

Обеспечение безопасности труда в рабочих помещениях в условиях технологических выбросов гексафторида урана

12, декабрь 2013

DOI: 10.7463/1213.0625484

Бабенко С. П., Бадьин А. В.

УДК 51-74, 51-76, 614.876, 614.878

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, МГУ им. М.В. Ломоносова
babenkosvetlana@mail.ru
badyin@phys.msu.ru

Гексафторид урана (ГФУ, UF_6) является основным рабочим веществом в технологиях обогащения урана, лежащих в основе атомной энергетики, которой в настоящее время в России, как и во всех цивилизованных странах, уделяется большое внимание.

К числу задач, которые приходится решать для обеспечения безопасности труда на производстве, относятся: нормирование загрязнения производственного помещения и количества вещества, находящегося в организме человека, контроль этих величин; разработка и принятие мер защиты, предсказание последствий воздействия на человека рассматриваемого вещества; выбор тактики медицинской помощи и другие задачи.

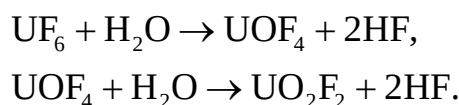
Эта тематика широко освещается в литературе с середины прошлого столетия, и в зарубежной [1-5] и в отечественной [6-9]. В данной работе проведён подробный обзор литературы по расчётным методам исследования загрязнения производственной среды гексафторидом урана и продуктами его гидролиза, инкорпорирования этих продуктов в организм человека, определения радиологических и токсических доз, получаемых человеком. Эти расчётные методы охватывают следующие методики.

1. Создана математическая модель, описывающая процессы загрязнения производственной среды гексафторидом урана и продуктами его гидролиза [10, 11, 14, 17, 18].
2. Создана интегральная модель перкутанного и ингаляционного поступлений урана и фтора в организм человека [12, 13, 14].

3. Камерная модель распределения инкорпорированного вещества по органам, разработанная МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите) [3] для ввода этого вещества непосредственно в плазму крови, применена для перкутанного и ингаляционного ввода урана в организм.

При использовании гексафторида урана в процессах обогащения урана изотопом U^{235} , атмосфера рабочего помещения в рабочих режимах несколько загрязняется парами UF_6 . В аварийных ситуациях возможен большой выброс гексафторида урана.

В основе созданной в работе [14] модели загрязнения производственной среды гексафторидом урана лежит известное [15] взаимодействие UF_6 с влагой воздуха по схеме:



Молекулы HF и UO_2F_2 , образуют аэрозольные частицы вследствие нуклеации. Поэтому воздух рабочего помещения загрязняют газы UF_6 , UOF_4 , UO_2F_2 , HF и аэрозоли UO_2F_2 , HF .

В работе [14] приведена схема комплексной модели формирования воздействия гексафторида урана на организм человека, принятой в расчётах.

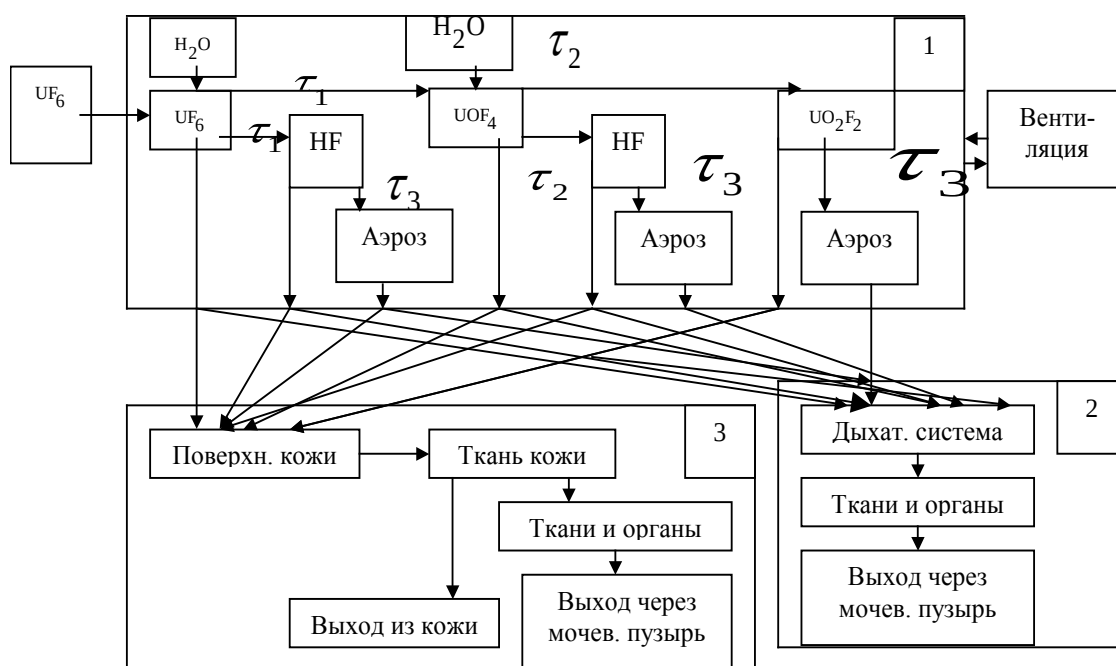


Рис. 1 Схема комплексной модели воздействия гексафторида урана на организм человека;
 $\tau_1 = 2$ с, $\tau_2 = 20$ с — периоды полувыведения за счёт гидролиза газов UF_6 и UOF_4 ;
 $\tau_3 = 50$ с — периоды полувыведения за счёт нуклеации газов UO_2F_2 и HF

При построении моделей загрязнения производственной воздушной среды в качестве основных приняты следующие предположения.

Газ UF_6 поступает в каждую точку области Q , описывающей производственное помещение. Вывод молекул образующихся веществ осуществляется за счёт воздухообмена, диффузионного осаждения на границу области Q , и дрейфа в пространстве. Все процессы ввода и вывода частиц — линейны.

В основе построения математической модели лежат уравнения непрерывности, описывающие концентрации частиц. Решение этих уравнений даёт выражения для концентрации урана и фтора $n_U(\vec{x}, t)$, $n_F(\vec{x}, t)$ в составе продуктов гидролиза UF_6 и плотности потока их молекул $\vec{j}_U(\vec{x}, t)$, $\vec{j}_F(\vec{x}, t)$.

На основе приведённых принципов построено несколько моделей, в каждой из которых на частицы наложены конкретные дополнительные условия. В рамках отдельных моделей исследовано влияние на полученные результаты характера граничных условий, протяженности выброса гексафторида урана в аварийной ситуации, пренебрежения диффузией газов и аэрозолей, пренебрежения процессами нуклеации, предположения о монодисперсности и полидисперсности аэрозолей. Для выбора модели, наиболее достоверно описывающей реальные процессы, применялось сравнение рассчитанных и экспериментальных значений концентраций атомов урана и фтора в воздухе и на производственных поверхностях. Экспериментальные значения получены в модельном эксперименте, проведённом сотрудниками ИБФ МЗ (Института биофизики Министерства здравоохранения) [16] на предприятии ядерной энергетики.

Проведённое таким образом сравнение показало, что для расчёта реальных процессов загрязнения воздуха рабочих помещений должна использоваться модель, в которой на частицы, участвующие в процессах формирования загрязнения воздуха и производственных поверхностей, наложено минимальное количество предположений, упрощающих уравнения непрерывности. Показано, что серьёзным фактором, усложняющим описание движения частиц, без которого, однако, расчётные данные не совпадают с экспериментальными, является необходимость учёта полидисперсности аэрозольных продуктов гидролиза гексафторида урана.

Т. к. основной характеристикой системы из большого числа частиц является функция распределения их размеров, то в уравнениях непрерывности, описывающих продукты гидролиза гексафторида урана, появляется эта функция, и знание её является необходимым условием решения поставленной задачи. Нахождение этой функции описано в работах [17, 18].

Основные характеристики полидисперсных аэрозолей — функции распределения радиусов аэрозольных частиц. В работе введены следующие функции: $g(r)$ (дифференциальная), $G(r)$ (интегральная), описывающие распределение радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации молекул интересующего нас вещества и $g_1(r, z, t)$ (дифференциальная), $G_1(r, z, t)$ (интегральная), описывающие распределение радиусов аэрозольных частиц в любой точке рабочего помещения в любой момент времени. Зависимость от координаты и времени появляется из-за движения аэрозольных частиц в поле силы тяжести и сопротивления среды.

Чтобы решить задачу определения концентрации урана в составе аэрозольных частиц, предложена методика нахождения функции $g(r)$, основанная на использовании расчётных данных, полученных в рамках построенной теоретической модели, и данных модельного эксперимента. Предложенная методика позволила получить набор значений интегральной функции распределения $G(r_i)$, где значения радиуса r_i определяются положением измерительных приборов и набором значений времени измерения.

Полученные значения $G(r_i)$ накладывались на теоретические зависимости $G(r)$ для наиболее распространенных типов промышленных аэрозолей. Для аэрозольных частиц продуктов гидролиза гексафторида урана принята была та функция $G(r)$, на которую расчётно-экспериментальные точки легли лучше всего.

По описанной методике получено, что функция распределения аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации, описывается логнормальным законом:

$$g(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln(\beta_g)} \frac{1}{r} \exp \left(- \left(\frac{\ln(r) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g) \cdot \sqrt{2}} \right)^2 \right),$$

$$G(r) = \int_0^r d\tilde{r} \cdot g(\tilde{r}) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{Erf} \left(\frac{\ln(r) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g) \cdot \sqrt{2}} \right) \right).$$

Здесь: $r_g = 2.74 \cdot 10^{-6}$ м и $\beta_g = 2.18$ — среднегеометрический радиус и стандартное геометрическое отклонение, характерные параметры логнормального распределения.

Функции $g_1(r, z, t)$, $G_1(r, z, t)$ вычислены по их определениям

$g_1(r, z, t) = \frac{n'(r, z, t)}{n_\infty(z, t)}$, $G_1(r, z, t) = \int_0^r d\tilde{r} \cdot g_1(\tilde{r}, z, t)$ и рассчитанным, в рамках построенной полидисперсной модели, удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации

$n'(r, z, t)$ молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r , а также концентрации $n_\infty(z, t)$ молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц всех размеров. Из полученных аналитических выражений для $g_1(r, z, t)$ и $G_1(r, z, t)$ следует.

1. В аварийной ситуации функции $g_1(r, z, t)$ описываются логнормальным законом в диапазоне значений $r = 0 \div r_0$ (рис. 2, рис. 3, кривые 2). При $r > r_0$ имеет место равенство $g_1(r, z, t) = 0$. Величина r_0 определяется выбранными значениями z и t . С приближением условий, принятых в модели, к реальным, усечение логнормального закона сглаживается (рис. 2, рис. 3, кривые 3). Кривые 1 на тех же рисунках изображают функцию $g(r)$.

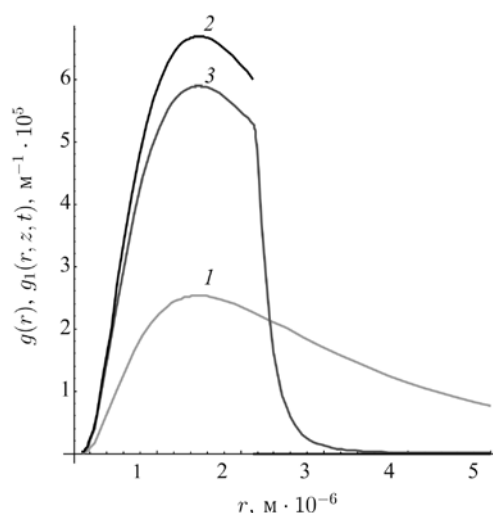


Рис. 2. Дифференциальные функции распределения радиусов аэрозольных частиц UO_2F_2 , образующихся в процессе нуклеации и находящихся на высоте $z_0 = 1.5$ м в момент времени $t = 10$ мин

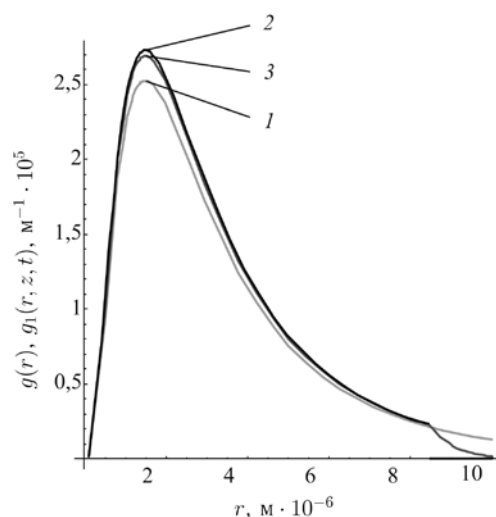


Рис. 3 Дифференциальные функции распределения радиусов аэрозольных частиц HF , образующихся в процессе нуклеации и находящихся на высоте $z_0 = 1.5$ м в момент времени $t = 10$ мин

2. В стационарных режимах, в отсутствии воздухообмена в рабочем помещении ($K = 0 \text{ час}^{-1}$), функция распределения размеров аэрозольных частиц не зависит от высоты z и описывается логнормальным законом со среднегеометрическим радиусом в 3.5 раза меньшим, чем в аварийной ситуации. В присутствии воздухообмена ($K \neq 0 \text{ час}^{-1}$) функция $g_1(r, z)$ зависит от высоты z и не описывается логнормальным законом. Однако, при $K \leq 3 \text{ час}^{-1}$ зависимость от z слаба, а отклонения от логнормального закона не велики. В стационарных производственных условиях чаще всего используется режим $K = 3 \text{ час}^{-1}$, поэтому и в производственном режиме можно считать, что распределение размеров аэрозольных частиц описывается логнормальным законом.

Далее по выбранной модели расчёта и найденной функции распределения размеров аэрозольных частиц определялась концентрация частиц в воздухе рабочего помещения и плотность их потока в различных направлениях.

Определив загрязнение атмосферы рабочего помещения продуктами распада гексафторида урана, находили поступление урана и фтора в организм человека в составе этих продуктов распада двумя способами — через кожу и органы дыхания [12, 13, 14].

Схема перкутанного поступления выделена цифрой 3 на блок-схеме комплексной модели формирования вредного воздействия гексафторида урана на организм человека (рис. 1) [14]. Осевшие на поверхность кожи вещества проникают в ткань кожи, из которой

впоследствии выходят, в основном, в процессе шелушивания кожи. Частично из ткани кожи они проникают в плазму крови и впоследствии выходят через мочевой пузырь.

Построены две модели перкутанного поступления рассматриваемых веществ в организм человека — интегральная и дифференциальная. Первая из них делит процесс прохождения урана и фтора в составе продуктов гидролиза гексафторида урана на два — прохождение через барьерный орган и интегрально через все внутренние органы. Вторая рассматривает процесс прохождения через барьерный орган аналогично, а прохождение через внутренние органы дифференцирует по отдельным органам.

В основу построения интегральной модели перкутанного поступления легли следующие положения и допущения [12, 13, 14].

1. Данные модельного эксперимента по закону изменения активности $A_1(t)$ урана на поверхности кожи и активности $A_2(t)$ урана в суточной моче со временем:
$$A_1(t) = A_1^0 (C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}) \text{ и } A_2(t) = A_2^0 (\tilde{C}_1 e^{-\tilde{\lambda}_1 t} + \tilde{C}_2 e^{-\tilde{\lambda}_2 t}),$$
 где A_1^0 , C_1 , C_2 , λ_1 , λ_2 , A_2^0 , $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$, $\tilde{\lambda}_1$, $\tilde{\lambda}_2$ — постоянные.
2. В модельном эксперименте поступление урана на кожу человека — мгновенное.
3. При протяжённом поступлении, порции атомов урана, поступающие на кожу на двух малых промежутках времени, эволюционируют далее по одинаковым законам. Суммарное поступление вычисляется интегрированием выражения для удельного (по времени) поступления.
4. Каждое элементарное поступление на кожу сразу же включается в процессы прохождения в ткань кожи, частично внутрь организма и процессы вывода из них.
5. В стационарных условиях поступление происходит только в течение рабочего дня, в конце каждого из рабочих дней кожа дезактивируется и полностью очищается от продуктов гидролиза гексафторида урана. Плотность потока атомов урана на поверхности кожи при этом описывается некоторой кусочно-постоянной функцией j ($j(t) = j_0$ внутри рабочего дня и $j(t) = 0$ вне его). Полное поступление вещества в организм находится суммированием интегралов, определяющих поступление на протяжении одного рабочего дня.
6. Вещество, проникающее в кожу, распределено в её толще по экспоненциальному закону $n(z) = n_0 e^{-\mu z}$ [8], в котором коэффициент μ найден из условия количественного соответствия данным эксперимента, моделирующего аварийную ситуацию.

В рамках построенной модели сделано следующее [12, 13, 14].

1. Вычислено число частиц рассматриваемого вещества на поверхности кожи $N_1(t)$, в ткани кожи $N_2(t)$, число $N_4(t)$ частиц, вышедших из организма к моменту времени t .
2. Вычислена энергия α -излучения, выделившаяся в соответствующем органе к моменту времени t : $\tilde{Q}(t) = \bar{W}_\alpha A_{уд} m_0 \int_0^t d\tau \cdot N(\tau)$ где: $\bar{W}_\alpha$ — энергия α -частицы; $A_{уд}$, m_0 — удельная активность урана и масса атома урана.
3. Вычислены эквивалентные дозы, формирующиеся во внутренних органах и, отдельно, в ткани кожи и в её самом чувствительном к α -излучению слое — базальном. Получено, что эквивалентная доза, формирующаяся в базальном слое, в 6 раз больше, чем в других областях кожи. В сочетании с большой чувствительностью к α -излучению, этот результат означает, что базальный слой является критическим при облучении кожи.
4. Просмотрены динамика депонирования урана и фтора в ткани кожи, во всех внутренних органах (интегрально), динамика вывода урана и фтора из организма. При расчётах депонирования и выхода фтора принималась приведённая ниже интегральная схема (рис. 4) [14], согласно которой фтор, не задерживаясь в ткани кожи, проходит во внутренние органы и выходит из организма через мочевой пузырь.
- 5.

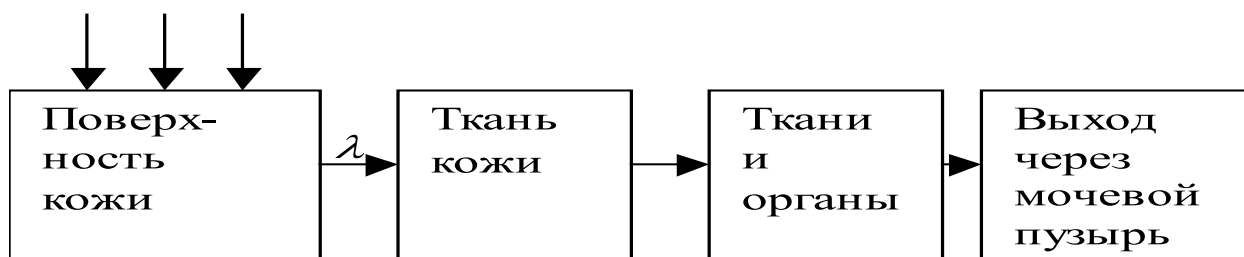


Рис. 4 Схема интегральной модели прохождения фтора через организм человека

6. В рамках интегральной модели посчитан вклад кожи в дозовый коэффициент урана, поступающего перкутанно.
Достоинства интегральной модели.
1. В литературе имеются данные по порогам детерминированных эффектов в связи с депонированием во всём организме урана и фтора [9]. Сопоставление этих данных с результатами расчётов в рамках интегральной модели позволяет определять опасность рассматриваемой ситуации и принимать меры по спасению пострадавших.

2. Обеспечивает возможность оценки депонирования в организме фтора, для которого нет набора параметров метаболизма, необходимого для использования камерной модели, рекомендуемой МКРЗ для описания прохождения вещества через организм.

Недостаток интегральной модели — отсутствие результатов по распределению депонирования веществ по отдельным внутренним органам и, соответственно, отсутствие возможности вычислить эффективную дозу, формирующуюся в организме.

Проведена верификация модели путём сравнения расчётных данных в рамках интегральной модели перкутанного поступления и данных реальной аварийной ситуации. Согласно этим данным, пострадавшая находилась в аварийной ситуации 15 мин, дезактивация кожи отсутствовала, продолжительность жизни — 5 час, данные патологоанатомов о количестве фтора в организме — $m_0 = 1713$ мг.

Расчёты, проведённые в рамках интегральной модели, показали, что зафиксированное патологоанатомами количество фтора в организме соответствует начальной концентрации гексафторида урана в воздухе $n_{\text{UF}_6,0} \approx 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, что не противоречит тем значениям $n \leq 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, которые могут быть реализованы при выбросе гексафторида урана в воздух рабочего помещения.

В основу построения дифференциальной модели перкутанного поступления легли следующие положения и допущения.

1. Камерная модель МКРЗ-67 [21], описывающая прохождение урана через организм в составе гексафторида урана, введённого непосредственно в плазму крови.
2. Интегральная модель прохождения вещества через барьерный орган (кожу).
3. Входные функции для камерной (дифференциальной) модели метаболических процессов (скорость ввода массы урана в плазму крови через кожу). Для аварийной ситуации [13, 14]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} m_0 S C \int_0^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda_3(t-\tau)}) = n_0 m_0 S C \lambda_3 e^{-\lambda_3 t} \cdot \sqrt{\frac{D}{\delta - \lambda_3}} \cdot \text{Erf} \left(\sqrt{(\delta - \lambda_3)t} \right).$$

Здесь: n_0 — начальная концентрация атомов урана в составе газов в воздухе рабочего помещения; m_0 — масса атома урана; S — эффективная площадь поверхности кожи человека; δ — постоянная, характеризующая скорость гидролиза UF_6 . Коэффициенты C и λ_3 подобраны так, чтобы, найденный экспериментально закон вывода урана из организма с мочой, наилучшим образом совпадал с законом скорости накопления урана в мочевом пузыре по модели МКРЗ.

Для стационарных производственных условий [12, 14]:

$$\frac{d}{dt}m(t) = j_0 m_0 SC \left(1 - e^{-\lambda_3(t - \alpha_{\bar{N}(t)})} \right), \quad t \in [t_1, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t < \beta_{\bar{N}(t)},$$

$$\frac{d}{dt}m(t) = 0, \quad t \in [t_1, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}.$$

Здесь: j_0 — плотность потока атомов урана на поверхности кожи пострадавшего; t_1 — начало нулевого рабочего дня; $\bar{N}(t)$ — номер суток, на которые приходится момент времени t ; α_n, β_n — начало и конец n -го рабочего дня.

В рамках построенной дифференциальной модели.

1. Просмотрена динамика депонирования урана в различных органах.
2. Проведены расчёты для условий, реализованных в модельном эксперименте и для стандартных производственных условий на предприятиях рассматриваемого типа.
3. Посчитаны дозовые коэффициенты при перкутанном поступлении в аварийной ситуации и в условиях производственной деятельности.
4. Проведено сравнение результатов, полученных для урана в рамках интегральной и дифференциальной моделей, в одинаковых условиях. Сделан вывод, что оба метода дают близкие результаты и потому интегральный метод может быть использован для оценки депонирования в организме фтора, для которого не известны метаболические параметры.

Достоинства дифференциальной модели.

1. В литературе имеются данные по порогам детерминированных эффектов в связи с депонированием урана и фтора в отдельных органах [9]. Сопоставление этих данных с результатами расчётов в рамках дифференциальной модели позволяет определять условия возникновения различных детерминированных эффектов.
2. В рамках этих моделей можно рассчитать многие величины, определяющиеся распределением поступившего вещества по органам.

Недостатки дифференциальной модели: она не описывает прохождение урана через барьерный орган при его перкутанном поступлении в составе продуктов гидролиза гексафторида урана и не описывает прохождение через организм веществ с неизвестными параметрами метаболизма.

Обе построенные модели перкутанного поступления в организм урана и фтора в составе продуктов гидролиза гексафторида урана дополняют друг друга в плане возможностей расчёта и анализа существующих данных по пороговым детерминированным эффектам, вызываемым этими веществами.

Второй способ поступления в организм человека радиоактивных и токсичных веществ (урана и фтора) — ингаляционный.

Блок-схема ингаляционного поступления гексафторида урана и продуктов его гидролиза в организм человека выделена цифрой 2 на рис. 1 [14], изображающем комплексную блок-схему формирования вредного воздействия гексафторида урана на организм человека. Вдохнутые с воздухом рабочего помещения уран и фтор проходят через барьерный орган (дыхательную систему), попадают в альвеолы, быстро проходят через них (быстрорастворимые вещества), попадают в кровь и выходят, в основном, через мочевой пузырь.

Построены две модели — интегральная и дифференциальная, различие между которыми то же, что между теми же моделями, описывающими перкутанное поступление.

В основу построения интегральной модели ингаляционного поступления легли следующие положения и допущения.

1. Активность $A(t)$ урана в суточной моче меняется со временем (после разового поступления) по закону: $A(t) = A_0(C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t})$, где A_0 , C_1 , C_2 , λ_1 , λ_2 — постоянные (литературные данные) [16].
2. При вдыхании воздух рабочего помещения попадает в организм малыми порциями.
3. Порции атомов урана, поступившие на двух малых промежутках времени, эволюционируют по одинаковым законам. Суммарное поступление вычисляется интегрированием выражения для удельного поступления.
4. В стационарных производственных условиях поступление происходит только в течение рабочего дня. Суммарное поступление вещества в организм находится суммированием интегралов, определяющих протяженное поступление одного рабочего дня.
5. Прохождение вдохнутых веществ через дыхательную систему описывается моделью, рекомендуемой МКРЗ [1, 3], в которой введён коэффициент задержки вдохнутого вещества ξ в дыхательном тракте. В нашей работе он определялся по следующей схеме.

В модели МКРЗ приведена графическая зависимость ($\xi = f(\text{АМАД})$) ξ от активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) радиоактивных аэрозольных частиц с логнормальным распределением размеров.

По литературным данным: $\text{АМАД} = 2r_g \cdot \sqrt{\rho}$, где r_g — среднегеометрический радиус частиц, описывающихся логнормальным законом распределения их размеров.

По нашим расчётам, распределения размеров аэрозольных частиц уранил-фторида (UO_2F_2) и фтористого водорода (HF) подчинены логнормальному закону, для которого найдены характерные параметры r_g (в аварийной ситуации) и $\tilde{r}_g$ (в производственных

условиях). Рассчитанные по приведённой схеме значения ξ приведены в табл. 1 (для фтора аналогом АМАД является массовый медианный аэродинамический диаметр ММАД).

Табл. 1. Коэффициенты задержки систем аэрозольных частиц UO_2F_2 и HF

Вещество аэрозолей	ξ (%)	Вещество аэрозолей	ξ (%)
Аварийные условия		Производственные условия	
UO_2F_2 (АМАД = 13.13 мкм)	34	UO_2F_2 (АМАД = 3.37 мкм)	38.5
HF (ММАД = 3.89 мкм)	34	HF (АМАД = 1.01 мкм)	28

Результаты, полученные в рамках интегральной модели: рассчитаны зависимости от времени масс урана $m_{\text{U}}(t)$ и фтора $m_{\text{F}}(t)$, поступающих, депонирующихся в организме и выходящих из него, эквивалентной дозы $H(t)$, сформированной в организме. Все расчёты проведены для аварийной ситуации и стационарных производственных условий.

Достоинства и недостатки построенной модели те же, что и у интегральной модели перкутанного поступления.

В основу построения дифференциальной модели ингаляционного поступления легли следующие положения и допущения.

1. Камерная (дифференциальная) модель МКРЗ-67 [21], описывающая прохождение урана через организм в составе гексафторида урана, поступающего непосредственно в плазму крови.
2. Модель, рекомендуемая МКРЗ для описания прохождения вещества через дыхательную систему [1, 3].
3. Вычисленные нами коэффициенты задержки в дыхательном тракте полидисперсных аэрозолей UO_2F_2 и HF [18].
4. Данные построенной нами модели загрязнения производственной среды по определению концентрации атомов токсичного вещества в воздухе рабочего помещения.
5. Аналитические выражения для скорости ввода массы урана в плазму крови. Для аварийной ситуации [13, 14]:

$$\frac{dm}{dt} = m_0 q \left(n_{\text{r}}(z_0, t) + \xi_{\text{a}} n_{\text{a}}(z_0, t) \right).$$

Для постоянных производственных условий [12, 14]:

$$\frac{dm}{dt} = m_0 q (n_r + \xi_a n_a(z_0)), \quad t \in [t_1, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t < \beta_{\bar{N}(t)},$$

$$\frac{dm}{dt} = 0, \quad t \in [t_1, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}.$$

Здесь: q — объём воздуха, вдыхаемого человеком в единицу времени; z_0 — высота, на которой находится нос человека; $n_r(z, t)$ и n_r — концентрации атомов урана в составе газов в аварийных и в стационарных условиях; ξ_a — коэффициент прохождения аэрозолей через дыхательную систему; $n_a(z, t)$ и $n_a(z)$ — концентрации атомов урана в составе аэрозолей в аварийных и в стационарных условиях. Остальные обозначения те же, что и для записи dm/dt при перкутанном поступлении.

Посчитаны: массы урана, депонированного в различных внутренних органах и выведенного из организма через мочевой пузырь; число распадов ядер урана, накопленных в различных органах в любой момент времени; дозовые коэффициенты при ингаляционном поступлении урана в аварийной ситуации и в условиях производственной деятельности. Приведены результаты численного расчёта при условиях, реализованных в модельном эксперименте ($n_{\text{УФ}_6,0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$) и при стандартных производственных условиях ($A_v = 3.7 \cdot 10^{-2} \text{ Бк / м}^3$) на предприятиях рассматриваемого типа.

Верификация дифференциальной модели проведена путём сравнения рассчитанных данных с данными, приведёнными в литературе.

Наш расчёт: для аварийного ингаляционного поступления дозовый коэффициент $\varepsilon = 9.73 \cdot 10^{-7} \text{ Зв / Бк}$ (АМАД = 13 мкм).

Публикация NRPB-W56 (Англия) [22]: $\varepsilon = 5.9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв / Бк}$ (АМАД = 5 мкм).

НРБ [6]: $\varepsilon = 4.9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв / Бк}$ (АМАД = 1 мкм).

С учётом того, что для всех приведённых случаев рассматриваемые системы частиц имеют различные значения АМАД и, учитывая тенденцию изменения ε с изменением АМАД (публикация NRPB-W56), можно заключить, что рассчитанное значение ε , в аварийной ситуации, для ингаляционного поступления, находится в соответствии со значением ε по литературным данным.

Проведено сравнение динамики вывода урана из организма, рассчитанной в рамках интегральной и дифференциальной моделей. Как и в случае перкутанного поступления, сделан вывод о том, что интегральная модель даёт результат, сопоставимый с результатом, который даёт дифференциальная модель. Поэтому для фтора, для которого отсутствуют

необходимые для использования модели МКРЗ метаболические параметры, было принято возможным использовать для расчётов прохождения вещества через организм интегральную модель.

В рамках построенных моделей, удалось получить целый ряд результатов, которые имеют большое практическое значение для спасения и помощи пострадавшим в аварийной ситуации, для предотвращения серьезных аварийных ситуаций, для своевременной помощи людям с профессиональным заболеванием. С этой целью проведён количественный сравнительный анализ ингаляционного и перкутанного поступлений урана и фтора в организм человека в составе гексафторида урана и продуктов его гидролиза при разных условиях. Ниже приведены некоторые примеры результатов такого анализа.

1. И при аварийной ситуации и в производственных условиях, и для урана и для фтора, ингаляционное депонирование на несколько порядков больше перкутанного.
2. Серьёзную радиационную опасность представляет только ингаляционное поступление урана.
3. В самой жёсткой аварийной ситуации (концентрация выброшенного гексафторида урана в начальный момент $n_{\text{UF}_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) уже 10 минутное пребывание в рабочем помещении, даже при защите органов дыхания, приводит к летальному исходу (поступление массы фтора $m = 330 \text{ мг}$ [9]). При этом поступление урана в ткань кожи в 2 раза, а ингаляционное поступление на 3 порядка больше указанной критической массы.
4. Перкутанное поступление урана в почки за 50 лет остается ниже предела нефротоксичности (3 мкг на 1 г ткани почек), а ингаляционное поступление существенно превышает его.
5. Транзит фтора через организм, за 50 лет перкутанного поступления, приближается к границе возникновения детерминированных эффектов, а за 50 лет ингаляционного поступления, примерно в 30 раз превышает эту границу.
6. Проведена оценка допустимого времени эвакуации из зоны выброса UF_6 при исключении ингаляционного поступления в условиях: определяющий фактор поражения — интоксикация фтором; моменты выхода из аварийной обстановки и дезактивации совпадают. Получено, что, при изменении начальной концентрации молекул гексафторида урана в диапазоне от $n_1 = 1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ до $n_5 = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, предельное время выхода из аварийной ситуации t_i меняется от $t_1 \approx 30 \text{ мин}$ до $t_6 \approx 1 \text{ мин}$

Самые важные выводы из проведённых расчётов можно сформулировать так.

1. В отсутствии мер защиты, ингаляционное поступление урана и фтора в организм в составе продуктов гидролиза гексафторида урана становится опасным для здоровья человека при гораздо меньших уровнях аварийного выброса, чем перкутанное поступление.
2. При реализации самого сильного загрязнения производственной среды ($n_{\text{UF}_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$), одно только перкутанное поступление, при защите органов дыхания, способно привести к серьёзной интоксикации ураном и смертельному исходу по фтору уже при минутном пребывании в аварийной ситуации даже при дезактивации кожи сразу после выхода. Организация измерения уровня выброса гексафторида урана ($n_{\text{UF}_6,0}$) и экстренной, фиксированной по времени, дезактивации кожи, позволяет оценить количество поступления урана и фтора в организм к заданному моменту времени и сориентировать специалистов относительно тактики оказания помощи пострадавшим.
3. В повседневном рабочем режиме, в котором объёмная плотность активности урана в газовой фазе $A_v = 7.4 \text{ Бк} / \text{м}^3$, нельзя работать длительное время без нанесения ущерба здоровью даже при защите органов дыхания.

Список литературы

1. Рекомендации МКРЗ. Публикация 30. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде: пер. с англ. В 3 ч. Ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 1983. 64 с.
2. Рекомендации МКРЗ. Публикация 30. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде: пер. с англ. В 3 ч. Ч. 3. М.: Энергоатомиздат, 1984. 96 с.
3. Рекомендации МКРЗ 1990 года. Публикация 60. Ч. 2. Радиационная безопасность: пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1994. 208 с.
4. Радиация и кожа: Материалы симпозиума. Уинфрит, Великобритания, 1963 г. / Пер. с англ. под ред. Д.П. Осанова. М.: Атомиздат, 1969. 104 с.
5. Leggett R.W., Pellmar N.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 64. P. 205-225.
6. СП 2.6.1.758- 99. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Гигиенические нормативы. М.: Минздрав России, 1999. 116 с.
7. Осанов Д.П., Лихтарев И.А. Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ. М. : Атомиздат, 1977. 200 с.

8. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М. : Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
9. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А. и др. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // В кн. Радиационная медицина. Т. 2 / под ред. Л.А. Ильина. М.: ИздАт, 2001. С. 369-389.
10. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Математическая модель ингаляционного поступления в организм человека токсичных веществ в условиях аварийной ситуации на предприятиях атомной промышленности // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2006. № 1. С. 36-39.
11. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Математическая модель ингаляционного и перкутанного поступления в организм человека токсичных веществ в условиях повседневной производственной деятельности на предприятиях атомной промышленности // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 3. С. 13-22.
12. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Комплексная модель формирования вредного воздействия гексафторида урана на организм человека в условиях аварийной ситуации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2007. № 3 (26). С. 89-100.
13. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Расчёт параметров радиационного воздействия урана на организм человека в условиях аварийной ситуации на предприятиях атомной промышленности // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2010. № 3. С. 14-17.
14. Бабенко С.П. Прогнозирование радиационного и токсического воздействия выбросов гексафторида урана методами математического моделирования: дис. ... докт. техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2008. 375 с.
15. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF₆ и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК диапазона / Г.Ю. Григорьев, А.И. Надеждинский, Ш.Ш. Набиев [и др.]. М., 2006. (Препринт / ИАЭ; № 6395/12).
16. Мирхайдаров А.Х. Исследование закономерностей загрязнения воздушной среды и поверхностей в производстве разделения изотопов урана: дис. ... канд. техн. наук / ИБФ МЗ. М., 1978. 217 с.
17. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Бадьин В.И. Оценка дозы, получаемой человеком за счёт аэрозольной компоненты аварийного выброса UF₆ в закрытом помещении // Известия Академии промышленной экологии. 2002. № 4. С. 70-77.
18. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранил-фторида // Атомная энергия. 2005. Т. 99, вып. 5. С. 353-358.

19. Бабенко С.П. Теоретическая оценка допустимого времени эвакуации из зоны аварийного выброса гексафторида урана в производственном помещении // Медицина труда и промышленная экология. 2005. № 11. С. 30-35.
20. Бабенко С.П. О расчете эффективных доз, получаемых человеком при перкутанном поступлении урана во время аварийной ситуации на производствах, работающих с гексафторидом урана // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 38-43.
21. ICRP, 1994. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67 // Ann. ICRP. 1994. Vol. 23, no. 3-4.
22. NRPB - W56. Assessment of Internal Doses to Workers Potentially Exposed to Enriched Uranyl Fluoride and Uranium Tetrafluoride. Publication date: May 2004.

Ensuring safety in factory shops under conditions of technological emissions of uranium hexafluoride

12, December 2013

DOI: 10.7463/1213.0625484

Babenko S.P., Bad'in A.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

babenkosp@mtu-net.ru

badyin@phys.msu.ru

This paper presents a review of literature and original methods for solving tasks of ensuring safety in factory shops at factories of nuclear industry that use uranium hexafluoride. The authors consider theoretical models of air pollution in factory shops with gaseous uranium hexafluoride and its hydrolysis products, settling of these products on factory surfaces, inhalation and percutaneous penetration of these products into human body. Capabilities of these models and some results of the calculations were described. This article was intended for publication in the journal "Science and Education: Electronic Scientific and Technical Periodical".

Publications with keywords: [mathematical model](#), [uranium hexafluoride](#), [products of hydrolyze](#), [person organism](#), [aerosol particles](#), [toxic matters](#)

Publications with words: [mathematical model](#), [uranium hexafluoride](#), [products of hydrolyze](#), [person organism](#), [aerosol particles](#), [toxic matters](#)

References

1. ICRP, 1980. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 2). *Ann. ICRP*, 1980, vol. 4, no. 3-4.
2. ICRP, 1981. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 3). *Ann. ICRP*, 1981, vol. 6, no. 2-3.
3. ICRP, 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, 1991, vol. 21, no. 1-3.

4. Wray E.T., ed. *Proceedings of a Symposium on Radiation and Skin*, Atomic Energy Establishment at Winfrith, 14 Nov. 1963. United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell, Berks, England, 1964. (Russ. ed.: *Radiatsiya i kozha: Materialy simpoziuma. Winfrith, United Kingdom, 1963*. Moscow, Atomizdat, 1969. 104 p.).
5. Leggett R.W., Pellmar N.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, vol. 64, pp. 205-225.
6. SP 2.6.1.758- 99. *Ioniziruyushchee izluchenie, radiatsionnaya bezopasnost'. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99). Gigienicheskie normativy* [Sanitary Rules 2.6.1.758-99. Ionizing radiation, radiation safety. Radiation Safety Standards (NRB-99). Hygienic standards]. Moscow, Publ. of Russian Ministry of Health, 1999. 116 p.
7. Osanov D.P., Likhtarev I.A. *Dozimetriya izlucheniya inkorporirovannykh radioaktivnykh veshchestv* [Radiation dosimetry of incorporated radioactive substances]. Moscow, Atomizdat, 1977. 200 p.
8. Osanov D.P. *Dozimetriya i radiatsionnaya biofizika kozhi* [Dosimetry and radiation biophysics of skin]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 152 p.
9. Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., et al. Klinicheskaya toksikologiya khimicheskikh soedineniy urana pri khronicheskoy ekspozitsii [Clinical toxicology of chemical compounds of uranium in case of chronic exposition]. In: Il'in L.A., ed. *Radiatsionnaya meditsina. T. 2* [Radiation medicine. Vol.2]. Moscow, IzdAt, 2001, pp. 369-389.
10. Babenko S.P., Bad'in A.V. Matematicheskaya model' ingalyatsionnogo postupleniya v organizm cheloveka toksichnykh veshchestv v usloviyakh avariynoy situatsii na predpriyatiyakh atomnoy promyshlennosti [Mathematical model of inhalation intake of toxic substances into the human organism under emergency situation at nuclear industry enterprises]. *Vestnik MSU. Ser. 3. Fizika. Astronomiya*, 2006, no. 1, pp. 36-39.
11. Babenko S.P., Bad'in A.V. Matematicheskaya model' ingalyatsionnogo i perkutannogo postupleniya v organizm cheloveka toksichnykh veshchestv v usloviyakh povsednevnoy proizvodstvennoy deyatel'nosti na predpriyatiyakh atomnoy promyshlennosti [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, vol. 18, no. 3, pp. 13-22.
12. Babenko S.P., Bad'in A.V. Kompleksnaya model' formirovaniya vrednogo vozdeystviya geksaforida urana na organizm cheloveka v usloviyakh avariynoy situatsii [Complex Model of Harmful Influence of Hexafluoride of Uranium on Human Organism under Emergency Conditions]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2007, no. 3, pp. 89-100.
13. Babenko S.P., Bad'in A.V. Raschet parametrov radiatsionnogo vozdeystviya urana na organizm cheloveka v usloviyakh avariynoy situatsii na predpriyatiyakh atomnoy promyshlennosti [Calculation of the parameters of the effects of uranium radiation on humans in emergencies at nuclear plants]. *Vestnik MSU. Ser. 3. Fizika. Astronomiya*, 2010, no. 3, pp. 14-17. (English translation: *Moscow University Physics Bulletin*, 2010, vol. 65, no. 3, pp. 170-173. DOI: [10.3103/S0027134910030033](https://doi.org/10.3103/S0027134910030033))

14. Babenko S.P. *Prognozirovanie radiatsionnogo i toksicheskogo vozdeystviya vybrosov geksftorida urana metodami matematicheskogo modelirovaniya*. Doct. diss. [Prediction of radiation and toxic effects of emissions of uranium hexafluoride by mathematical modeling methods. Dr. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2008. 375 p.
15. Grigor'ev G.Yu., Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., et al. *Ekspress-metody izmereniya stepeni obogashcheniya geksftorida urana i sledovykh kolichestv UF₆ i HF v atmosfere na osnove diodnykh lazerov blizhnego i srednego IK diapazona* [Express measurements of the degree of uranium hexafluoride enrichment UF₆ and HF trace quantities in atmosphere based on near- and mid-infrared diode lasers]. Preprint no. 6395/12. Moscow, Kurchatov Institute, 2006.
16. Mirkhaydarov A.Kh. *Issledovanie zakonomernostey zagryazneniya vozdukhnoy sredy i poverkhnostey v proizvodstve razdeleniya izotopov urana*. Kand. diss. [Study of regularities of the pollution of air and surfaces in the production of uranium isotope separation. Cand. diss.]. Moscow, 1978. 217 p.
17. Babenko S.P., Bad'in A.V., Bad'in V.I. Otsenka dozy, poluchaemoy chelovekom za schet aerol'noy komponenty avariynogo vybrosa UF₆ v zakrytom pomeshchenii [Evaluation of dose received by human through the aerosol component of the accidental release of UF₆ indoors]. *Izvestiya Akademii Promyshlennoy Ekologii*, 2002, no. 4, pp. 70-77.
18. Babenko S.P., Bad'in A.V. Metody opredeleniya funktsii raspredeleniya radiusa aerol'nykh chastits uranilftorida [Methods for determining the distribution function for the radius of uranyl-fluoride aerosol particles]. *Atomnaya energiya*, 2005, vol. 99, no. 5, pp. 353-358. (English translation: *Atomic Energy*, 2005, vol. 99, is. 5, pp. 787-791. DOI: 10.1007/s10512-006-0017-4).
19. Babenko S.P. Teoreticheskaya otsenka dopustimogo vremeni evakuatsii iz zony avariynogo vybrosa geksftorida urana v proizvodstvennom pomeshchenii [Theoretic evaluation of allowable time for evacuation from occupational zone of accidentally released uranium hexafluoride]. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* [Occupational medicine and industrial ecology], 2005, no. 11, pp. 30-35.
20. Babenko S.P. O raschete effektivnykh doz, poluchaemykh chelovekom pri perkutannom postuplenii urana vo vremya avariynoy situatsii na proizvodstvakh, rabotayushchikh s geksftoridom urana [On calculation of effective doses received by a human through percutaneous receiving of uranium during an emergency in industries working with uranium hexafluoride]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2005, no. 10, pp. 38-43.
21. ICRP, 1994. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP*, 1994, vol. 23, no. 3-4.
22. *NRPB - W56. Assessment of Internal Doses to Workers Potentially Exposed to Enriched Uranyl Fluoride and Uranium Tetrafluoride*. Publication date: May 2004.