитных свойств сооружений от прямого воздействия проникающей радиации сводится к определению доз внутри сооружений в местах размещения поражаемых объектов на расстояниях (рис.2), где сооружение устойчиво к воздействию ударной волны:

$$D_{\Sigma} = D_{\gamma}^0 / 2^{x_{\text{эф}}^{\gamma} / d_{1/2}^{\gamma}} + D_n^0 / 2^{x_{\text{эф}}^n / d_{1/2}^n} \quad (1)$$

Следует заметить, что при взрывах нейтронных боеприпасов для ослабления дозы величина слоя половинного ослабления ($d_{1/2}$) возрастает, поскольку энергетический спектр нейтронного излучения является более жёстким.

Кроме того, степень ослабления излучения защитной толщиной (x) зависит от угла падения излучения, где под углом падения (θ_i) принято понимать угол между плоскостью защиты и направлением на центр взрыва. Данное обстоятельство в выражении (1) учтено путём введения эффективной толщины материала $- x_{\text{эф}}(\theta_i)$. В то же время практика показала [7, 8], что для гамма-компоненты $x_{\text{эф}}^{\gamma}$ целесообразно находить по соотношению $x_{\text{эф}}^{\gamma} = x / \sin \theta_i$ при $\theta_i > 45^\circ$; $x_{\text{эф}}^{\gamma} = 1,5x$ при $\theta_i < 45^\circ$, где x – толщина материала по нормали к его поверхности.

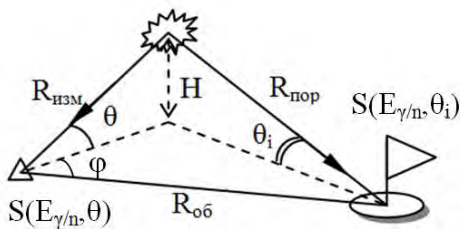


Рис. 2. Прогнозирование угла падения θ_i проникающей радиации на заданный объект с пункта наблюдения по данным регистратора параметров $S(E_{\gamma/n}, \theta)$ гамма-нейтронного излучения

Для нейтронной компоненты для железа (брони) и древесины следует использовать те же выражения, что и для гамма-излучения; для водородосодержащих материалов $- x_{\text{эф}}^n = x / \sin \theta_i$ при $\theta_i > 30^\circ$, $x_{\text{эф}}^n = 2x$ при $\theta_i < 30^\circ$; для бетона, грунта и кирпичной кладки $- x_{\text{эф}}^n = x$.

Полученные нами результаты исследований спектрально-угловых характеристик наиболее распространённых защитных материалов в практике организации радиационной безопасности войск представлены на рис. 3 – 5. Для анализа защитных свойств материалов были использованы характеристики материалов и воздействующего радиационного фактора ПР, приведённые в [7].

Зависимости построены для грунта, бетона и брони толщиной 40, 20, 7 см соответственно и слоем половинного ослабления ($d_{1/2}$) по гамма-излучению 18, 12,5(13), 3,5 см, по нейтронному излучению 11(14), 10(13), 12(15) см. В скобках указаны значения слоя половинного ослабления для излучения нейтронного боеприпаса.

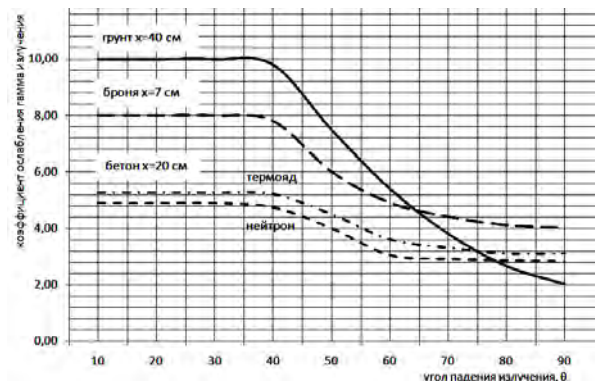


Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления гамма-излучения от угла падения проникающей радиации

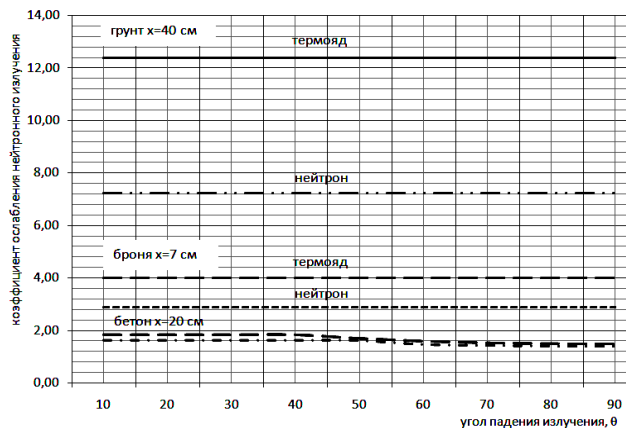


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления нейтронного излучения от угла падения проникающей радиации

Анализ показывает, что в результате взаимодействия гамма-излучения с материалами защитных

экранов ослабления излучения для всех исследуемых материалов наблюдается зависимость от угла падения излучения с верхней полусферы пространства, начиная с 40-45°. Наибольшее снижение коэффициента ослабления происходит в грунте (перепад коэффициента ослабления в 5 раз). Спектральные характеристики гамма-излучения ПР (определяемые типом боеприпаса) практически не влияют на коэффициент ослабления.

В отличие от ослабления гамма-компоненты ПР, ослабление нейтронной составляющей, в силу особенностей взаимодействия с веществом, не зависит от угла падения нейтронного излучения (исключение – бетон), а в значительной мере зависит от спектра излучения (рис. 4). Данный факт прежде всего связан с наличием быстрых нейтронов $E_n=14$ МэВ характерных для нейтронного боеприпаса. Не учёт спектра нейтронной компоненты ПР приводит к ошибкам в оценке D_n для брони в 1,3 раз, для грунта в 1,8 раз для указанных значений толщины материала.

На рис. 5 представлена комплексная оценка защитных свойств брони толщиной в 7 см от действия ПР.

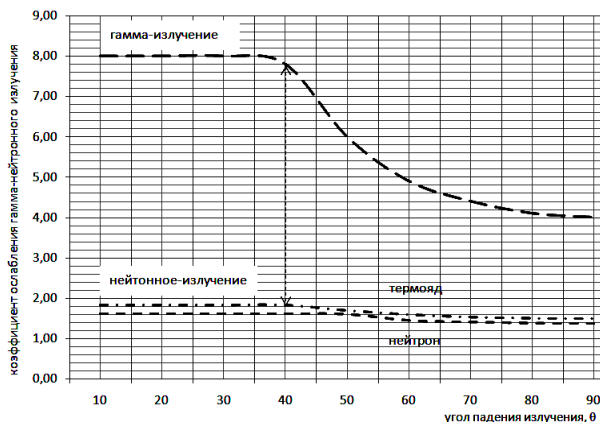


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления гамма-нейтронного излучения брони толщиной 7 см от угла падения проникающей радиации

Анализ показывает, что отношение коэффициентов ослабления $K_{осл}^γ/K_{осл}^n$, определяемое в работах [4] как коэффициент неравномерности облучения K_n снижается, начиная с 40-45°, и достигает минимального значения при практически перпендикулярном по отношению к плоскости защиты воздействии ($θ > 80°$). Необходимо заметить, что для оценки тяжести радиационного поражения снижение неравномерности облучения (т.е. меньший градиент поглощённых доз) и снижение защитных свойств материала от гамма-излучения (рис.5) действуют в противоположных направлениях. Представленные результаты не учитывают воздействия тормозного и вторичного (захватного) гамма-излучения при взаимодействии нейтронной компоненты с материалом защиты. Данный фактор предположительно должен создавать дополнительную дозу за защитной пре-

градой, а также более равномерное облучение человека в замкнутом пространстве из материалов с большим сечением захвата. Предварительные исследования показывают, что до толщины 10-20 см происходит увеличение дозы вторичного гамма-излучения, при дальнейшем возрастании толщины защиты наблюдается уменьшение этой дозы. Однако, данные результаты требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Наиболее распространенным и доступным в полевых условиях защитным материалом для инженерных сооружений является грунт с деревянными перекрытиями (рис. 6).

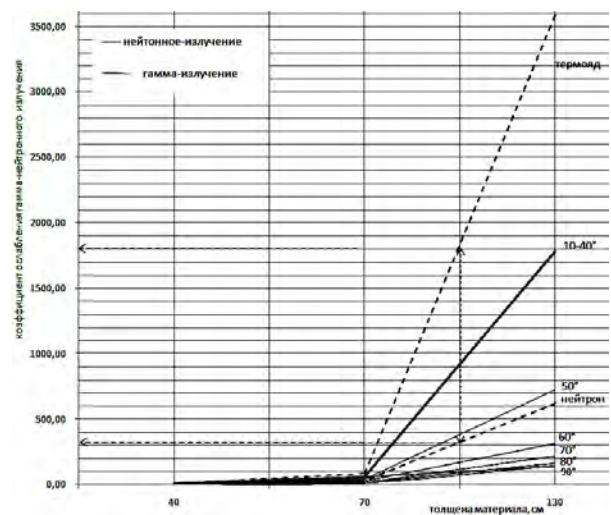


Рис. 6. Зависимость коэффициента ослабления гамма-нейтронного излучения от толщины грунта для различных углов падения проникающей радиации

Анализ показывает, что угол падения излучения напрямую влияет на эффективную толщину защитного слоя грунта, начиная с 70 см. При $x=100$ см, неучёт угла падения гамма-излучения может сказаться в переоценке коэффициента ослабления в 4,5 и более раз, что недопустимо для достоверной оценке дозовых нагрузок в современных условиях. Неучёт типа боеприпаса (спектральных характеристик нейтронной компоненты ПР), как показывают результаты моделирования (рис.6), также может существенно сказываться на коэффициенте ослабления (до 6 раз). В этих условиях коэффициент неравномерности должен зависеть не только от слоя половинного ослабления данного излучения ПР, но и от угла падения излучения с верхней полусферы пространства $K_n(d_{1/2}, θ_i)$. В свою очередь, угол падения при известной высоте взрыва напрямую зависит от расстояния до центра взрыва $R_{пор}$ (рис. 2). Используя результаты исследований коэффициента неравномерности на открытой местности, полученные в работе [4], и допуская, что неравномерность за счёт прохождения излучения через экраны может быть дополнительным попра-

вочным коэффициентом, представляется возможность учесть спектрально-угловые характеристики воздействующего радиационного фактора.

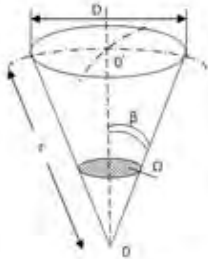
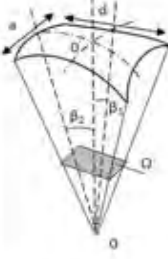
2. Анализ условий учёта спектрально-угловых характеристик гамма-нейтронного излучения

Известно, что в диапазоне энергий гамма-излучения ядерного взрыва основным процессом взаимодействия, особенно для лёгких материалов (воздух, вода, грунт, бетон, алюминий), является комптоновское рассеивание. С увеличением расстояния от центра взрыва количество рассеянных гамма-квантов возрастает. По приблизительным оценкам доза рассе-

янного гамма-излучения может составлять 5% дозы гамма-излучения на открытой местности, доза рассеянных нейтронов – 20% дозы нейтронов на открытой местности. При расчётах увеличения интенсивности за счёт рассеянного излучения учитывается введением в расчётные выражения дозового фактора накопления [9, 10]. Данная величина всегда больше единицы и зависит от энергии излучения, толщины поглотителя (расстояния в воздухе), плотности вещества и его атомного номера. В результате проведённого анализа [12, 13] в табл. 1 сведены особенности математических расчётов радиационных полей внутри объектов различного типа при воздействии гамма-нейтронного излучения.

Таблица 1

Особенности расчёта коэффициента ослабления гамма-нейтронного излучения для сооружений различного типа

Тип сооружения	Характер воздействия		Коэффициент ослабления
	Величина телесного угла для прямоугольных сечений	Величина телесного угла для круглых сечений	
Открытые сооружения	Оценивается величина дозы рассеянного излучения: $D_\gamma(\Omega) = D_\gamma \cdot n_\gamma \cdot \Omega$ $D_n(\Omega) = D_n \cdot n_n \cdot \Omega$ $n_\gamma = \frac{D_\gamma(\theta)}{D_\gamma} \approx 1,89^{-1,72}$ $n_n = \frac{D_n(\theta)}{D_n} \approx 5,99^{-0,89}$		$K_{осл} = \frac{D_\gamma + D_n}{D_\gamma(\Omega) + D_n(\Omega)} = \frac{1 + \xi}{(\xi \cdot n_\gamma + n_n) \cdot \Omega}$ где $\xi = \frac{D_\gamma}{D_n}$ – отношение дозы гамма-излучения к дозе нейтронов на открытой местности на данном расстоянии от центра взрыва
	$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos\beta)$ где $\beta = \arctg \frac{D}{2r}$ – угол между осью образующегося конуса телесного угла 	$\Omega = 2\beta_1 \cdot \sin \frac{\beta_2}{2}$ при $\beta_{1(2)} < 60^\circ$ $\beta_{1(2)} = \arctg \frac{a(b)}{2r}$ 	
Сооружения закрытого типа	Так как характер воздействия гамма-излучения и нейтроны с веществом различен, то расчёт ослабления толщей сооружения каждой из компонентов проводится раздельно: выражение (1)		$K_{осл} = \frac{D_\gamma + D_n}{D_\gamma(x_{\gamma\phi}^Y) + D_n(x_{\gamma\phi}^n)} = \frac{(1 + \xi) \cdot K_{осл}^Y \cdot K_{осл}^n}{K_{осл}^Y + K_{осл}^n}$
Сооружения закрытого типа, имеющие отверстия	Суммарная доза ПР внутри сооружения $D_\Sigma = (D_\gamma(x_{\gamma\phi}^Y) + D_n(x_{\gamma\phi}^n)) + [D_\gamma(\Omega) + D_n(\Omega)] = \frac{D_\gamma[1 + (K_{осл}^Y - 1) \cdot n_\gamma \Omega]}{K_{осл}^Y} + \frac{D_n[1 + (K_{осл}^n - 1) \cdot n_n \Omega]}{K_{осл}^n}$		$K_{осл} = \frac{D_\gamma + D_n}{D_\Sigma}$ если защита состоит из грунта и бетона: $K_{осл} = \frac{K_{осл}^Y(1 + \xi)}{(1 + \xi) + \Omega \cdot (K_{осл}^Y - 1)(\xi n_\gamma + n_n)}$

Ключевым моментом при расчёте коэффициента ослабления гамма-нейтронного излучения всех объектов является угловое распределение дозы рассеянного в воздухе излучения $n_\gamma(n_n)$. Последнее характеризуется величиной отношения дозы излуче-

ния в единичном телесном угле $D(\theta)$, ориентированном под углом рассеивания θ к направлению на центр взрыва (рис. 7), к дозе на открытой местности на данном расстоянии от центра взрыва.

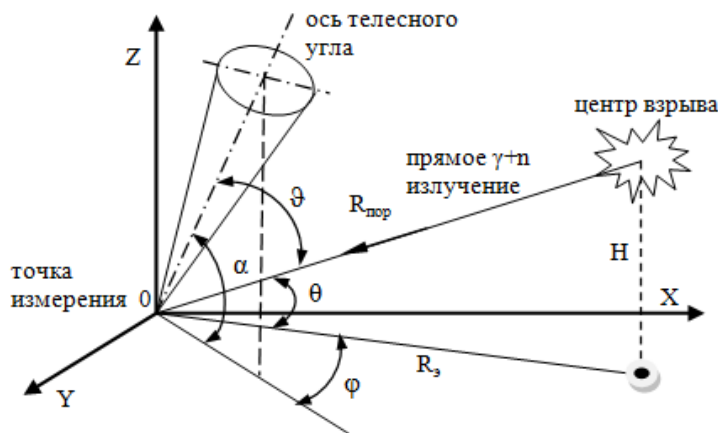


Рис. 7. Схема для расчёта угла рассеивания θ

Проведённый анализ показал, что рассеянное излучение целесообразно учитывать только при $160 > \theta > 20^\circ$. При $\theta < 20^\circ$ расчёт углового распределения дозы целесообразно вести только на прямое излучение.

Таким образом, для объектов закрытого типа, имеющих отверстия, необходимость оценки спектрально-угловых характеристик воздействующего фактора определяется как защитными свойствами объекта в целом, определяющего общее ослабление прямого воздействия ПР, и, как следствие, создание неравномерного облучения внутри экранированного объекта, так и особенностями занесения радиации во внутрь объекта рассеянным в воздухе и грунте излучением (рис.8).

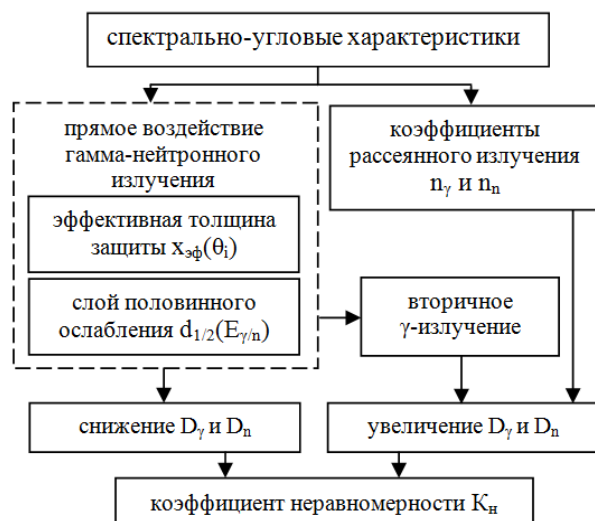


Рис. 8. Влияние спектрально-угловых характеристик излучения при оценке тяжести радиационного поражения

Учёт проанализированных в работе особенностей формирования радиационных полей при воздействии гамма-нейтронного излучения целесообразно реализовывать при оценке степени радиационного поражения путём оперативного моделирования геометрии гамма-нейтронного воздействия, учёта особенностей возникающей неравномерности облучения по данным регистратора параметров радиационного фактора (рис.2). На основе теоремы косинусов и соотношения сторон и углов в произвольном треугольнике, хорошо известных в тригонометрии, оценим угол падения прямого гамма-нейтронного излучения на исследуемый объект по результатам измеренных параметров $(R_{изм}, \theta, \phi)$ в пункте наблюдения:

$$\theta_i = \arcsin \frac{R_{изм} \cdot \sin \theta}{R_{изм} (\sin \theta + \cos \theta) + R_{об} - \sqrt{2 R_{изм} R_{об} \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi}} \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает возможность прогнозирования угла падения прямого гамма-нейтронного излучения ПР по результатам измеренных параметров $(R_{изм}, \theta, \phi)$ в пункте наблюдения при знании достоверных данных о расстоянии до объекта.

Выводы

1. Доза рассеянного гамма-излучения, может составлять 5% дозы гамма-излучения на открытой местности, доза рассеянных нейтронов – 20% дозы нейтронов на открытой местности. При прогнозировании степени радиационного поражения (при помощи регистратора характеристик радиационного фактора) рассеянное излучение целесообразно учитывать при $160 > \theta > 20^\circ$.

2. Для прямого излучения угловое распределение целесообразно учитывать для гамма-компоненты проникающей радиации, начиная с 40-45°. При толщине грунта 100 см неучёт угла падения гамма-излучения может сказаться в переоценке коэффициента ослабления в 4,5 и более раз, что недопустимо для достоверной оценки дозовых нагрузок в современных условиях.

3. Для нейтронной компоненты ослабление излучения в значительной мере зависит от спектра излучения (исключение составляет бетон). Неучёт спектра нейтронной компоненты проникающей радиации приводит к ошибкам в оценке дозы для брони в 1,3 раз, для грунта в 1,8 раз для указанных в работе значений толщины материала. При этом коэффициент неравномерности облучения $K_n(d_{1/2}, \theta_i)$ достигает минимального значения при практически перпендикулярном по отношению к плоскости защиты воздействии ($\theta_i > 80^\circ$). Снижение неравномерности облучения и снижения защитных свойств материала от гамма-излучения действуют в противоположных направлениях при оценке тяжести радиационного поражения.

4. Анализ возможных ситуаций контакта с радиационным фактором показывает, что существующая в настоящее время физическая дозиметрия без учёта особенности спектрально-угловых характеристик, определяющих как общее ослабление гамма-нейтронное излучение, так и неравномерность облучения, не позволяет точно рассчитать степень радиационного поражения.

Список литературы

1. Физика ядерного взрыва. Т.1. Проникающие излучения. ЦФТИ МО РФ / Н.А. Кондурушкин, Н.В. Гаранюшкин и др. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – С.34-84.
2. Климов И.А. Зависимость степени тяжести острой лучевой болезни от дозы радиации при неравномерном облучении человека / И.А. Климов // Военно-медицинский журнал. – 1979. – №11. – С. 29-31.
3. Иванов И.В. Исходная реактивность организма и радиационные воздействия: лечебно-профилактические аспекты проблемы: научно-практическое руководство / И.В. Иванов. – М.: Изд-во РМАПО, 2005. – 395 с.
4. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения / В.Л. Гозенбук, И.Б. Кеирим-Маркус, А.К. Савинский, Е.Н. Чернов. – М., Атомиздат, 1978. – 168 с.
5. Чернявский И.Ю. Оценка степени радиационного поражения путём прогнозирования дозовых нагрузок за данными датчика боеспособности / И.Ю. Чернявский, В.В. Марущенко, А.В. Матюкин // Системы озброєння і військова техніка: науково-технічний журнал. – Х.: ХУПС, 2016. – № 1 (45). – С. 125-133.
6. Чернявский И.Ю. Анализ условий для создания системы выявления и оценки уровня радиационной безопасности жизнедеятельности населения при чрезвычайных ситуациях военного характера / И.Ю. Чернявский, В.В. Тютюник, В.Д. Калугин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – Вип. 23. – С. 168-185.
7. Расчет и испытания защиты от радиации ядерного взрыва / И.В. Горячев и др. – М.: Атомиздат, 1976.
8. Руководство по радиационной защите для инженеров. – М.: Атомиздат, 1972. С.352-357.
9. Зыков И.К. Радиоактивные излучения ядерного взрыва / И.К. Зыков. – Л.: ЛВИА им. Можайского, 1970. – 105 с.
10. Дозиметрия ионизирующих излучений ядерного взрыва: Учебник / Под ред. Шестерякова. – М.: ВАХЗ, 1976. – 455 с.
11. Действие ядерного взрыва/ Сборник переводов под ред. С.С. Григоряна и Г. С. Шапиро. М.: Мир., 1971.
12. Пат. 2409875 Российская Федерация, МПК. Способ испытания противорадиационной защиты объекта/ Пикалов Г.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение 12 Центральный научно-исследовательский институт Минобороны России"
13. ГОСТ Р 55200-2012 Гражданская оборона. Степень ослабления проникающей радиации ограждающими конструкциями защитных сооружений гражданской обороны. Общие требования к расчёту.

Поступила в редколлегию 16.05.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Стаховский, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ СПЕКТРАЛЬНО-КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІАЦІЙНОГО ФАКТОРА НА ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

І.Ю. Чернявський, О.М. Григор'єв, З.В. Білик, В.В. Марущенко, В.Б. Матюкін, С.А. Писарев

У роботі обґрунтовується необхідність врахування спектрально-кутових характеристик радіаційного фактора шляхом аналізу захисних властивостей матеріалів, а також створеної гамма-нейтронним випромінюванням нерівномірності опромінення.

Ключові слова: гамма-нейтронний потік, ефективна товщина матеріалу захисту.

ANALYSIS OF THE FEATURES OF INFLUENCE THE SPECTRAL-ANGULAR CHARACTERISTICS OF THE RADIATION FACTOR ON THE PROTECTIVE PROPERTIES OF MATERIALS

I.Yu. Cherniavskiy, A.N. Grigoryev, Z.V. Bilyk, V.V. Marushenko, V.B. Matykin, S.A. Pysarev

The paper substantiates the necessity of taking into account the the spectral- angular characteristics of the radiation factor by analyzing the protective properties of materials, as well as non-uniformity produced by irradiation of gamma-neutron radiation.

Keywords: gamma-neutron flux, the effective thickness of the shielding material.