

Количественная оценка токсического воздействия фтора на человека при работе с гексафторидом урана

11, ноябрь 2013

DOI: 10.7463/1113.0656704

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

babenkosp@mtu-net.ru

badyin@phys.msu.ru

Введение

Газообразный гексафторид урана (ГФУ, UF_6) — основное рабочее вещество в технологиях обогащения природного урана изотопом ^{235}U . Гексафторид урана и продукты его гидролиза, образующиеся в воздухе рабочего помещения при аварийных и производственных выходах UF_6 , оказывают радиологическое и токсическое воздействие на организм человека. Это связано с появлением в воздухе рабочего помещения газов и аэрозолей, являющихся носителями урана и фтора. В связи с этим возникло повышенное внимание к изучению атмосферы рабочих помещений, в которых используется гексафторид урана, и ее влияния на организм человека. В работе [1] описан эксперимент по искусственному загрязнению атмосферы на предприятии атомной энергетики и измерению некоторых параметров, характеризующих это загрязнение. Работники предприятий и исследовательские группы набирают статистику по состоянию здоровья производственных рабочих, разрабатывают методы их медицинского обследования и медицинской помощи пострадавшим [2].

Кроме того, проводятся теоретические исследования воздействия загрязненной атмосферы рабочего помещения на человека, проникновения токсичных веществ в организм [3, 4, 5]. Автором настоящей статьи были предложены и разработаны [6] методы теоретического расчета характера загрязнения атмосферы рабочего помещения и оседания токсичных веществ на производственные поверхности и кожу человека. Результаты расчетов

по этим методам в совокупности с уже имеющимися моделями, откорректированными экспериментальными данными [1], позволили теоретически связать дозу конкретного вещества, полученную человеком, с условиями работы. Подробно эти разработки изложены в серии статей [7—10].

В настоящей статье впервые одновременно приводятся результаты расчетов поступлений фтора в организм человека при всех основных наборах физических условий, позволяющие оценить влияние гексафторида урана при основных ситуациях, которые могут возникать на предприятии.

1 Методы исследования

Проведенное исследование основано на методах математического моделирования. Для расчетов использовалась комплексная модель, описывающая все процессы воздействия производственной среды на человека, от образования в воздухе рабочего помещения частиц, являющихся носителями фтора, до проникновения их в организм человека.

Комплексная модель состоит из 3-х моделей, каждая из которых описывает определенный этап указанного воздействия. Первая модель описывает процессы загрязнения производственной среды, вторая — процессы ингаляционного поступления и третья — процессы перкутанного поступления токсичного вещества в организм человека.

Верификация теоретических моделей проводилась путем сопоставления некоторых рассчитанных результатов с соответствующими экспериментальными результатами, полученными в работе [1].

Гексафторид урана — газообразное вещество. Появляясь в объеме рабочего помещения, ГФУ взаимодействует с влагой воздуха. В результате этого взаимодействия в воздухе появляются молекулы UO_2F_2 и HF . Склонные к нуклеации, они образуют аэрозольные частицы. Газы UF_6 , UOF_4 , UO_2F_2 , HF и аэрозоли UO_2F_2 , HF загрязняют воздух рабочего помещения.

Расчет загрязнения воздуха рабочего помещения и оседания токсичных веществ на производственные поверхности и на кожу человека проводился в рамках некоторых упрощающих предположений относительно начального распределения частиц в пространстве и условий их оседания, позволяющих аналитически решить уравнения непрерывности для газов и аэрозолей. При записи уравнений учитывалось, что система аэрозолей полидисперсная и описывается найденной в работах [7, 8] логарифмически нормальной функцией распределения их размеров. Учитывалось влияние на концентрацию

частиц в воздухе технического воздухообмена в производственных помещениях. Упомянутые уравнения непрерывности имеют следующий вид. Для газов:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k = D_k \Delta n_k - (\vec{v}_k, \text{grad}(n_k)) + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m + F_k(\vec{x}, t), \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q, \quad t \in (0, +\infty);$$

$$n_k(\vec{x}, 0) = n_{k,0}(\vec{x}), \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q;$$

$$n_k(\vec{x}, t) = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (0, +\infty).$$

Здесь: N — число интересующих нас веществ в составе газов; $n_k(\vec{x}, t)$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке $\vec{x}$ в момент времени t ; D_k — коэффициент диффузии молекул вещества с номером k ; $\vec{v}_k$ — скорость дрейфа молекул вещества с номером k ; $\{a_{k,m}\}_{m=\overline{1, N}}^{k=\overline{1, N}}$ — коэффициенты, описывающие процессы гидролиза, нуклеации и воздухообмена; $F_k(\vec{x}, t)$ — плотность мощности внешних источников молекул вещества с номером k в точке $\vec{x}$ в момент времени t ; $n_{k,0}(\vec{x})$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке $\vec{x}$ в нулевой момент времени.

Для аэрозолей:

$$\frac{\partial}{\partial t} n' = D(r) \Delta n' - (\vec{v}(r), \text{grad}(n')) - K n' + g(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m(\vec{x}, t), \quad \vec{x} \in Q, \quad t \in (0, +\infty);$$

$$n'(r, \vec{x}, 0) = 0, \quad \vec{x} \in Q;$$

$$n'(r, \vec{x}, t) = 0, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (0, +\infty).$$

Здесь: r — радиус аэрозольных частиц (эта величина входит в рассматриваемую систему как параметр); $n'(r, \vec{x}, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r в точке $\vec{x}$ в момент времени t ; $D(r)$ — коэффициент диффузии аэрозольных частиц радиуса r ; $v(r)$ — скорость дрейфа аэрозольных частиц радиуса r ; K — кратность воздухообмена; $g(r)$ — плотность вероятности того, что в процессе нуклеации атом токсичного вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса r (g — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации); $b_1, \dots, b_N$ — коэффициенты, описывающие процесс нуклеации.

Решение этих уравнений позволяет найти выражения для концентраций атомов урана и фтора $n_U(\vec{x}, t)$, $n_F(\vec{x}, t)$ и плотностей их потоков $\vec{j}_U(\vec{x}, t)$, $\vec{j}_F(\vec{x}, t)$.

В данной статье приведены результаты решения вышеописанных уравнений для фтора в следующих ситуациях.

1. Аварийный выброс газообразного гексафторида урана в воздух рабочего помещения.
2. Технологические выходы гексафторида урана в воздух рабочего помещения в условиях повседневной производственной деятельности.

Для каждого из этих способов загрязнения рабочего помещения рассмотрены два способа поступления фтора в организм человека.

1. Путем оседания молекул газов на поверхность кожи человека и частичного проникновения фтора внутрь его организма (перкутанное поступление). Механизм этого проникновения и коэффициенты прохождения описаны и определены в работе [9].
2. Путем вдыхания воздуха с газообразными и аэрозольными носителями фтора (ингаляционное поступление).

2 Результаты расчета дозы по фтору, получаемой человеком в аварийной ситуации

Результаты расчетов для аварийных ситуаций приведены в табл. 1—табл. 3. В табл. 1 приведены данные, позволяющие провести количественное сравнение перкутанного и ингаляционного поступлений фтора в организм человека в динамике.

Табл. 1. Масса фтора, поступившего в организм к моменту времени t

Масса фтора, поступившего в организм к моменту времени t : перкутанно с газами, $m_{п.г.}$; ингаляционно с газами, $m_{и.г.}$; ингаляционно с аэрозолями, $m_{и.а.}$; ингаляционно с газами и аэрозолями, $m_{и.с.}$. $n_{UF_6,0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Интегральная модель					
t	Перкутанное поступление, $m_{п.г.}$ (мг)	Ингаляционное поступление			$\frac{m_{и.с.}}{m_{п.г.}}$
		$m_{и.г.}$ (мг)	$m_{и.а.}$ (мг), $\xi_a = 0.34$	$m_{и.с.}$ (мг)	
10 с	$3.38 \cdot 10^{-3}$	0.49	$3.4 \cdot 10^{-3}$	0.49	144.97
20 с	$1.03 \cdot 10^{-2}$	0.92	$1.91 \cdot 10^{-2}$	0.94	91.26
1 мин	$5.64 \cdot 10^{-2}$	2.34	$2.17 \cdot 10^{-1}$	2.56	45.39
5 мин	$4.75 \cdot 10^{-1}$	4.37	3.56	7.93	16.69
10 мин	$9.88 \cdot 10^{-1}$	4.45	8.42	12.87	13.02
20 мин	1.88	4.45	17.51	22	11.7
30 мин	2.6	4.45	25.8	30.25	11.63

Видно, что ингаляционное поступление фтора в организм человека преобладает над перкутанным. Со временем это преобладание уменьшается. Следует заметить, что перкутанное поступление фтора обеспечивается только газами [10], а ингаляционное — и газами и аэрозолями, коэффициент прохождения которых через дыхательную систему $\xi_a = 0.34$ [6].

Значения масс поступающего фтора, при рассматриваемом уровне выброса ГФУ (он определяется концентрацией молекул UF_6 в воздухе рабочего помещения в момент выброса), при обоих способах поступления не превышают величины $m \approx 330$ мг, которая считается [2] смертельной дозой разового поступления для человека.

В табл. 2 приведены расчетные данные, соответствующие предельно высокой концентрации молекул UF_6 в воздухе рабочего помещения в момент выброса, для перкутанного и ингаляционного поступлений фтора. Предельно высокая концентрация $n_{UF_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ соответствует ситуации, когда гексафторид урана в объеме рабочего помещения оказывается в насыщенном состоянии.

Табл. 2. Масса фтора, поступившего в организм к моменту времени $t = 10$ мин

Масса фтора, поступившего к моменту времени $t = 10$ мин : перкутанно с газами внутрь организма, $m_{п.г.о.}$; ингаляционно с газами и аэрозолями внутрь организма, $m_{и.с.}$. $n_{UF_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Интегральная модель	
Перкутанное поступление, $m_{п.г.о.}$ (мг)	Ингаляционное поступление, $m_{и.с.}$ (мг) , $\xi_a = 0.34$
$3.26 \cdot 10^3$	$4.25 \cdot 10^4$

Как видно, одно только перкутанное поступление уже через десять минут после экстремального аварийного выброса приводит к получению дозы на порядок большей, чем смертельная. Следует заметить, что защита от ингаляционного поступления на производствах разработана лучше и легче реализуется. Поэтому вполне возможна такая ситуация, когда угрозу для жизни или здоровья составит именно фтор, поступивший перкутанно. Поэтому процесс перкутанного поступления фтора в организм со временем был рассчитан более детально.

В табл. 3 приведены результаты расчета, показывающие динамику не только поступления фтора в организм, но и оседания его на кожу, а также загрязнения атмосферы рабочего помещения (концентрации атомов фтора в воздухе на уровне головы человека). Приведены два случая. В одном из них пребывание человека в аварийной ситуации длилось 3 мин, а во втором — 10 час.

Табл. 3 Временная зависимость загрязнения фтором атмосферы рабочего помещения, а также поступления фтора на поверхность кожи и внутрь организма

Концентрация атомов фтора в воздухе в момент времени t в составе газов, n . $n_{\text{UF}_6,0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$					
t (мин)	n (м^{-3})	Время пребывания в аварийной зоне $t_0 = 3$ мин, m (мг) с газами		Время пребывания в аварийной зоне $t_0 = 10$ час, m (мг) с газами	
		осевшая на кожу	проникшая через кожу	осевшая на кожу	проникшая через кожу
1	$2.23 \cdot 10^{21}$	4.3	0.06	4.3	0.06
2	$1.03 \cdot 10^{21}$	5.35	0.15	5.35	0.15
3	$4.55 \cdot 10^{20}$	5.72	0.26	5.72	0.26
5	$8.68 \cdot 10^{19}$	5.72	0.48	5.9	4.9
10	$1.36 \cdot 10^{18}$	5.72	0.96	5.93	0.99
15	$2.12 \cdot 10^{16}$	5.72	1.41	5.93	1.45
20	$3.31 \cdot 10^{14}$	5.72	1.82	5.93	1.88
30	$8.08 \cdot 10^{10}$	5.72	2.52	5.93	2.6
300	0	5.72	5.7	5.93	5.91

Видно, что при рассматриваемом уровне выброса ГФУ максимальная масса фтора, осевшего на кожу человека с газами, $m_{\text{max}} \approx 5.93$ мг. Через 1, 3 и 5 мин на кожу оседает 72.5 %, 96.4 % и 99.5 % этого максимального значения, соответственно. Увеличение времени пребывания в аварийном помещении от трех минут до десяти часов, приводит к увеличению поступления фтора на кожу всего в 1.04 раз. Казалось бы, после 3-х минут пребывания человека в аварийной ситуации, опасность нанесения вреда здоровью остается неизменной. Однако ситуация меняется из-за возможности дезактивации фтора на кожных покровах. Метод дезактивации был разработан сотрудниками Института биофизики Министерства здравоохранения (ИБФ МЗ) [2] и заключается в том, что по выходе из рабочего помещения человек срочно принимает водяную ванну и, тем самым, дезактивирует ту часть попавшего на кожу фтора, которая еще не успела проникнуть внутрь организма. В табл. 3 приведены значения массы фтора, поступившего в организм к моменту времени t . Видно, что эта величина быстро растет с течением времени. Поэтому для пострадавшего очень важно как можно быстрее выйти из рабочего помещения, чтобы обеспечить малость временного промежутка от выброса до дезактивации кожи. Особенно это важно для случая экстремального выброса гексафторида урана, когда его начальная концентрация $n_{\text{UF}_6,0} = 3.3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и даже трехминутный промежуток времени от выброса до выхода из

аварийного помещения приводит к поступлению в организм фтора в количестве $m = 856$ мг. Это значительно больше той массы $m \approx 330$ мг, которая может привести к летальному исходу [2]. Поэтому, промежуток времени $t = 0 \div 3$ мин, от выброса до выхода из аварийного помещения и немедленной дезактивации кожи, является, для самых крупных аварий, критическим в вопросе сохранения жизни человека.

3 Результаты расчета дозы по фтору, получаемой человеком в повседневных производственных условиях

В табл. 4—табл. 7 приведены результаты расчета поступления фтора в организм человека в условиях повседневной производственной деятельности. При расчете считалось, что после каждого рабочего дня проводится дезактивация кожи. В табл. 4 приведены расчетные данные по накоплению фтора в организме за 1 год производственной деятельности.

Табл. 4 Зависимость массы депонированного фтора от кратности воздухообмена

Масса депонированного фтора за счёт: перкутанного поступления с газами, $m_{п.г.}$; ингаляционного поступления с газами, $m_{и.г.}$; ингаляционного поступления с аэрозолями, $m_{и.а.}$; ингаляционного поступления с газами и аэрозолями, $m_{и.с.}$. $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк / м ³ . Интегральная модель					
Кратность воздухообмена K (час ⁻¹)	$m_{п.г.}$ (мг)	$m_{и.г.}$ (мг)	$m_{и.а.}$ (мг), $\xi_a = 0.28$	$m_{и.с.}$ (мг)	$\frac{m_{и.с.}}{m_{п.г.}}$
0	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
3	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.29 \cdot 10^{-2}$	0.04	0.05	4.55

Кратность воздухообмена — это характеристика скорости замены загрязненного воздуха рабочего помещения атмосферным. Величина $K = 3$ час⁻¹ соответствует самой малой скорости обмена воздуха, которая включена во всех помещениях предприятия за исключением тех, в которых, по типу работы, требуется более интенсивная очистка воздуха. Как видно, включение воздухообмена заметно уменьшает поступление токсичных веществ в организм человека.

В последнем столбце табл. 4 приведено отношение массы суммарного (с газами и с аэрозолями) ингаляционного поступления к массе перкутанного (с газами) поступления. Полученный результат сводится к следующему. В отсутствии воздухообмена, через год после начала трудовой деятельности человека, накопление фтора за счет ингаляционного

поступления примерно в 70 раз превышает накопление фтора за счет перкутанного поступления. При этом аэрозольное ингаляционное накопление существенно преобладает над газовым ингаляционным накоплением.

По данным табл. 5 видно, что соотношение между депонированными количествами фтора за счет ингаляционного и перкутанного поступлений со временем практически не меняется.

Табл. 5 Динамика соотношения между депонированием фтора в организме человека при перкутанном и ингаляционном поступлениях

Масса депонированного фтора за счёт: перкутанного поступления с газами, $m_{п.г.}$; ингаляционного поступления с газами, $m_{и.г.}$; ингаляционного поступления с аэрозолями, $m_{и.а.}$; ингаляционного поступления с газами и аэрозолями, $m_{и.с.}$. $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк / м ³ , $K = 0$ (час ⁻¹). Интегральная модель					
t (сут)	$m_{п.г.}$ (мг)	$m_{и.г.}$ (мг)	$m_{и.а.}$ (мг)	$m_{и.с.}$ (мг)	$\frac{m_{и.с.}}{m_{п.г.}}$
1	$2.68 \cdot 10^{-3}$	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-1}$	$1.63 \cdot 10^{-1}$	60.82
10	$1 \cdot 10^{-2}$	$1.19 \cdot 10^{-2}$	0.71	0.72	72
30	$1.13 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	72.57
50	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
100	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
365	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
2·280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
3·280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
4·280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
5·280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
50·280	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93
50·365	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	0.81	0.82	71.93

Общее заключение относительно роли перкутанного и ингаляционного поступлений можно сформулировать так. И в аварийной ситуации и в повседневных производственных условиях ингаляционное поступление существенно больше перкутанного. Однако, как показывают расчеты, не учитывать перкутанное поступление в некоторых ситуациях недопустимо.

Опыт наблюдения за людьми, работающими с гексафторидом урана, показал, что большое значение для состояния здоровья человека имеет не только количество фтора,

депонированного в организме в данный момент времени, но и полное количество фтора, прошедшего через организм на рассматриваемом промежутке времени. Поэтому в табл. 6 приведены расчетные данные по количеству фтора, выводимого из организма с суточной мочой.

Табл. 6 Относительный вклад перкутанного и ингаляционного поступлений в количество фтора, выводимого из организма с суточной мочой

Расчетные значения массы (средней по всем дням года) фтора в суточной моче за счет: перкутанного поступления с газами, $m_{п.г.}$; ингаляционного поступления с газами, $m_{и.г.}$; ингаляционного поступления с аэрозолями, $m_{и.а.}$; ингаляционного поступления с газами и аэрозолями, $m_{и.с.}$. $A_v = 3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк / м³. Интегральная модель					
Кратность воздухообмена K (час ⁻¹)	$m_{п.г.}$ (мг)	$m_{и.г.}$ (мг)	$m_{и.а.}$ (мг)	$m_{и.с.}$ (мг)	$\frac{m_{и.с.}}{m_{п.г.}}$
За первые сутки					
0	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$9.85 \cdot 10^{-4}$	$5.82 \cdot 10^{-2}$	$5.92 \cdot 10^{-2}$	37.23
3	$1.53 \cdot 10^{-3}$	$9.25 \cdot 10^{-4}$	$2.94 \cdot 10^{-3}$	$3.87 \cdot 10^{-3}$	2.53
Средняя за все трудовые сутки					
0	$4.27 \cdot 10^{-3}$	$3.73 \cdot 10^{-3}$	$2.21 \cdot 10^{-1}$	$2.25 \cdot 10^{-1}$	52.69
3	$4.27 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$1.12 \cdot 10^{-2}$	$1.48 \cdot 10^{-2}$	3.47
За последние сутки					
0	$4.27 \cdot 10^{-3}$	$3.73 \cdot 10^{-3}$	$2.21 \cdot 10^{-1}$	$2.25 \cdot 10^{-1}$	52.69
3	$4.27 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$1.12 \cdot 10^{-2}$	$1.48 \cdot 10^{-2}$	3.47

Сложение количества фтора, депонированного в организме, с количеством фтора, выведенного из организма, образует то количество фтора, которое прошло через организм на рассматриваемом промежутке времени.

Видно, что вывод фтора за счет ингаляционного поступления в отсутствие воздухообмена приблизительно в 50 раз больше, чем за счет перкутанного поступления.

В табл. 7 приведены данные по накоплению в организме и выводу из него фтора за 50 лет (максимально возможный срок) производственной деятельности.

Табл. 7 Масса депонированного в организме и выведенного из него фтора за всю производственную деятельность (50 лет) в режиме $A_v = 7.4 \text{ Бк} / \text{м}^3$

Масса депонированного фтора за счёт: перкутанного поступления с газами, $m_{п.г.}$; ингаляционного поступления с газами и аэрозолями, $m_{и.с.}$. Масса выведенного из организма фтора за счёт: перкутанного поступления с газами, $m_{п.г.выв.}$; ингаляционного поступления с газами и аэрозолями, $m_{и.с.выв.}$. $A_v = 7.4 \text{ Бк} / \text{м}^3$, $\xi_a = 0.28$ [6]. Интегральная модель					
Кратность воздухообмена $K (\text{час}^{-1})$	$m_{п.г.} (\text{г})$	$m_{п.г.выв.} (\text{г})$	$m_{и.с.} (\text{г})$	$m_{и.с.выв.} (\text{г})$	Масса фтора предельно допустимая для прохождения через организм за 50 лет, $m (\text{г})$
0	$2.28 \cdot 10^{-3}$	15.6	0.58	1988	50 [2]
3	$2.2 \cdot 10^{-3}$	15	$2.94 \cdot 10^{-2}$	376	

Режим $A_v = 7.4 \text{ Бк} / \text{м}^3$, для которого приведены данные, является самым жестким из использующихся на производстве.

В работе [2] показано (экспериментальные данные), что необратимые изменения в организме из-за прохождения через него фтора, начинаются со значения прошедшей массы $m = 50 \text{ г}$.

Видно, что в рассмотренном режиме за весь максимальный производственный стаж работы одно перкутанное поступление приводит к прохождению через организм количества фтора, приближающегося к предельному. Ингаляционное же поступление обеспечивает превышение этого предельного значения в несколько раз. Естественный вывод из сказанного заключается в следующем. В использующемся на предприятиях режиме, в котором объемная плотность активности урана в составе газов $A_v = 7.4 \text{ Бк} / \text{м}^3$, нельзя работать в течение длительного времени.

Заключение

Из результатов расчета, проведенного по построенной модели, следует.

1. Ингаляционное поступление более значимо по депонированию фтора в организме, чем перкутанное.

2. В условиях экстремального выброса гексафторида урана одно только перкутанное поступление фтора может привести к летальному исходу уже при нахождении человека в аварийной ситуации в течение 3-х минут.
3. Немедленная дезактивация кожи человека после выхода из аварийного помещения, при некоторых уровнях выброса гексафторида урана, является вопросом жизни и смерти, даже при обеспечении хорошей защиты от ингаляционного поступления фтора.
4. Работа в условиях самого жесткого производственного режима в течение всей производственной деятельности не допустима, т. к. при этом ингаляционное поступление превышает допустимый транзит фтора через организм. Этот результат имеет место даже при обеспечении дезактивации кожи человека после окончания каждого рабочего дня.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
4. 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.
5. Рекомендации МКРЗ 1990 года. Публикация 60. Ч. 2. Радиационная безопасность: пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1994. 208 с. ISBN 5-283-031-62-4.
6. 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.
7. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранилфторида // Атомная энергия. 2005. Т. 99, № 5. С. 353-358.
8. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Дисперсность аэрозолей при аварийном выбросе гексафторида урана // Атомная энергия. 2007. Т. 103, № 3. С. 198-200.

9. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Бадьин В.И. Оценка загрязненности токсичными веществами рабочих помещений на производствах, использующих гексафторид урана // Известия Академии Промышленной Экологии. 2004. № 1. С. 79-88.
10. 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.

Quantitative estimation of fluorine's toxic effects on human health when dealing with uranium hexafluoride

11, November 2013

DOI: 10.7463/1113.0656704

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

In this paper the authors consider how the impact of work chamber atmosphere at a nuclear industry enterprise where uranium hexafluoride is used affects the human body. History of studies in this field was briefly described, and the place of current investigations in these studies was indicated. This work deals with a model for calculating deposition of fluorine in the human body. In this paper quantitative relationship between concentration of uranium hexafluoride molecules in the air of a factory shop and the mass of fluorine deposited in the human body was obtained on the basis of mathematical simulation methods. A technique for determining the specified relationship was presented. Calculations were performed within the framework of a model which describes pollution of a work chamber atmosphere and penetration of toxic substances into the human body. This paper presents results for two injection methods — percutaneous (through the skin) and inhalation (through the respiratory system), and for two modes of air pollution — emergency release and technological outputs under conditions of daily industrial activity. The calculated injections were compared with experimental data; such injections lead to irreversible changes in the human body. Conclusions on possible medical care for victims were drawn.

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

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

References

1. 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]. Moscow, 1978. 217 p.
2. 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.
3. Osanov D.P. *Dozimetriya i radiatsionnaya biofizika kozhi* [Dosimetry and radiation biophysics of skin]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 152 p.
4. ICRP. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 3). *Ann. ICRP*, 1981, vol. 6, no. 2-3.
5. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, 1991, vol. 21, no. 1-3.
6. Babenko S.P. *Prognozirovanie radiatsionnogo i toksicheskogo vozdeystviya vybrosov geksaftorida 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.
7. Babenko S.P., Bad'in A.V. Metody opredeleniya funktsii raspredeleniya radiusa aerazol'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, iss. 5, pp. 787-791. DOI: 10.1007/s10512-006-0017-4).
8. Babenko S.P., Bad'in A.V. Dispersnost' aerazoley pri avariynom vybrose geksaftorida urana [Dispersity of aerosols accompanying an accidental discharge of uranium hexafluoride]. *Atomnaya energiya*, 2007, vol. 103, no. 3, pp. 198-200. (English Translation: *Atomic Energy*, 2007, vol. 103, iss. 3, pp.731-735/ DOI: 10.1007/s10512-007-0116-x).
9. Babenko S.P., Bad'in A.V., Bad'in V.I. Otsenka zagryaznennosti toksichnymi veshchestvami rabochikh pomeshcheniy na proizvodstvakh, ispol'zuyushchikh geksaftorid urana [Assessment of contamination by toxic substances of working premises on productions that use uranium hexafluoride]. *Izvestiya Akademii Promyshlennoy Ekologii*, 2004, no. 1, pp. 79-88.
10. Babenko S.P., Bad'in A.V. Opredelenie agregatnogo sostoyaniya produktov gidroliza geksaftorida 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. Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science], 2012, no. 3 (46), pp. 115-125.