

О перкутанном поступлении токсичных веществ в организм человека из атмосферы производственного помещения

01, январь 2014

DOI: 10.7463/0114.0671133

Бабенко С.П.¹, Бадьин А.В.²

УДК 51-74, 51-76, 614.876, 614.878

¹ Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана² Россия, МГУbabenkosvetlana@mail.rubadyin@phys.msu.ru

Введение

Перкутанное поступление — это поступление через кожу. В настоящей статье рассматривается перкутанное поступление в организм человека атомов урана и фтора в составе гексафторида урана (ГФУ, UF_6) и продуктов его гидролиза. Гексафторид урана — это вещество используемое в технологических процессах на обогатительных заводах атомной промышленности. В аварийных ситуациях и в повседневных производственных условиях происходит поступление этого вещества (в газообразном состоянии) в атмосферу рабочего помещения. Оказавшись в воздухе, ГФУ начинает взаимодействовать с водяными парами (вступает в процесс гидролиза) [1]. Некоторые из продуктов гидролиза гексафторида урана склонны к нуклеации, все это приводит к появлению в атмосфере рабочего помещения следующих веществ: UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль). Эти вещества распространяются по всему объему рабочего помещения и оседают на производственные поверхности и на человека.

Методы исследования

Вопросами проникновения в живые организмы и влияния на них токсичных и радиоактивных веществ давно занимаются физики, химики, медики, гигиенисты. Исследования ведутся в различных направлениях. В литературе описаны экспериментальные результаты, полученные на животных [2] и людях [3] в лабораторных и производственных условиях. Описано проникновение различных веществ через кожу [4] и через дыхательную систему [5, 6, 7, 8]. Описаны результаты эксперимента, моделирующего аварийную ситуацию, возникающую при неконтролируемом

выбросе UF_6 [9].

Известными методами изучения воздействия гексафторида урана на организм человека являются экспериментальные методы анализа естественных выделений человека после пребывания в загрязненном помещении. При всей своей информативности эти методы обладают рядом недостатков. Поэтому нами была поставлена задача создания методики определения поступления токсичных веществ в организм человека расчетным путем по минимальному количеству начальных данных, описывающих производственные условия. Была построена комплексная модель, состоящая из нескольких самостоятельных моделей. Эти модели описывают загрязнение производственной среды при аварийных выбросах и в повседневных производственных условиях [10, 11, 12, 13, 14, 15], оседание ГФУ и продуктов его гидролиза на производственные поверхности и человека [10, 11, 13], проникновение этих веществ в организм человека ингаляционным и перкутаным путями, прохождение их через организм, депонирование в организме и выход из него [10, 14, 15, 16, 17].

В настоящей статье выводы об ожидаемом воздействии гексафторида урана и продуктов его гидролиза на организм человека делаются на основе количественных расчетов в рамках модели перкутанного поступления. Чтобы читателю было понятно, как получены расчетные данные, приведенные в таблицах настоящей статьи, здесь повторяются некоторые сведения о модели перкутанного поступления и перечислены те параметры, которые можно получить в рамках построенной модели и использовать их для оценки воздействия ГФУ и продуктов его гидролиза на организм человека.

Перкутанное поступление описано двумя моделями — интегральной [10, 14, 15, 16] и камерной (дифференциальной) [10, 16, 17].

Интегральная модель описывает поступление токсичных веществ в кожу, прохождение их через кожу, выход из нее в процессе шелушивания верхнего слоя кожи, частичное проникновение в плазму крови, депонирование интегрально во всех внутренних органах, и далее выход из организма через мочевой пузырь.

Камерная (дифференциальная) модель не рассматривает подробно прохождение токсичных веществ через кожу, но определяет скорость их перехода с поверхности кожи в плазму крови, описывает депонирование в каждом органе по отдельности, и далее выход из организма через мочевой пузырь.

Для расчета перкутанного поступления токсичных веществ в организм человека необходимо знать плотность потока молекул интересующего нас вещества на поверхности кожи. Эта величина определялась в рамках модели загрязнения производственной среды при аварийных выбросах и в

повседневных производственных условиях [10, 11, 13].

Интегральная модель перкутанного поступления позволила получить аналитические выражения для следующих величин: $N_1(t)$ — число атомов токсичного вещества, осевших на кожу на временном промежутке $[0, t]$; $N_2(t)$ — число атомов токсичного вещества, находящихся на поверхности кожи в момент времени t ; $N_3(t)$ — число атомов токсичного вещества, находящихся в глубине кожи в момент времени t ; $\tilde{N}_3(t)$ — число атомов токсичного вещества, находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_4(t)$ — число атомов токсичного вещества, вышедших из организма с мочой на временном промежутке $[0, t]$. Величина $N_1(t)$ определялась на основе предположения, что перкутанное поступление токсичных веществ происходит в основном за счет газовой компоненты. Аэрозоли в перкутанном поступлении не участвуют [18].

В основе построенной нами камерной (дифференциальной) модели перкутанного поступления лежит рекомендуемая Международной Комиссией по Радиологической защите (МКРЗ) камерная модель депонирования в различных органах и вывода из организма урана, поступающего **непосредственно в плазму крови** в составе уранил-фторида UO_2F_2 [19, 20].

Использование этой модели предполагает знание скорости ввода урана в плазму крови из барьерного органа, т. е. из кожи. Последняя определялась построенными нами моделями оседания UF_6 и продуктов его гидролиза на производственные поверхности [10, 11, 13] и моделью поступления урана через кожу в организм человека [10, 14, 15]. При этом были получены следующие выражения для скорости ввода массы урана в кровоток.

Для аварийной ситуации [10, 16]

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

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; C — постоянная, характеризующая связь между массой урана, осевшего на поверхность кожи и массой урана, попавшего в плазму крови; λ_3 — постоянная, определяющая скорость перехода урана с поверхности кожи в кровоток; D — коэффициент диффузии; δ — постоянная, характеризующая скорость гидролиза UF_6 ; Erf — функция ошибок. Величины C и λ_3 подбирали таким образом, чтобы найденный экспериментально закон вывода урана из организма с мочой наилучшим образом совпадал с законом скорости накопления урана в мочевом пузыре по модели МКРЗ [19, 20].

Исходя из указанных соображений для этих коэффициентов выбраны значения $C = 8 \cdot 10^{-4}$ (C — безразмерная величина) и $\lambda_3 = 0.57 \text{ сут}^{-1}$.

Для повседневных производственных условий [10, 17]

$$\frac{d}{dt}m(t) = j_0 m_0 SC \left(1 - e^{-\lambda_3(t - \alpha_{\bar{N}(t)})} \right), \quad t \in [0, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t < \beta_{\bar{N}(t)},$$
$$\frac{d}{dt}m(t) = 0, \quad t \in [0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}.$$

Здесь: $\bar{N}(t)$ — номер суток, на которые приходится момент времени t ; α_n — начало n -го рабочего дня; β_n — конец n -го рабочего дня; γ_n — конец n -х суток ($\alpha_{n+1} = \gamma_n$); j_0 — плотность потока атомов урана на поверхности кожи человека, находящегося в производственном помещении (в рассматриваемой модели эта величина не зависит от времени). Остальные обозначения те же, что и в формуле (1).

Результаты расчета депонирования в организме и вывода из него урана, полученные в рамках построенной ранее модели перкутанного поступления токсичных веществ

В табл. 1 приведена динамика поступления токсичных веществ в организм человека в аварийной ситуации (время отсчитывается от момента выброса гексафторида урана). Расчеты проведены в рамках интегральной модели, начальная концентрация молекул ГФУ удовлетворяет условию $n_{\text{УФ}_6,0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (мы предполагаем, что начальная концентрация молекул гексафторида урана одинакова во всех точках рабочего помещения), n — концентрация атомов урана в составе газов.

Табл. 1. Динамика поступления токсичных веществ в организм в аварийной ситуации

t (мин)	n (м^{-3})	Поступление урана		Поступление фтора	
		m (мг) с газами		m (мг) с газами	
		Масса, осевшая на кожу	Масса, прошедшая в глубину кожи	Масса, осевшая на кожу	Масса, прошедшая в глубину кожи
1	$6.63 \cdot 10^{20}$	8.4	0.012	4.3	0.06
2	$3.17 \cdot 10^{20}$	10.25	0.03	5.35	0.15
3	$1.42 \cdot 10^{20}$	10.91	0.051	5.72	0.26
5	$2.71 \cdot 10^{19}$	10.91	0.095	5.9	0.95
10	$4.24 \cdot 10^{17}$	11.24	0.21	5.93	0.99
15	$6.62 \cdot 10^{15}$	11.3	0.31	5.93	1.45
20	$1.04 \cdot 10^{14}$	11.3	0.442	5.93	1.88
30	$2.53 \cdot 10^{10}$	11.3	0.63	5.93	2.6
300	0	11.3	5.04	5.93	5.91

Из приведенных результатов расчета вытекает следующее. Максимальная масса урана, оседающего на кожу человека с газами, приблизительно равна 11.3 мг. Уже через 1 минуту оседает 74 % этого максимального значения, через 3 минуты — 96.5 %, через 5 минут — 99.5 %. Поэтому можно заключить, что заметно снизить поступление урана с газами на кожу можно только уменьшив срок пребывания в аварийном помещении до нереально малого значения $t_b \leq 1$ минуты (t_b — момент выхода из аварийного помещения, t_d — момент дезактивации кожи).

Тем не менее, сокращение срока пребывания в аварийном помещении важно для пострадавшего. Связано это с тем, что хотя поступление урана на кожу практически прекращается, осевший на кожу уран начинает проходить сквозь нее и воздействовать на внутренние органы человека, более чувствительные к урану, чем кожа. Процесс проникновения урана через кожу — более инерционный процесс, чем процесс оседания на кожу газов, несущих уран. Если сразу после

выхода из аварийного помещения обеспечить дезактивацию кожи, то уменьшением величины t_b и приближением t_d к t_b можно обеспечить уменьшение дозы токсичного вещества, которую получит человек. В отсутствие дезактивации через 5 часов в глубину кожи проходит 45 % от поступившего на кожу урана.

Максимальная масса фтора, оседающего на кожу человека с газами, приблизительно равна 5.93 мг. Через 1 минуту, 3 минуты и 5 минут на кожу оседает 72.5 %, 96.4 % и 99.5 % этого максимального значения соответственно. В отсутствие дезактивации через 5 часов в глубину кожи проходит 99.7 % от поступившего на кожу фтора.

При начальной (в момент аварийного выброса) концентрации молекул гексафторида урана в рабочем помещении $n_{UF_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ даже трехминутный промежуток времени от выброса до выхода из аварийного помещения приводит к поступлению в организм фтора в количестве $m = 1032 \text{ мг}$, что значительно больше той массы $m = 330 \text{ мг}$, которая может привести к летальному исходу [21]. Для урана заметный вред здоровью человека наблюдается при поступлении $m = 330 \text{ мг}$ [22], поэтому уран при реальных перкутанных поступлениях заметного вреда человеку не принесет.

В табл. 2 приведены данные по поступлению токсичных веществ в организм человека в повседневных производственных условиях. Расчеты проведены в рамках интегральной модели, m_k — масса токсичного вещества на поверхности кожи к концу рабочего дня, $m_{п}$ — масса токсичного вещества, поступившего на нее в течение рабочего дня. Сравниваются скорости перехода урана и фтора с поверхности кожи внутрь организма (в плазму крови).

Приведенные данные соответствуют стандартному производственному режиму, в котором объемная активность урана в составе газов удовлетворяет условию $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$. Следует заметить, что объемная активность по своему физическому смыслу является не активностью, а объемной плотностью активности и измеряется не в Бк, а в Бк/м³. Здесь объемная плотность активности определяется как производная активности A по объему V [23, 24].

Табл. 2. Сравнение масс вещества (урана и фтора), поступившего на кожу в течение рабочего дня, и оставшегося на ней к концу дня

t (час)	Уран			Фтор		
	m_k (кг)	m_{Π} (кг)	$\frac{m_k}{m_{\Pi}}$ (%)	m_k (кг)	m_{Π} (кг)	$\frac{m_k}{m_{\Pi}}$ (%)
6	$6.61 \cdot 10^{-9}$	$9.28 \cdot 10^{-9}$	71.23	$6.95 \cdot 10^{-10}$	$4.96 \cdot 10^{-9}$	14

Из этих данных следует, что урана на коже к концу рабочего дня остается 71.23 % от той массы, которая осела на нее (и на пол). Фтора, при тех же условиях, остается 14 %. Внутри организма, за это время, успевает пройти 86% от массы фтора, осевшего на кожу. Это означает, что дезактивация кожи после рабочего дня для фтора менее результативна, чем для урана.

В табл. 3 приведены расчетные данные, позволяющие сравнить величины поступления на поверхность кожи, входа в организм, накопления и выхода из него урана и фтора за первый год работы и за 50 лет производственной деятельности. Расчеты проведены в рамках интегральной модели для повседневных производственных условий, принималось, что $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк / м³.

Табл. 3. Количественное сравнение поступления на поверхность кожи, входа в организм, накопления и выхода из него урана и фтора за 1-ый год работы и за 50 лет производственной деятельности

Вид вещества	Масса вещества m (кг), поступившего на кожу,	Масса вещества m (кг), прошедшего в глубину кожи	Масса вещества m (кг), накопленного в коже	Масса вещества m (кг), накопленного внутри организма	Масса вещества m (кг), вышедшего с мочой	Масса вещества m (кг), вышедшего при шелушивании кожи
1-ый год работы						
уран	$3.457 \cdot 10^{-6}$	$9.58 \cdot 10^{-7}$	$9.77 \cdot 10^{-8}$	$3.087 \cdot 10^{-9}$	$7.043 \cdot 10^{-9}$	$8.5 \cdot 10^{-7}$
фтор	$1.814 \cdot 10^{-6}$	$1.56 \cdot 10^{-6}$	—	$1.138 \cdot 10^{-8}$	$1.557 \cdot 10^{-6}$	—
50 лет работы						
уран	$1.729 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$9.792 \cdot 10^{-8}$	$3.476 \cdot 10^{-9}$	$5.03 \cdot 10^{-7}$	$4.74 \cdot 10^{-5}$
фтор	$9.069 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	—	$1.138 \cdot 10^{-8}$	$7.797 \cdot 10^{-5}$	—

Рассмотрим данные по урану за первый год работы. Основная доля, 72.29 % массы поступившего урана, выводится из кожи при ее дезактивации после окончания рабочего дня; 27.42 % массы поступившего урана задерживается верхними слоями кожного покрова, из них 2.83 % депонируется в коже, а 24.59 % со временем выводится из нее биологическими процессами (за счет шелушивания верхнего слоя кожи), не проходя через весь организм; 0.09 % массы поступившего урана депонируется во внутренних органах; 0.2 % выводится естественным путем (через мочевой пузырь). При переходе к данным по урану за 50 лет производственной деятельности, обнаруживается, что рассматриваемые отношения масс принимают значения: 72.24 %; 27.47 %, 0.06 %, 27.41 %; 0.002 %; 0.29 %, т.е. через год накопление урана прекращается и вывод становится равен вводу.

Рассмотрим данные по фтору за первый год работы. Дезактивацией с кожи удаляется 14 % поступившего фтора. Внутри организма депонируется 0.63 % и с мочой выводится 85.83 %. При переходе к данным по фтору за 50 лет производственной деятельности, обнаруживается, что

рассматриваемые отношения масс принимают значения: 13.99 %; 0.01 %; 85.97 %, т. е. качественно, с увеличением времени производственной деятельности, с отношениями масс для фтора происходят те же изменения, что и с соответствующими отношениями масс для урана.

Видно, что масса фтора, накопленного внутри организма, раза в четыре больше, чем масса накопленного в нем урана. Однако полная масса урана, складывающаяся из накопленной в организме и в коже, почти на порядок больше массы накопленного в организме фтора.

Важными зависимостями, за которыми надо наблюдать, чтобы оградить людей от профессиональных заболеваний на производствах атомной промышленности, являются динамика длительного поступления токсичных веществ в организм и динамика их естественного выхода. В табл. 4 приведены результаты расчета этих зависимостей для поступления урана в повседневных производственных условиях по двум моделям — интегральной и камерной (дифференциальной), принималось, что $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк / м³.

Табл. 4. Динамика поступления и выхода урана

t (сут)	Депонирование, m (мг)		Выход, m (мг)			
	Интегральная модель	Камерная модель (дифференциальная)	Интегральная модель		Камерная модель (дифференциальная)	
			Суммарный выход	Суточный выход	Суммарный выход	Суточный выход
1	$2.36 \cdot 10^{-5}$	$2.95 \cdot 10^{-5}$	$4.18 \cdot 10^{-6}$	$4.18 \cdot 10^{-6}$	$1.13 \cdot 10^{-4}$	
10	$2.07 \cdot 10^{-4}$	$2.42 \cdot 10^{-4}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$		$6.12 \cdot 10^{-4}$	
30	$5.76 \cdot 10^{-4}$	$5.76 \cdot 10^{-4}$	$2.56 \cdot 10^{-4}$		$2.035 \cdot 10^{-3}$	
50	$9.04 \cdot 10^{-4}$	$7.14 \cdot 10^{-4}$	$4.84 \cdot 10^{-4}$		$3.55 \cdot 10^{-3}$	
100	$1.53 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$		$7.49 \cdot 10^{-3}$	
280	$2.83 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$4.94 \cdot 10^{-3}$		$2.24 \cdot 10^{-2}$	
365	$3.09 \cdot 10^{-3}$	$2.073 \cdot 10^{-3}$	$7.04 \cdot 10^{-3}$		$2.92 \cdot 10^{-2}$	
2·280	$3.36 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$		$4.53 \cdot 10^{-2}$	
3·280	$3.45 \cdot 10^{-3}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$	$1.99 \cdot 10^{-2}$		$6.83 \cdot 10^{-2}$	
4·280	$3.47 \cdot 10^{-3}$	$4.27 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-2}$		$9.12 \cdot 10^{-2}$	
5·280	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$3.54 \cdot 10^{-2}$		$1.14 \cdot 10^{-1}$	
50·280	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$2.14 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$		1.5	
50·365	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$2.43 \cdot 10^{-2}$	$3.85 \cdot 10^{-1}$	$2.78 \cdot 10^{-5}$	1.17	$8.5 \cdot 10^{-5}$

Как видно, имеет место совпадение результатов, полученных двумя методами расчета. Совпадение достаточно хорошее для того, чтобы по тем и другим результатам получить реальное представление о возможности работы человека в рассматриваемых условиях. Из вышеупомянутого совпадения можно сделать вывод, что для расчетов (проводимых с целью решения конкретной задачи) можно использовать любую модель, а выбирать нужно ту, которая более информативна для решения поставленной задачи.

В табл. 5 приведена динамика массы m (кг) депонированного в различных органах урана. Расчеты проведены в рамках камерной (дифференциальной) модели для повседневных производственных условий, принималось, что $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³.

Табл. 5. Динамика депонирования урана в различных органах

t (сут)	Почки	Поверхн. трабек. костей	Объем трабек. костей	Поверхн. кортик. костей	Объем кортик. костей	Печень	Мягкие ткани	Плазма крови	Красные кров. тельца	Сумма во всех органах
2	$1.9 \cdot 10^{-11}$	$1.23 \cdot 10^{-11}$	$1.12 \cdot 10^{-12}$	$9.86 \cdot 10^{-12}$	$8.93 \cdot 10^{-13}$	$2.35 \cdot 10^{-12}$	$1.22 \cdot 10^{-11}$	$2.81 \cdot 10^{-13}$	$1.16 \cdot 10^{-12}$	$6.04 \cdot 10^{-11}$
4	$3.5 \cdot 10^{-11}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$	$3.68 \cdot 10^{-12}$	$1.76 \cdot 10^{-11}$	$2.94 \cdot 10^{-12}$	$4.35 \cdot 10^{-12}$	$2.35 \cdot 10^{-11}$	$2.81 \cdot 10^{-13}$	$1.76 \cdot 10^{-12}$	$1.13 \cdot 10^{-10}$
10	$7.2 \cdot 10^{-11}$	$4.1 \cdot 10^{-11}$	$1.68 \cdot 10^{-11}$	$3.27 \cdot 10^{-11}$	$1.35 \cdot 10^{-11}$	$8.9 \cdot 10^{-12}$	$5.45 \cdot 10^{-11}$	$4.47 \cdot 10^{-13}$	$2.4 \cdot 10^{-12}$	$2.44 \cdot 10^{-10}$
30	$1.2 \cdot 10^{-10}$	$6.34 \cdot 10^{-11}$	$7.86 \cdot 10^{-11}$	$5.07 \cdot 10^{-11}$	$6.37 \cdot 10^{-11}$	$1.59 \cdot 10^{-11}$	$1.29 \cdot 10^{-10}$	$6.81 \cdot 10^{-13}$	$2.66 \cdot 10^{-12}$	$5.3 \cdot 10^{-10}$
50	$1.4 \cdot 10^{-10}$	$7.28 \cdot 10^{-11}$	$1.39 \cdot 10^{-10}$	$5.82 \cdot 10^{-11}$	$1.14 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-11}$	$1.73 \cdot 10^{-10}$	$7.88 \cdot 10^{-13}$	$9.74 \cdot 10^{-12}$	$7.24 \cdot 10^{-10}$
100	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$8.75 \cdot 10^{-11}$	$2.65 \cdot 10^{-10}$	$6.99 \cdot 10^{-11}$	$2.23 \cdot 10^{-10}$	$2.53 \cdot 10^{-11}$	$2.26 \cdot 10^{-10}$	$9.21 \cdot 10^{-13}$	$2.86 \cdot 10^{-12}$	$1.04 \cdot 10^{-9}$
180	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$9.75 \cdot 10^{-11}$	$4.19 \cdot 10^{-10}$	$7.79 \cdot 10^{-11}$	$3.67 \cdot 10^{-10}$	$3.44 \cdot 10^{-11}$	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$9.93 \cdot 10^{-13}$	$2.91 \cdot 10^{-12}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$
280	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$1.02 \cdot 10^{-10}$	$5.72 \cdot 10^{-10}$	$8.14 \cdot 10^{-11}$	$5.23 \cdot 10^{-10}$	$4.55 \cdot 10^{-11}$	$2.98 \cdot 10^{-10}$	$1.02 \cdot 10^{-12}$	$2.94 \cdot 10^{-12}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
365	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$1.03 \cdot 10^{-10}$	$6.86 \cdot 10^{-10}$	$8.22 \cdot 10^{-11}$	$6.46 \cdot 10^{-10}$	$5.46 \cdot 10^{-11}$	$3.26 \cdot 10^{-10}$	$1.03 \cdot 10^{-12}$	$2.94 \cdot 10^{-12}$	$2.07 \cdot 10^{-9}$
2·280	$1.7 \cdot 10^{-10}$	$1.04 \cdot 10^{-10}$	$9.27 \cdot 10^{-10}$	$8.28 \cdot 10^{-11}$	$9.25 \cdot 10^{-10}$	$7.54 \cdot 10^{-11}$	$3.91 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-12}$	$2.95 \cdot 10^{-12}$	$2.7 \cdot 10^{-9}$
3·280	$1.9 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.24 \cdot 10^{-9}$	$8.32 \cdot 10^{-11}$	$1.32 \cdot 10^{-9}$	$1.04 \cdot 10^{-10}$	$4.84 \cdot 10^{-10}$	$1.06 \cdot 10^{-12}$	$2.97 \cdot 10^{-12}$	$3.51 \cdot 10^{-9}$

4·280	$2 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$8.34 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-9}$	$1.31 \cdot 10^{-10}$	$5.75 \cdot 10^{-10}$	$1.08 \cdot 10^{-12}$	$2.97 \cdot 10^{-12}$	$4.27 \cdot 10^{-9}$
5·280	$2.1 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.74 \cdot 10^{-9}$	$8.35 \cdot 10^{-11}$	$2.08 \cdot 10^{-9}$	$1.57 \cdot 10^{-10}$	$6.66 \cdot 10^{-10}$	$1.07 \cdot 10^{-12}$	$2.98 \cdot 10^{-12}$	$4.99 \cdot 10^{-9}$
50·280 0	$3 \cdot 10^{-10}$	$1.06 \cdot 10^{-10}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$8.46 \cdot 10^{-11}$	$1.26 \cdot 10^{-8}$	$5.9 \cdot 10^{-10}$	$4.32 \cdot 10^{-9}$	$1.16 \cdot 10^{-12}$	$3.01 \cdot 10^{-12}$	$2.14 \cdot 10^{-8}$
50·36 5	$3 \cdot 10^{-10}$	$1.06 \cdot 10^{-10}$	$3.36 \cdot 10^{-9}$	$8.5 \cdot 10^{-11}$	$1.43 \cdot 10^{-8}$	$6.16 \cdot 10^{-10}$	$5.36 \cdot 10^{-9}$	$1.17 \cdot 10^{-12}$	$3.03 \cdot 10^{-12}$	$2.43 \cdot 10^{-8}$

Видно следующее.

- Во всех органах количество депонированного вещества вначале растет со временем, а далее практически перестает зависеть от него. Дольше всего эта зависимость сохраняется для мягких тканей.
- К концу трудовой деятельности больше всего урана накапливается в объеме кортикальных костей, а затем в мышцах, в объеме трабекулярных костей, печени, почках, в поверхности трабекулярных, кортикальных костей, в плазме крови. При этом массы накоплений в этих органах через 50 лет производственной деятельности равны соответственно: $m_5 = 2 \cdot 10^{-8}$ кг, $m_2 = 7 \cdot 10^{-9}$ кг, $m_7 = 5 \cdot 10^{-9}$ кг, $m_{11} = 7 \cdot 10^{-10}$ кг, $m_8 = 4 \cdot 10^{-10}$ кг, $m_6 = 1 \cdot 10^{-10}$ кг, $m_4 = 9 \cdot 10^{-11}$ кг, $m_1 = 1 \cdot 10^{-12}$ кг.
- Скорость накопления урана в различных органах и на различных временных промежутках различна.
- Из плазмы крови уран быстрее всего переходит в почки.
- За 50 лет производственной деятельности из организма с мочой выходит уран общей массой $m_5 = 1.2 \cdot 10^{-6}$ кг.
- Для всех органов накопление урана за всю производственную деятельность много меньше того количества, которое считается для урана в соответствующем органе критическим.

В табл. 6 приведена нагрузка различных органов депонированным ураном через 50 лет производственной деятельности (максимально большой срок работы на производстве). Расчеты проведены в рамках камерной (дифференциальной) модели для повседневных производственных условий, принималось, что $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³, $m_{\text{нак}}$ — масса урана, накопленного за 50 лет производственной деятельности в органе с массой $m_{\text{орг}}$.

Табл. 6. Нагрузка различных органов депонированным ураном через 50 лет производственной деятельности

t	Органы	$m_{\text{орг}}$ (кг)	$m_{\text{нак}}$ (кг)	$\frac{m_{\text{нак}}}{m_{\text{орг}}}$ (мкг / г)
50 лет	почки	0.31	$2.6 \cdot 10^{-7}$	0.84
	пов. трабек. кости	0.024	$9.34 \cdot 10^{-8}$	3.89
	объем трабек. кости	1	$2.96 \cdot 10^{-6}$	2.96
	пов. кортик. кости	0.096	$7.46 \cdot 10^{-8}$	0.78
	объем кортик. кости	4	$1.31 \cdot 10^{-5}$	3.28
	печень	1.8	$5.47 \cdot 10^{-7}$	0.3
	мягкие ткани	66	$5.08 \cdot 10^{-6}$	0.08

Для всех органов накопление урана за всю производственную деятельность меньше того количества, которое считается для урана в соответствующем органе критическим. Однако к концу всей производственной деятельности оно близко к нему. В частности, для почек масса депонированного урана становится равной 260 мкг. Такое депонирование уже близко к критическому [20].

Видно, что больше всего нагружены ураном (на единицу массы органа) следующие органы: поверхность трабекулярной кости, объем кортикальной кости, объем трабекулярной кости. Далее (в порядке уменьшения величины $m_{\text{нак}} / m_{\text{орг}}$) следуют почки, поверхность кортикальной кости, печень и мягкие ткани.

Приведенные числа соответствуют стандартному производственному режиму, в котором объемная активность урана в составе газов $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³. При работе в самом экстремальном производственном режиме, при котором $A_v = 7.4$ Бк/м³, накопленное в почках количество урана существенно превысит критическое значение. Это значит, что работа в таком режиме в течение

длительного времени должна быть запрещена.

В табл. 7 приведена динамика активности A (Бк) накопленного в организме урана. Расчеты проведены в рамках интегральной модели для повседневных производственных условий, принималось, что $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³ (при $K = 3$ час⁻¹).

Табл. 7. Динамика активности

t	K (час ⁻¹)			
	0	3	5	7
1 час	$2.271 \cdot 10^{-5}$	$2.191 \cdot 10^{-5}$	$2.141 \cdot 10^{-5}$	$2.095 \cdot 10^{-5}$
6 час	$6.59 \cdot 10^{-4}$	$6.361 \cdot 10^{-4}$	$6.217 \cdot 10^{-4}$	$6.082 \cdot 10^{-4}$
280 сут	$6.978 \cdot 10^{-2}$	$6.731 \cdot 10^{-2}$	$6.579 \cdot 10^{-2}$	$6.436 \cdot 10^{-2}$
365 сут	$7.615 \cdot 10^{-2}$	$7.346 \cdot 10^{-2}$	$7.18 \cdot 10^{-2}$	$7.024 \cdot 10^{-2}$
50·280 сут	$8.574 \cdot 10^{-2}$	$8.271 \cdot 10^{-2}$	$8.084 \cdot 10^{-2}$	$7.908 \cdot 10^{-2}$
50·365 сут	$8.574 \cdot 10^{-2}$	$8.271 \cdot 10^{-2}$	$8.084 \cdot 10^{-2}$	$7.908 \cdot 10^{-2}$

Как видно по этим данным, за 50 лет производственной деятельности накапливается максимальное количество урана, которое обеспечивает активность $A = 8.57 \cdot 10^{-2}$ Бк. От начала производственной деятельности до ее конца скорость накопления с течением времени уменьшается. Начиная от года непрерывной работы, накопленное в организме количество урана практически не меняется.

Важнейшей характеристикой отклика организма на воздействие поступившего в него радиоактивного вещества является дозовый коэффициент, определяющийся выражением

$$\varepsilon = \frac{E}{\Pi_A}$$

Здесь: Π_A — поступление по активности (активность вещества, поступившего в организм; для перкутанного поступления это активность вещества, осевшего на кожу); E — эффективная доза — величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Величина E определяется следующим образом

$$E = \sum_T \frac{W_T W}{m_T} Q_T.$$

Здесь: W_T — взвешивающий коэффициент для органа или ткани T; W — взвешивающий коэффициент для α -излучения ($W = 20$); m_T — масса органа или ткани T; Q_T — энергия α -излучения, поглощенная в органе или ткани T. Величина Q_T рассчитывалась в рамках рассматриваемой модели по числу атомов урана, прошедших в соответствующий орган. Величины W_T для отдельных органов приведены в нормах радиационной безопасности [25].

В рамках интегральной модели нельзя определить дозовый коэффициент, т.к. в ней не вычисляется поглощенная энергия α -излучения дифференциально в каждом органе и, следовательно, невозможно учесть взвешивающий коэффициент для каждого органа. Поэтому в табл. 8 и табл. 9 приведены расчетные данные по определению дозового коэффициента, характеризующего получение дозы человеком при поступлении урана в аварийной ситуации и в повседневных производственных условиях, полученные в рамках камерной (дифференциальной) модели. В табл. 8 приведены результаты для аварийной ситуации, принималось, что $n_{\text{У}_{235},0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, N'_T — число распадов, накопленное в органе или ткани T за $\tau = 50$ лет после поступления, E_T — эффективная доза, сформированная в органе или ткани T за $\tau = 50$ лет после поступления, $E = \sum_T E_T$ — эффективная доза, сформированная во всех внутренних органах за

$\tau = 50$ лет после поступления, Π_A — поступление по активности, $\varepsilon = \frac{E}{\Pi_A}$ — дозовый коэффициент.

Табл. 8. Распределение доз по органам через $t = 50$ лет после разового поступления урана

Орган	N'_T	Эффективная доза E_T (Зв)	Эффективная доза E (Зв) во всех внутр. органах	Π_A (Бк)	$\varepsilon = \frac{E}{\Pi_A}$ (Зв/Бк)
Почки	$3.6 \cdot 10^6$	$3.98 \cdot 10^{-6}$	$2.25 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^{-9}$
Пов. траб. кости	$1.3 \cdot 10^6$	$1.08 \cdot 10^{-6}$			
Объем трабек. к.	$4.05 \cdot 10^7$	$1.08 \cdot 10^{-6}$			
Пов. кортик. к.	$1.04 \cdot 10^6$	$3.39 \cdot 10^{-6}$			
Объем кортик. к.	$1.73 \cdot 10^8$	$2.98 \cdot 10^{-7}$			
Печень	$7.44 \cdot 10^6$	$1.97 \cdot 10^{-6}$			
Мягкие ткани	$6.48 \cdot 10^7$	$1.07 \cdot 10^{-5}$			

В табл. 9 приведены результаты для повседневных производственных условий, принималось, что $A_V = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³, N'_T — число распадов, накопленное в органе или ткани Т за $t = 50$ лет производственной деятельности, E_T — эффективная доза, сформированная в органе или ткани Т за $t = 50$ лет производственной деятельности, $E = \sum_T E_T$ — эффективная доза, сформированная во всех внутренних органах за $t = 50$ лет производственной деятельности, E_O — ожидаемая эффективная доза, сформированная во всех внутренних органах (время производственной деятельности $t = 50$ лет, время формирования дозы после поступления $\tau = 50$ лет), Π_A — поступление по активности за $t = 50$ лет производственной деятельности, $\varepsilon = \frac{E_O}{\Pi_A}$ — дозовый коэффициент.

Табл. 9. Распределение по органам доз, сформированных за 50 лет производственной деятельности, и дозовый коэффициент урана

Орган	N'_T	Эффективная доза E_T (Зв)	Эффективная доза E (Зв) во всех внутр. органах	Ожидаемая эффективная доза E_o (Зв) во всех внутр. органах	Π_A (Бк)	$\varepsilon = \frac{E_o}{\Pi_A}$ (Зв/Бк)
Почки	$1.08 \cdot 10^7$	$1.18 \cdot 10^{-5}$	$6.66 \cdot 10^{-5}$	$7.26 \cdot 10^{-5}$	$1.71 \cdot 10^4$	$4.25 \cdot 10^{-9}$
Пов. трабек. кости	$4.13 \cdot 10^6$	$1.49 \cdot 10^{-5}$				
Объем трабек. кости	$1.18 \cdot 10^8$	$9.68 \cdot 10^{-6}$				
Пов. кортик. кости	$3.35 \cdot 10^6$	$9.53 \cdot 10^{-7}$				
Объем кортик. кости	$3.45 \cdot 10^8$	$3.93 \cdot 10^{-6}$				
Печень	$1.79 \cdot 10^7$	$6.75 \cdot 10^{-6}$				
Мягкие ткани	$1.14 \cdot 10^8$	$1.86 \cdot 10^{-5}$				

Коэффициент ε определен на основании рассчитанных, в рамках камерной модели, величин и следующих фактов.

- Эффективная доза, формирующаяся в организме, не зависит от длительности поступления, а определяется только массой урана, прошедшего в плазму крови, и его удельной активностью.

- Рассчитанного соотношения между массами урана, поступившего в плазму крови за 50 лет производственной деятельности и в аварийной ситуации.
- Соотношения удельных активностей урана, использующегося в производственных условиях и в эксперименте, моделирующем аварийную ситуацию.

Полученные данные приведены в табл. 9. Они сводятся к следующему.

- Ожидаемая эффективная доза при поступлении в течение $t = 50$ лет и при $\tau = 50$ лет в 1.1 раз больше, чем эффективная доза, полученная человеком в течение $t = 50$ лет.
- Дозовый коэффициент для аварийной ситуации, когда дезактивация кожи проводится через 1.5 часа после выброса UF_6 , $\varepsilon = 1.5 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк. Для 50 лет работы в производственных условиях $\varepsilon = 4.25 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк, т. е. в 2.9 раз больше, чем в условиях разового выброса модельного эксперимента.

Расчет дозового коэффициента, проведенный для случая поступления урана в течение $t = 2$ суток, привел к следующему результату: независимо от длительности поступления урана в производственных условиях дозовый коэффициент остается равным $\varepsilon = 4.26 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк.

Сравнивая результаты расчета дозового коэффициента в аварийной ситуации и в повседневных производственных условиях, можно сказать, что в аварийной ситуации величина ε в несколько раз меньше. Это означает, что, меняя время, через которое реализуется дезактивация кожи, можно менять величину дозового коэффициента ε .

Заключение

Модель перкутанного поступления урана и фтора в организм человека, в рамках которой проведен численный расчет величин, характеризующих воздействие этих веществ на человека, позволяет:

1. оценивать величину поступления (массу) в организм человека токсичных веществ при осаждении их на кожу человека.
2. определять доли этих веществ, остающиеся на поверхности кожи, проходящие в кровоток, депонирующиеся в организме и выходящие из него через мочевой пузырь. При этом интегральная модель подробно описывает прохождение токсичных веществ через толщу кожи, а камерная (дифференциальная) модель детально описывает прохождение урана и фтора через отдельные внутренние органы.
3. описывать динамику проникания через кожу токсичных веществ, как в аварийной ситуации, так и в повседневных производственных условиях. Упомянутое описание показывает, что фтор, попадая на поверхность кожи вместе с ураном, гораздо быстрее проходит через поверхность кожи и попадает в организм. Это говорит о том, что процесс смывания токсичного вещества с поверхности кожи водой (дезактивация), которым

заканчивается каждый трудовой день, для фтора менее результативен, чем для урана. Процесс дезактивации особенно важен в аварийной ситуации. Чтобы исключить смертельный исход от фтора, необходимо выйти из аварийного помещения уже через 3 минуты, если выброс гексафторида урана самый экстремальный из всех возможных.

4. сделать вывод, что при высоком уровне выброса гексафторида урана одно только перкутанное поступление гексафторида урана и продуктов его гидролиза в организм человека может привести к летальному исходу.
5. оценивать поступления токсичных веществ в организм человека при различных уровнях аварийного выброса гексафторида урана и в различных рабочих режимах на производстве. Уровень аварийного выброса определяется концентрацией молекул гексафторида урана в момент выброса. Рабочий режим характеризуется объемной активностью урана в составе газов.
6. определять (дифференциальная модель) дозовый коэффициент ε урана при перкутанном поступлении и для аварийной ситуации и для повседневных производственных условий. Знание величины ε позволяет определять эффективную дозу депонированного урана по легко определяемой активности урана, осажденного на поверхность кожи [26].
7. медикам, не теряя времени на забор анализов, выбирать лечебную тактику для пострадавшего, если во время аварии на производстве фиксируется (должна фиксироваться) необходимая для расчетов концентрация UF_6 в момент аварийного выброса и известны экспериментальные данные по величинам поступлений урана и фтора, приводящих к детерминированным (пороговым) и стохастическим (с отдаленными последствиями) эффектам [3, 20, 21, 22, 25, 27].

Список литературы

1. Григорьев Г.Ю., Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш. и др. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF_6 и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК диапазона. М., 2006. (Препринт / ИАЭ; № 6395/12).
2. 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.
3. 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.
4. Галибин Г.П. Распределение урана в организме крыс при ингаляционном введении диураната аммония // Гигиена и санитария. 1967. № 12. С. 40-43.

5. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Математическое описание процессов рождения и оседания продуктов гидролиза газообразного гексафторида урана UF_6 в полупространстве // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2005. № 4 (19). С. 95-105.
6. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М. : Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
7. Fisher D.R., Hui T.E., Yurconic M., Johnson, J.R. Uranium hexafluoride public risk : Technical Report. Letter Report. Health Protection Department Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352, 1994. PNL-10065. DOI: [10.2172/10182632](https://doi.org/10.2172/10182632)
8. Leggett R.W., Pellmar N.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 64, no. 2-3. P. 205-225. DOI: [10.1016/S0265-931X\(02\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00050-4)
9. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Определение агрегатного состояния продуктов гидролиза гексафторида урана, оседающих на кожу человека при аварийном выбросе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 3 (46). С. 115-125.
10. 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.
11. Гусев Н.Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите / под ред. У.Я. Маргулиса. М.: Медгиз, 1956. 126 с.
12. СП 2.6.1.758- 99. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Гигиенические нормативы. М.: Минздрав России, 1999. 116 с.
13. 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.
14. Гастева Г.Н., Мордашева В.В., Гуськова А.К. и др. Работа с соединениями урана // Руководство по организации медицинского обслуживания лиц, подвергшихся действию ионизирующего излучения / под ред. акад. АМН СССР Л. А. Ильина. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 90-107.

On percutaneous injection of toxic substances into the human organism from the workplace atmosphere

01, January 2014

DOI: 10.7463/0114.0671133

Babenko S.P.¹, Bad'in A.V.²

¹ Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

² MSU, Moscow, Russian Federation

babenkosvetlana@mail.ru

badyin@phys.msu.ru

This article describes theoretical research methods of percutaneous injection of uranium hexafluoride and its hydrolysis products into the human organism. Integral and differential models were considered. Capabilities of each model were described. Results on the settling of uranium and fluorine onto the skin surface, on the deposition of those substances in the organism in emergency situation and under regular industry conditions were obtained using both specified models and presented in this paper. The distribution of uranium over separate organs was also presented. It was shown that under certain operating conditions at the place of production, accumulation of uranium in the kidneys exceeds critical value that leads to their disease. The importance of obtained results for solving the matters of protection of employees from occupational diseases and medical assistance to those in emergency situation was demonstrated.

Publications with keywords: [mathematical model](#), [uranium hexafluoride](#), [toxic matters](#), [fluorine](#), [uranium](#), [percutaneous injection](#)

Publications with words: [mathematical model](#), [uranium hexafluoride](#), [toxic matters](#), [fluorine](#), [uranium](#), [percutaneous injection](#)

References

1. Grigor'ev G.Yu., Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., et al. *Ekspress-metody izmereniya stepeni obogashcheniya geksافتorida urana i sledovykh kolichestv UF6 i NF 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.

2. Babenko S.P. *Prognozirovanie radiatsionnogo i toksicheskogo vozdeystviya vybrosov geksافتorida 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.
3. Mirkhaydarov A.Kh. *Issledovanie zakonornostey zagryazneniya vozdushnoy 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.
4. Galibin G.P. *Raspredelenie urana v organizme krysa pri ingyalyatsionnom vvedenii diuranata ammoniya* [Distribution of uranium in the rats body at inhalation introduction of ammonium diuranate]. *Gigiena i sanitariya*, 1967, no. 12, pp. 40-43.
5. Babenko S.P., Bad'in A.V. *Matematicheskoe opisanie protsessov rozhdeniya i osedaniya produktov gidroliza gazoobraznogo geksافتorida urana v poluprostranstve* [Mathematical description of birth and deposition processes for products of hydrolysis of gaseous uranium hexafluoride UF₆ in semi-space]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2005, no. 4 (19), pp. 95-105.
6. Osanov D.P. *Dozimetriya i radiatsionnaya biofizika kozhi* [Dosimetry and radiation biophysics of skin]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 152 p.
7. Fisher D.R., Hui T.E., Yurconic M., Johnson J.R. *Uranium hexafluoride public risk : Technical Report*. Letter Report. Health Protection Department Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352, 1994. PNL-10065. DOI: [10.2172/10182632](https://doi.org/10.2172/10182632)
8. Leggett R.W., Pellmar N.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, vol. 64, no. 2-3, pp. 205-225. DOI: [10.1016/S0265-931X\(02\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00050-4)
9. Babenko S.P., Bad'in A.V. *Opredelenie agregatnogo sostoyaniya produktov gidroliza geksافتorida urana, osedayushchikh na kozhu cheloveka pri avariynom vybrose* [Determination of state of matter of hydrolysis products of uranium hexafluoride falling on human skin with emergency discharge]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2012, no. 3 (46), pp. 115-125.
10. 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.
11. Gusev N.G. *Spravochnik po radioaktivnym izlucheniyam i zashchite* [Handbook of radioactive radiation and protection]. Moscow, Medgiz, 1956. 126 p.
12. *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.

13. Babenko S.P. O raschete effektivnykh doz, poluchaemykh chelovekom pri percutannom postuplenii urana vo vremya avariynoy situatsii na proizvodstvakh, rabotayushchikh s geksafторidom 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.

14. Gasteва G.N., Mordasheva V.V., Gus'kova A.K., et al. Rabota s soedineniyami urana [Working with uranium compounds]. In: Il'in L.A., ed. *Rukovodstvo po organizatsii meditsinskogo obsluzhivaniya lits, podvergshikhsya deystviyu ioniziruyushchego izlucheniya* [Guidance on the organization of medical care of persons exposed to ionizing radiation]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, pp. 90-107.