

С.П. Бабенко¹, А.В. Бадьин²

О ДОЗОВОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

Контактное лицо: Андрей Валентинович Бадьин: badyin@phys.msu.ru

РЕФЕРАТ

Актуальность: Гексафторид урана (UF₆, ГФУ) – газообразный продукт, содержащий уран и фтор. Попадая в воздух, он взаимодействует с парами воды и порождает продукты гидролиза, которые способны проникать в организм человека и приводить к химическому воздействию урана и фтора, а также к радиационному воздействию урана на организм. Это действие может быть очень сильным и поэтому его изучению давно уделяется серьёзное внимание.

Цель: Количественный расчёт радиационного воздействия урана на человека и его анализ в условиях повседневной работы на предприятиях атомной энергетики, а также условиях аварийной ситуации.

Материал и методы: Рассматривается ГФУ, появляющийся при определённых условиях в воздухе рабочих помещений специализированных предприятий. Описаны процессы распространения продуктов гидролиза ГФУ к объектам, способным ощутить их воздействие. Все эти процессы объединены в единую комплексную модель. Приведены аналитические выражения, полученные в рамках этой модели на различных этапах, позволяющие рассчитать радиационное воздействие ГФУ.

Результаты: Приведены рассчитанные значения характеристик радиационного воздействия, проведён их анализ. Сформулированы условия, при которых возникает опасность серьёзного радиационного воздействия ГФУ на сотрудников производств ядерного цикла при повседневной работе и в аварийных ситуациях.

Заключение: Построенная математическая модель достоверно описывает рассматриваемое событие и позволяет рассчитать радиационное воздействие урана на человека.

Ключевые слова: гексафторид урана, продукты гидролиза, ингаляционное поступление, перкутанное поступление, математическая модель

Для цитирования: Бабенко С.П., Бадьин А.В. О дозовом коэффициенте гексафторида урана // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 5. С.11–17.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-11-17

Введение

Гексафторид урана (UF₆, ГФУ) используется в технологиях обогащения природного урана изотопом ²³⁵U. Опыт показывает, что при реализации таких технологий иногда возникают неконтролируемые выбросы этого газообразного продукта [1], сопровождающиеся его гидролизом в воздушной среде и загрязнением воздуха рабочего помещения газообразными (UF₆, UOF₄, UO₂F₂, HF) и более сложными аэрозольными (UO₂F₂, HF) веществами [2]. Диффузионное перемещение газов и гравитационное оседание аэрозолей приводит к распределению частиц, несущих токсичные вещества (уран и фтор) от источника по всему объёму помещения. Поэтому все объекты в производственном помещении подвержены их отрицательному воздействию [3].

Качественно аналогичное загрязнение воздуха имеет место и в условиях штатной производственной деятельности. Отличаются две эти ситуации величиной отрицательного воздействия на человека и их временной динамикой. Обе они создают проблему обеспечения безопасного труда. Поэтому исследования воздействия продуктов гидролиза ГФУ на организм человека начались уже на ранних этапах развития атомной энергетики. Установлены дозы токсичных веществ, вызывающие необратимые изменения в организме [4–8]. Созданы медицинские организации, которые контролируют профессиональные заболевания и тщательно обследуют и лечат людей, побывавших в аварийной ситуации. Развиваются теоретические методы определения количественных поступлений токсичных веществ в организм человека. Они изложены в основном в работах [9–13].

Однако до появления работ авторов настоящей статьи количественный расчёт динамики всего процесса, начиная от загрязнения воздушной среды до проникновения токсичных веществ в организм человека, удержания в нем ГФУ и выхода естественным путем, опубликовано не было. Такой подход был разработан нами, и его основные

идеи изложены в статьях [14–16], где в рамках трёх основных моделей были описаны: процессы загрязнения атмосферы производственных помещений продуктами гидролиза ГФУ, процессы проникновения их в организм через кожу (перкутанно) и через дыхательную систему (ингаляционно) и далее депонирование в организме и выведение из него. При описании перечисленных процессов использовались экспериментальные данные [17].

В настоящей работе на основе предложенных моделей получена количественная оценка радиационного воздействия инкорпорированного (проникшего в организм) урана. Одной из важнейших характеристик этого воздействия является дозовый коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{E_{эфф}}{\Pi_A}, \quad (1)$$

где Π_A (Бк) — активность вещества, поступившего в организм, $E_{эфф}$ (Дж · кг⁻¹, Зв) — эффективная доза, формируемая им. По принятому в нормах радиационной безопасности определению [8]:

$$E_{эфф} = \sum_T W_T H_{R,T} = \sum_T W_T W_R D_{R,T} = \sum_T W_T W_R \frac{Q_{R,T}}{m_T} = \sum_T W_T W_R \frac{\bar{W}_R N'_{R,T}}{m_T}. \quad (2)$$

Здесь: $H_{R,T}$ (Дж · кг⁻¹, Зв) – эквивалентная доза излучения R в органе (или ткани) T; W_T (безразмерная величина) – взвешивающий коэффициент для органа T; $D_{R,T}$ (Дж · кг⁻¹, Гр) – поглощённая доза излучения R в органе T; W_R (безразмерная величина) – взвешивающий коэффициент для излучения R; $Q_{R,T}$ (Дж) – энергия излучения R, переданная органу T; m_T (кг) – масса органа T; $N'_{R,T}$ (безразмерная величина) – число минимальных порций излучения R, поглощённых в органе T, \bar{W}_R (Дж) – средняя поглощённая энергия минимальной порции излучения R (в настоящей статье рассматривается только α -излучение, соответственно: $R = \alpha$, $N'_{R,T} = N'_{\alpha,T}$ – число α -частиц, поглощённых в органе T, $\bar{W}_R = \bar{W}_\alpha = 4,47 \cdot 10^6$ эВ – сред-

няя энергия α -частицы). При вычислении $H_{R,T}$ по соотношению:

$$H_{R,T} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} H_{R,T}^{\&}(t) dt$$

(t_0 – момент поступления урана в организм, Δt – время формирования дозы, $H_{R,T}^{\&}(t)$ – мощность дозы) принималось, что $\Delta t = 50$ лет. Тогда:

$$\varepsilon = \frac{W_R \bar{W}_R}{\Pi_A} \sum_T \frac{W_T}{m_T} N'_{R,T} \quad 3)$$

Материал и методы

На рис. 1 изображена принятая в расчётах схема воздействия UF_6 на человека. Часть схемы, выделенная цифрой 1, описывает загрязнение производственной среды гексафторидом урана и продуктами его гидролиза. Часть, выделенная цифрой 2, соответствует ингаляционному поступлению ГФУ и продуктов гидролиза, прохождению их через разные органы и выходу естественным путем. Часть, выделенная цифрой 3, соответствует перкутанному поступлению, депонированию в коже и частичному прохождению внутрь организма. Здесь $\tau_1 = 2$ с, $\tau_2 = 20$ с, $\tau_3 = 50$ с, – периоды полувыведения газов за счёт гидролиза и нуклеации [17].

При определении концентрации атомов токсичных веществ предполагалось, что после выхода из рабочих ёмкостей ГФУ за очень короткое время равномерно распределяется по производственному помещению [17]. После гидролиза все образующиеся вещества (газы UF_6 , UOF_4 , UO_2F_2 , HF и аэрозоли UO_2F_2 , HF) распределяются далее по объёму, участвуя в процессах воздухообмена, диффузионного осаждения на границы интересующей нас области, дрейфа в пространстве. Все эти процессы считаются линейными. В основу математической модели рассматриваемых процессов положены уравнения непрерывности для концентраций молекул продуктов гидролиза ГФУ. Принималось, что образующиеся аэрозоли – полидисперсные, и для них использовалась функция распределения радиусов аэрозольных частиц, полученная авторами настоящей статьи [15].

С помощью уравнений непрерывности для концентраций молекул продуктов гидролиза ГФУ получали зависимости $n_U(\vec{x}, t)$ и $n_F(\vec{x}, t)$, а по ним находили ещё и плотности потоков $\vec{j}_U(\vec{x}, t)$, $\vec{j}_F(\vec{x}, t)$. Это позволило определить значение массы токсичных веществ, поступающих в организм на выбранном промежутке времени и через кожу и через дыхательные пути.

В настоящей работе была поставлена задача: на основе приведённой теории определить величины эффективных доз и дозовые коэффициенты урана, входящего в состав продуктов гидролиза ГФУ в рабочих помещениях обогатительного производства. Эти наблюдаемые величины определялись в условиях аварийных выбросов ГФУ и штатной работы при перкутанном и ингаляционном поступлении. Они позволили оценить уровень отрицательного воздействия α -излучения урана, проникающего в организм человека при указанных условиях.

Для определения важнейших характеристик этого воздействия рассчитывали следующие величины: $N_1(t)$ – число атомов урана, поступивших на поверхность кожи на промежутке времени $[t_0, t]$ (t_0 – момент аварийного выброса или момент начала трудовой деятельности), $N_2(t)$ – число атомов урана, находящихся на поверхности кожи в момент времени t , $N_3(t)$ – число атомов урана, поступивших в глубину кожи, $N_4(t)$ – число атомов урана, находящихся в глубине кожи, $N_5(t)$ – число атомов урана, поступивших в кровоток, $N_6(t)$ – число атомов урана, находящихся в кровотоке, $N_7(t)$ – число атомов урана, вышедших из организма, $N_T(t)$ – число атомов урана, находящихся в органе T. Ещё вычисляли активность $A(t) = A_{уд} m_0 N(t)$ атомов урана (m_0 – масса атома урана, $A_{уд} = 2.47 \cdot 10^7$ Бк · кг⁻¹ – удельная активность урана) и число α -частиц

$$N'(t) = \int_{t_0}^t d\tau \cdot A(\tau) = A_{уд} m_0 \int_{t_0}^t d\tau \cdot N(\tau)$$

испущенных атомами урана. Соответственно, получили следующие наблюдаемые величины: $A_1(t) - A_7(t)$, $A_T(t)$, $N'_4(t)$, $N'_6(t)$, $N'_T(t)$. Наконец, на базе этих наблюдаемых величин вычислялись эффективные дозы и дозовые коэффициенты.

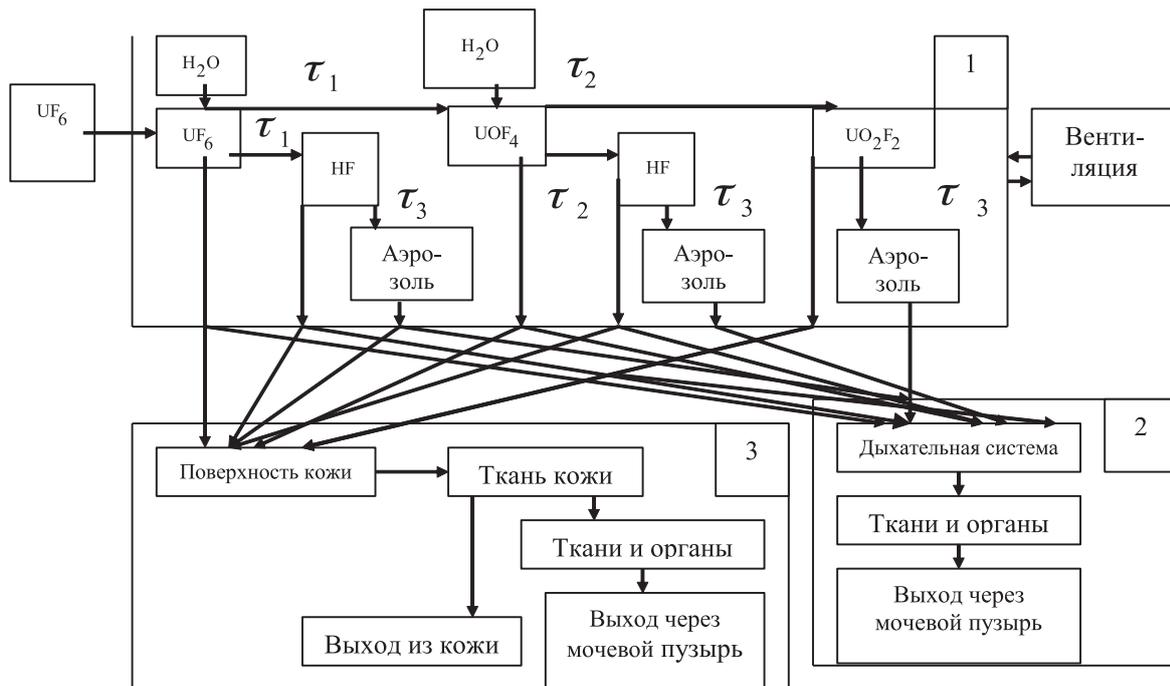


Рис. 1 Схема комплексной модели воздействия гексафторида урана на организм человека
 Fig. 1. Scheme of a comprehensive model of the impact of uranium hexafluoride on the human body

При этом для перкутанного поступления в режиме аварийного выброса были получены соотношения (если учитывать выход человека из аварийного помещения и дезактивацию кожи, то формулы становятся сложнее):

$$N_1(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau), \tag{4}$$

$$N_2(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)},$$

$$N_3(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 + C_2), \tag{5}$$

$$N_4(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}),$$

$$N_5(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1^{C\%_1} + C_2^{C\%_2}), \tag{6}$$

$$N_6(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1^{C\%_1 - \lambda_1^{C\%_1}(t-\tau)} + C_2^{C\%_2 - \lambda_2^{C\%_2}(t-\tau)}),$$

$$N_7(t) = S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1^{C\%_1} (1 - e^{-\lambda_1^{C\%_1}(t-\tau)}) + C_2^{C\%_2} (1 - e^{-\lambda_2^{C\%_2}(t-\tau)})) \tag{7}$$

В этих соотношениях: $j(\tau)$ – плотность потока атомов урана на поверхности кожи, S – площадь поверхности кожи, $\lambda, \lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2, \lambda_1^{C\%_1}, \lambda_2^{C\%_2}, C_1^{C\%_1}, C_2^{C\%_2}$ – коэффициенты, полученные с учётом экспериментальных данных [17].

Такая модель расчёта получила название «интегральная». Она не позволяет найти значения $N_T(t), A_T(t), N'_T(t)$, для каждого органа в отдельности, и поэтому не позволяет вычислить дозовый коэффициент для всех внутренних органов в соответствии со строгим определением, т. е. по формуле, в которой производится суммирование по всем внутренним органам (точнее, по всем «камерам» камерной модели МКРЗ). Тем не менее, мы посчитали возможным провести приближённую оценку величины дозового коэффициента для всех внутренних органов, используя формулу

$$\varepsilon = \frac{W_T W_\alpha \bar{W}_\alpha \cdot N'_6(t)}{m_T A_1(t)}$$

и рекомендуемые МКРЗ [18] средние значения величин: $m_T = 68$ кг, $W_T = 0.8$.

Все указанные наблюдаемые величины вычисляли и для повседневных производственных условий перкутанного поступления урана в организм по той же методике. Однако при расчёте учитывалось, что: концентрация атомов урана не зависит от времени, поступление происходит с перерывом на промежутки времени от конца предыдущего рабочего дня до начала следующего, в конце рабочего дня производится дезактивация кожи. Для нахождения дозового коэффициента, связанного с прохождением той части урана, которая поступала внутрь организма, получены такие соотношения:

$$N_1(t) = j_0 S \left((t_1 - t_0) \bar{N}(t) + t - \alpha_{\bar{N}(t)} \right), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)};$$

$$N_1(t) = j_0 S (t_1 - t_0) (\bar{N}(t) + 1), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)};$$

$$N_2(t) = j_0 S \int_{t_0}^t d\tau \cdot e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)}; \tag{8}$$

$$N_2(t) = 0, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)};$$

$$N_3^n(t) = 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n);$$

$$N_3^n(t) = j_0 S \int_{\alpha_n}^t d\tau \cdot (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 + C_2), \quad t \in [\alpha_n, \beta_n]; \tag{9}$$

$$N_3^n(t) = j_0 S \int_{\beta_n}^t d\tau \cdot (1 - e^{-\lambda(\beta_n-\tau)}) (C_1 + C_2), \quad t \in (\beta_n, +\infty);$$

$$N_3^n(t) = \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_3^n(t), \quad t \in [t_0, +\infty);$$

$$N_4^n(t) = 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n);$$

$$N_4^n(t) = j_0 S \int_{\alpha_n}^t d\tau \cdot (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in [\alpha_n, \beta_n]; \tag{10}$$

$$N_4^n(t) = j_0 S \int_{\beta_n}^t d\tau \cdot (1 - e^{-\lambda(\beta_n-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (\beta_n, +\infty);$$

$$N_4^n(t) = \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_4^n(t), \quad t \in [t_0, +\infty).$$

Здесь: j_0 – плотность потока атомов урана на поверхности кожи; S – площадь поверхности кожи; $\lambda, \lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2$ – коэффициенты, полученные с учётом экспериментальных данных [17]; t_0 – начало рабочего дня с номером ноль, t_1 – конец рабочего дня с номером ноль, t_2 – конец суток с номером ноль; α_n – начало рабочего дня с номером n , β_n – конец рабочего дня с номером n , γ_n – конец суток с номером n ; $\bar{N}(t)$ номер тех суток, на которые попадает фиксированный момент времени t ; $N_3^n(t), N_4^n(t)$ – числа атомов урана, обусловленные поступлением в течение суток с номером n . Формулы для величин $N_5(t), N_6(t), N_7(t)$ записываются аналогично формулам для величин $N_3(t), N_4(t)$.

Для ингаляционного поступления как в аварийной ситуации, так и в штатных условиях были получены величины, аналогичные подобным величинам $N_1(t), N_5(t) - N_7(t), N_T(t), A_1(t), A_5(t) - A_7(t), A_T(t), N'_6(t), N'_T(t)$ для перкутанного поступления. Наконец, на базе этих наблюдаемых величин вычислялись эффективные дозы и дозовые коэффициенты.

Далее для интересующих нас дозовых коэффициентов используются следующие обозначения: $\varepsilon_{кп}$ – дозовый коэффициент для кожи при перкутанном поступлении, $\varepsilon_{оп}$ – дозовый коэффициент для всех внутренних органов при перкутанном поступлении, $\varepsilon_{ип} = \varepsilon_{кп} + \varepsilon_{оп}$, $\varepsilon_{ин}$ – дозовый коэффициент для всех внутренних органов при ингаляционном поступлении. Например, величина $\varepsilon_{кп}$ вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{кп}(t) = \mu \cdot \frac{W_K W_\alpha \bar{W}_\alpha \cdot N'_2(t)}{m_k A_1(t)}$$

(μ – коэффициент, обозначающий часть энергии α -излучения, поглощаемой базальным, наиболее чувствительным к излучению слоем кожи). Следует заметить, что дробь $N'_2(t)/A_1(t)$ не зависит от величин $j_0, S, m_0, A_{ул}$.

Для нахождения эффективной дозы $E_{эфф,Т}(t)$, формирующейся в отдельных органах, и активности урана $A_T(t)$, накопленного в них, использовалась комплексная модель, названная дифференциальной, состоящая из трёх отдельных моделей. Две из них описывают формирование воздушной среды рабочего помещения и проникновение токсичных веществ из неё в человека [14], третья является известной моделью МКРЗ [18, 19]. Расчёт распределения урана по органам на основе модели МКРЗ оказался возможным благодаря тому, что в рамках первых двух наших моделей определена величина $d/dt N_5(t)$, являющаяся, по сути дела, скоростью поступления атомов урана в плазму крови. Запишем для четырёх возможных ситуаций конкретные выражения для скорости поступления атомов урана в кровотоки.

Аварийная ситуация, перкутанное поступление:

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = (C_1^{90} + C_2^{90}) \lambda S \int_{t_0}^t d\tau \cdot j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} \quad (11)$$

Аварийная ситуация, ингаляционное поступление:

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = q(n_{\text{газ}}(z_0, t) + \xi n_{\infty}(z_0, t)). \quad (12)$$

Здесь: q — объём воздуха, вдыхаемого в единицу времени, z_0 — высота носа человека, $n_{\text{газ}}(z, t)$ — концентрация атомов урана в составе газов, $n_{\infty}(z, t)$ — концентрация атомов урана в составе аэрозольных частиц всех радиусов, ξ — средний коэффициент прохождения атомов урана в составе аэрозолей в организм человека [15].

Штатная деятельность, перкутанное поступление:

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = (C_1^{90} + C_2^{90}) S j_0 (1 - e^{-\lambda(t-\alpha_{\bar{N}(t)})}), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)};$$

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = 0, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}. \quad (13)$$

Штатная деятельность, ингаляционное поступление:

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = q(n_{\text{газ}} + \xi n_{\infty}), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)};$$

$$\frac{d}{dt} N_s(t) = 0, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}. \quad (14)$$

Численное решение системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений из модели МКРЗ [18, 19], расчёт числа распадов урана в конкретных органах, дополнительные сведения об этих органах [7] позволили определить дозовый коэффициент, сформированный депонированным в организме ураном.

Полученные в результате расчёта значения эффективных доз и дозовых коэффициентов приведены в табл. 1–5. В штатных условиях (в грубом приближении) предполагалось, что молекулы ГФУ возникают в каждой точке помещения. В качестве входных данных использовались кратность воздухообмена K и плотность мощности F_1 внешних источников молекул ГФУ. Можно также задавать кратность воздухообмена K и плотность активности A_V урана в составе газов вдали от стенок помещения.

Таблица 1

Рассчитанная по двум моделям временная динамика депонирования урана в организме (штатная деятельность)
Time dynamics of uranium deposition in the body calculated using two models (regular activities)

Повседневная деятельность, $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ($K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $A_V = 3,951 \cdot 10^{-2} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$), газы, перкутанное поступление						
t (сут)	Депонирование, m (мг)		Выход, m (мг)			
	Интегральная модель	Дифференциальная (камерная) модель	Интегральная модель		Дифференциальная (камерная) модель	
			Суммарный выход	Суточный выход	Суммарный выход	Суточный выход
1	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$4,18 \cdot 10^{-6}$	$4,18 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	—
30	$5,76 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-4}$	$2,56 \cdot 10^{-4}$	—	$2,04 \cdot 10^{-3}$	—
50	$9,04 \cdot 10^{-4}$	$7,14 \cdot 10^{-4}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	—	$3,55 \cdot 10^{-3}$	—
280	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	—	$2,24 \cdot 10^{-2}$	—
365	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-3}$	—	$2,92 \cdot 10^{-2}$	—
3280	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	—	$6,83 \cdot 10^{-2}$	—
50·280	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-1}$	—	1,50	—
50·365	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$5,03 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	1,17	$8,50 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Сравнение расчётных значений дозового коэффициента в рамках интегральной и дифференциальной моделей (аварийная ситуация)
Comparison of the calculated values of the dose coefficient in the framework of the integral and differential models (emergency)

Аварийная ситуация, $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $t_1 = 1,5 \text{ ч}$ (время выхода из аварийного помещения), $t = 50 \text{ лет}$					
Интегральная модель			Дифференциальная модель		
Газы, перкутанное поступление		Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление	Газы, перкутанное поступление		Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление
$\epsilon_{\text{кп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{оп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{ои}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{кп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{оп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{ои}}$ (Зв · Бк ⁻¹)
$1,14 \cdot 10^{-11}$	—	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$1,50 \cdot 10^{-9}$	$9,73 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3

Сравнение расчётных значений дозового коэффициента в рамках интегральной и дифференциальной моделей (штатная деятельность)
Comparison of the calculated values of the dose coefficient in the framework of the integral and differential models (regular activities)

Штатная деятельность, $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $t = 50 \text{ лет}$					
Интегральная модель			Дифференциальная модель		
Газы, перкутанное поступление		Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление	Газы, перкутанное поступление		Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление
$\epsilon_{\text{кп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{оп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{ои}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{кп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{оп}}$ (Зв · Бк ⁻¹)	$\epsilon_{\text{ои}}$ (Зв · Бк ⁻¹)
$1,14 \cdot 10^{-11}$	$6,00 \cdot 10^{-9}$	$2,22 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$4,25 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-7}$

Таблица 4

Зависимость величин A_1 , $E_{эфф}$, $\varepsilon_{оп}$ от коэффициента воздухообмена (штатная деятельность)
 Dependence of the values A_1 , $E_{эфф}$, $\varepsilon_{оп}$ on the air exchange coefficient (regular activity)

Штатная деятельность, $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, газы, перкутанное поступление, интегральная модель, $t = 50$ лет		
$K = 0 \text{ ч}^{-1}$		
A_1 (Бк)	$E_{эфф}$ (Зв), все органы	$\varepsilon_{оп}$ (Зв·Бк ⁻¹)
$3,27 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-9}$
$K = 7 \text{ ч}^{-1}$		
$3,01 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-9}$

Таблица 5

Вклад отдельных органов в формирование эффективной дозы при штатной деятельности и в аварийной ситуации при перкутанном и ингаляционном поступлении
 Contribution of individual organs to the formation of an effective dose during normal activities and in an emergency with percutaneous and inhalation intake

	Повседневная деятельность, $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, дифф. модель, $t = 50$ лет (газы, перк./газы + аэрозоли, инг.)		Аварийная ситуация, $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, дифф. модель, $t_1 = 1,5$ ч (время выхода), $t = 50$ лет, (газы, перк./газы + аэрозоли, инг.)	
Орган	N' (безразмерн.)	$E_{эфф}$ (Зв)	N' (безразмерн.)	$E_{эфф}$ (Зв)
Мягкие ткани	$1,14 \cdot 10^8 / 9,98 \cdot 10^{10}$	$1,86 \cdot 10^{-5} / 1,64 \cdot 10^{-2}$	$6,48 \cdot 10^7 / 3,31 \cdot 10^{11}$	$1,07 \cdot 10^{-5} / 4,21 \cdot 10^{-2}$
Поверхность кортикальной кости	$3,35 \cdot 10^6 / 2,91 \cdot 10^9$	$9,53 \cdot 10^{-7} / 8,25 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^6 / 5,27 \cdot 10^9$	$3,39 \cdot 10^{-6} / 1,49 \cdot 10^{-3}$
Объём кортикальной кости	$3,45 \cdot 10^8 / 3,02 \cdot 10^{11}$	$3,93 \cdot 10^{-6} / 3,42 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^8 / 8,78 \cdot 10^{11}$	$2,98 \cdot 10^{-7} / 9,91 \cdot 10^{-3}$
Поверхность трабекулярной кости	$4,13 \cdot 10^6 / 3,68 \cdot 10^9$	$1,49 \cdot 10^{-5} / 3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^6 / 6,6 \cdot 10^9$	$1,08 \cdot 10^{-6} / 5,38 \cdot 10^{-3}$
Объём трабекулярной кости	$1,18 \cdot 10^8 / 1,02 \cdot 10^{11}$	$9,68 \cdot 10^{-6} / 8,46 \cdot 10^{-3}$	$4,05 \cdot 10^7 / 2,05 \cdot 10^{11}$	$1,08 \cdot 10^{-6} / 1,7 \cdot 10^{-2}$
Почки	$1,08 \cdot 10^7 / 9,45 \cdot 10^9$	$1,18 \cdot 10^{-5} / 1,04 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^6 / 1,82 \cdot 10^1$	$3,98 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 10^{-2}$
Печень	$1,79 \cdot 10^7 / 1,57 \cdot 10^{10}$	$6,75 \cdot 10^{-6} / 5,94 \cdot 10^{-3}$	$7,44 \cdot 10^6 / 3,77 \cdot 10^{10}$	$1,97 \cdot 10^{-6} / 1,43 \cdot 10^{-2}$
Во всех органах	—	$7,26 \cdot 10^{-5} / 4,85 \cdot 10^{-2}$	—	$2,25 \cdot 10^{-5} / 1,1 \cdot 10^{-1}$

Результаты и обсуждение

- Динамика накопления урана в организме и выход его по интегральной и дифференциальной моделям в штатных условиях находятся в хорошем соответствии. В течение первого года от начала штатной деятельности количество депонированного урана увеличивается, а далее со временем практически не изменяется. При этом, по интегральной модели окончательное депонирование несколько выше, чем по дифференциальной модели. Естественный выход урана тоже со временем растёт (и полный и суточный). При длительном времени работы выход по интегральной модели несколько меньше, чем по дифференциальной.
- В штатных условиях, когда плотность мощности внешних источников молекул ГФУ $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, в наиболее точном для определения ε дифференциальном методе, полный дозовый коэффициент при перкутанном поступлении составляет $\varepsilon_{пп} = 4,26 \cdot 10^{-9} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ($\varepsilon_{кп} = 1,14 \cdot 10^{-11} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ за счёт поступления в кожу и $\varepsilon_{оп} = 4,25 \cdot 10^{-9} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ за счёт поступления урана во внутренние органы). При ингаляционном поступлении $\varepsilon_{оп} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$. В аварийной ситуации (в условиях модельного эксперимента) при перкутанном поступлении полный дозовый коэффициент равен $\varepsilon_{пп} = 1,51 \cdot 10^{-9} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ($\varepsilon_{кп} = 1,14 \cdot 10^{-11} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ за счёт поступления в кожу и $\varepsilon_{оп} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ за счёт поступления урана во внутренние органы). При ингаляционном поступлении $\varepsilon_{оп} = 9,73 \cdot 10^{-7} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$.
- В аварийной ситуации часть дозового коэффициента, относящаяся к внутренним органам, примерно в 130 раз больше части, относящихся к коже. При штатных

производственных условиях соотношение тех же величин равно примерно 370.

- Дозовый коэффициент при аварийном ингаляционном поступлении урана примерно в 650 раз больше, чем при перкутанном поступлении. В производственных условиях ингаляционное поступление примерно в 200 раз больше.
- В обозначенных аварийных условиях при ингаляционном поступлении дозовый коэффициент несколько больше, чем в условиях повседневной деятельности.
- Из сопоставления данных, приведённых в табл. 2 и 3, нельзя определить какая из двух моделей (интегральная или дифференциальная) даёт большее значение дозового коэффициента для урана, попадающего внутрь организма, чем другая. Действительно, в рамках интегральной модели при ингаляционном поступлении в аварийной ситуации дозовый коэффициент в 1,8 раз больше, чем в рамках камерной модели, а в условиях штатных поступлений в 3,6 раз меньше, чем в рамках камерной модели. По-видимому, это связано с тем, что при проведённом сопоставлении меняется не только модель расчёта, но и несколько изменяется величина среднегеометрического радиуса r_g аэрозольных частиц, а следовательно и коэффициент прохождения атомов урана через дыхательную систему.
- Согласно данным табл. 4, эффективная доза $E_{эфф}$, формируемая ураном во внутренних органах, при перкутанном повседневном поступлении очень слабо зависит от коэффициента воздухообмена K . Дозовый коэффициент ε совсем не зависит от величины K . Этот результат находится в соответствии с результатом ана-

- лиза модельного эксперимента, согласно которому перкутанно в организм человека проникают только газовые компоненты продуктов гидролиза UF_6 , практически не управляемые производственным воздухообменом.
8. Расчёт показал, что эффективная доза ($E_{эфф} = 2,25 \cdot 10^{-5}$ Зв, табл. 5), полученная сотрудниками только за счёт перкутанного поступления (работали в защитных дыхательных масках) в процессе модельного эксперимента, много меньше ее предельно допустимого значения при разовом поступлении (0,3 мЗв) [8]. Дальнейшее наблюдение за работниками, участвующими в модельном эксперименте, показало, что они не подверглись радиационному воздействию урана. Это означает, что расчётное значение формирующейся эффективной дозы находится в хорошем соответствии с её экспериментальным значением. Однако ингаляционное поступление, которое экспериментаторы исключили использованием масок, должно стать равным предельно допустимому разовому поступлению. В самых экстремальных аварийных ситуациях ($n_0 = 3,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, на три порядка больше, чем в модельном эксперименте), эффективная доза, формируемая перкутанным поступлением ($E_{эфф} = 2,25 \cdot 10^{-2}$ Зв), станет больше предельно допустимой при разовом поступлении, а доза, формируемая ингаляционным поступлением урана, должна уже представлять серьёзную радиационную опасность [8, стр. 22].
 9. Сравнение рассчитанной величины дозового коэффициента при ингаляционном поступлении в штатных условиях $\varepsilon_{ои} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ (АМАД = 13 мкм) с экспериментальными значениями $\varepsilon_{ои} = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ (АМАД = 5 мкм) [8] и $\varepsilon_{ои} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ (АМАД = 1 мкм) [20] при тех же условиях, показало следующее. Несмотря на некоторое расхождение между ними, они находятся в соответствии друг с другом, поскольку последовательное уменьшение ε при переходе от расчётных значений к экспериментальным имеет ту же тенденцию, что и соответствующее изменение величин АМАД.
 10. Судя по данным табл. 5, в аварийной ситуации в условиях проведённого эксперимента эффективная доза, формирующаяся за 50 лет при ингаляционном поступлении, в $4,9 \cdot 10^3$ больше, чем при перкутанном поступлении. При штатных условиях это отношение равно $6,7 \cdot 10^2$.
 11. Расчёты показали, что накопление урана в различных органах происходит инерционно, причём для разных органов с разной скоростью [16]. Во всех органах количество депонированного вещества вначале растёт со временем, а далее практически перестаёт зависеть от него. С одной из наибольших скоростей накопление происходит в почках, для них наибольшее накопление происходит за $\Delta t = 4$ сут. В течение почти всех первых десяти дней после аварийного поступления урана почки имеют наибольшее отношение массы депонированного урана к массе органа [16].
- Анализируя перечисленные результаты, нужно отметить следующее:
1. Построенные авторами настоящей статьи модели приводят к результатам, удовлетворительно согласующимся с экспериментальными данными, а потому могут

быть использованы для теоретической оценки радиационного воздействия ГФУ на организм человека.

2. Дифференциальная модель позволяет оценивать время, за которое депонированный в органе уран достигает максимального значения. Это облегчает медицинским работникам выбор последовательности мероприятий по лечению пострадавших в аварийной ситуации.
3. При оценке поступлений урана в организм человека в аварийной ситуации и в штатных условиях интегральная и дифференциальная модели дают достаточно близкие результаты, чтобы можно было использовать данные, полученные в интегральной модели для веществ с неизвестными метаболическими параметрами.
4. Радиационное воздействие урана в составе ГФУ и продуктов его гидролиза наносит меньший вред, чем химическое воздействие урана и фтора (сравнение данных табл. 1 и статьи [5]). Опасное радиационное воздействие имеет место только при ингаляционном поступлении в самом жёстком производственном режиме ($K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $A_V = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$) и в аварийной ситуации с максимально возможной начальной концентрацией ($n_0 = 3,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) молекул ГФУ.

Выводы

1. Проведён краткий обзор литературы по решению проблем, связанных с вопросами взаимодействия ГФУ с организмом человека.
2. Отмечены те задачи, которые хорошо исследованы, и те, которые оставляли желать дополнительного решения. Сформулировано наше участие в поднятом вопросе – построение моделей, позволяющих описать воздействие ГФУ на организм человека количественно.
3. Достигнута цель настоящей работы – освещение и анализ сведений, полученных в рамках построенных моделей, о расчёте радиационного воздействия урана в составе ГФУ и продуктов его гидролиза на человека.
4. Продолжена комплексная расчётная модель воздействия UF_6 на человека.
5. Коротко изложена методика расчёта в рамках каждой из трёх основных моделей – загрязнения атмосферы рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ, перкутанного проникновения урана и фтора в организм человека, их ингаляционного поступления.
6. Приведены аналитические выражения для тех величин, которые необходимы для вычисления эффективной дозы и дозового коэффициента α -излучения, являющихся основными характеристиками радиационного воздействия урана на организм человека.
7. Приведены таблицы значений $E_{эфф}$ и ε , рассчитанных в рамках разных моделей, при разных условиях и при разных способах поступления носителей урана в организм человека.
8. Приведены зависимости интересующих нас параметров от коэффициента воздухообмена в рабочем помещении и показана динамика депонирования урана в организме и вывода из него.
9. Проведена верификация некоторых расчётных величин, описывающих радиационное воздействие гексафторида урана на организм человека.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.03.2021. Принята к публикации: 21.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 16.03.2021. Accepted for publication: 21.04.2021.

On the Dose Coefficient of Uranium Hexafluoride

S.P. Babenko¹, A.V. Bad'in²

¹N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Contact person: Andrey Valentinovich Bad'in: badyin@phys.msu.ru

ABSTRACT

Introduction: Uranium hexafluoride (UF₆, UHF) is a gaseous product containing uranium and fluorine. Once in the air, it interacts with water vapor and produces hydrolysis products that can penetrate the human body and lead to the chemical effects of uranium and fluorine, as well as the radiation effects of uranium on the body. This action can be very strong and therefore serious attention has been paid to its study for a long time.

Purpose: Quantitative calculation of the radiation effects of uranium on humans and their analysis in the conditions of daily work at nuclear power plants, as well as in emergency situations.

Material and methods: We consider uranium hexafluoride that appears under certain conditions in the air of the working rooms of some enterprises and describes methods for describing the distribution of UHF hydrolysis products to objects that can sense their effects. All these methods are combined into a single integrated model. The analytical expressions obtained in the framework of this model at various stages are given, which make it possible to calculate the radiation effect of UHF.

Results: The calculated values of the characteristics of the radiation exposure are given, their analysis is carried out. The conditions are formulated under which there is a danger of serious radiation exposure of uranium hexafluoride to employees of nuclear power plants during everyday work and in emergency situations.

Conclusion: Based on all the material presented, it is concluded that the constructed mathematical model reliably describes the event in question and allows us to calculate the radiation effect of uranium on humans.

Key words: uranium hexafluoride, hydrolysis products, inhalation intake, percutaneous intake, mathematical model

For citation: Babenko SP, Bad'in AV. On the Dose Coefficient of Uranium Hexafluoride. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(5):11–17.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-11-17

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дэвис Л. Терроризм и насилие. Террор и катастрофы. Смоленск: Русич, 1998.
2. Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю. и др. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 9. С. 785–794.
3. Хоуланд Дж. Фармакология и токсикология урановых соединений // Действие урановых соединений на человека. М.: ИЛ, 1951. Т. 2. С. 224–243.
4. Руководство по организации медицинского обслуживания лиц, подвергшихся действию ионизирующего излучения / Под ред. Ильина Л.А. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Гастева Г.Н., Бад'ин В.И., Молоканов А.А., Мордашёва В.В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // Радиационная медицина. Том II. Радиационные поражения человек / Ильин Л.А., ред. М.: ИздАТ, 2001. С. 369–388.
6. Гастева Г.Н., Бабенко С.П., Бад'ин В.И. Детерминированные эффекты у работников атомной промышленности // Компьютерные науки, информационные технологии, прикладная физика: Сб. научных трудов научной сессии МИФИ-2001. М., 2001. Т. 13. С. 124–125.
7. Гусев Н.Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. М.: Медгиз, 1956.
8. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. М., 2009.
9. Рекомендации МКРЗ. Публикация 30. Ч. 1. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. М.: Энергоатомиздат, 1982.
10. Рекомендации МКРЗ. Публикация 30. Ч. 2. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. М.: Энергоатомиздат, 1983.
11. Рекомендации МКРЗ. Публикация 30. Ч. 3. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. М.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Рекомендации МКРЗ. Публикация 60. Радиационная безопасность. М.: Энергоатомиздат, 1994.
13. Радиация и кожа: Материалы симпозиума, Великобритания, 1963. М.: Атомиздат, 1969.
14. Бабенко С.П., Бад'ин А.В. Ингаляционное и перкутанное поступление в организм человека токсичных веществ в условиях повседневной производственной деятельности на предприятиях атомной промышленности // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 3. С. 13–22.
15. Бабенко С.П., Бад'ин А.В. Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2014. № 2. С. 22–30.
16. Бабенко С.П., Бад'ин А.В., Овчинников А.В. О возможности ускоренной медицинской помощи людям после однократного воздействия на них гексафторида урана // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 3. С. 213–219. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219
17. Мирхайдаров А.Х. Метод и средство измерения гексафторида урана в воздухе // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. С. 92.
18. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68 // Ann. ICRP. 1994. V. 24. No 4.
19. Leggett R.W., Pellmar T.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 64, No 2–3. P. 205–225.
20. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66 // Ann. ICRP. 1994. V. 24 (1–3).

REFERENCES

1. Davis L. Terrorism and Violence. Terror and Disaster. Smolensk, Rusich Publ., 1998 (In Russian).
2. Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., Grigor'ev G.Yu, et al. Express Methods for Measuring the Degree of Enrichment of Uranium Hexafluoride and Trace Amounts And HF in the Atmosphere Based on Near And Middle Ir Diode Lasers. Optika Atmosfery i Okeana. 2005;18;9:785–794 (In Russian).
3. Howland J.W. Pharmacology and Toxicology of Uranium Compounds. Studies on Human Exposures to Uranium Compounds. Ed. Voegtlin C., Hodge H.C. New York, Toronto, London, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1949. P. 993–1017.
4. Guidelines for the Organization of Medical Care for Persons Exposed to Ionizing Radiation. Ed. Ilyin L.A. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986 (In Russian).
5. Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., Mordasheva V.V. Clinical Toxicology of Chemical Compounds of Uranium at Chronic Exposure. Nuclear medicine. V. II. Radiation Injury Man. Ed. Ilyin L.A. Moscow. Izdat Publ., 2001. P. 369–388 (In Russian).
6. Gasteva G.N., Babenko S.P., Badin V.I. Deterministic Effects in Nuclear Industry Workers. Computer Science, Information Technology, Applied Physics: Sat. Scientific Papers of The Scientific Session of MEPhi-2001. Moscow Publ., 2001, Vol. 13. P. 124–125 (In Russian).
7. Gusev N.G. Handbook of Radiation and Protection. Moscow, Medgiz Publ., 1956 (In Russian).
8. Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Moscow Publ., 2009 (In Russian).
9. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann. ICRP. 1979;2 (3-4).
10. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 2). Ann. ICRP 1980; 4 (3-4).
11. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 3). Ann. ICRP 1981; 6 (2-3).
12. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 1991; 21 (1-3).
13. Radiation and skin. Materials of the Symposium, Great Britain, 1963. Moscow, Atomizdat Publ., 1969 (In Russian).
14. Babenko S.P., Bad'in A.V. Inhaler Injection and Injection Through Skin of Toxic Substances in a Human Organism Under Regular Industry Conditions at Factories of Nuclear Industry. Matematicheskoe modelirovanie. 2006;18;3:13–22 (In Russian).
15. Babenko S.P., Bad'in A.V. Verification of a Mathematical Model that Describes the Action of Uranium Hexafluoride on The Human Body in Facilities of the Atomic Industry. Moscow University Physics Bulletin. 2014;69;2:124–133 (In Russian). DOI: 10.3103/S0027134914020040.
16. Babenko S.P., Bad'in A.V., Ovchinnikov A.V. About the Possibility of Accelerated Medical Care for People After A Single Exposure to Uranium Hexafluoride. Hygiene and Sanitation. 2018;97;3:213–219 (In Russian). DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219.
17. Mirkhaydarov A.Kh. Method and Means for Measuring Uranium Hexafluoride in the Air. The Radioactivity in Nuclear Explosions and Accidents. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2000 (In Russian).
18. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP. 1994;24 (4).
19. Leggett R.W., Pellmar T.C. The Biokinetics of Uranium Migrating from Embedded DU Fragments. Journal of Environmental Radioactivity. 2003;64;2-3:205–225.
20. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994;24;1-3.