

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2020. № 01. С. 31–42

DOI: [10.36027/rdeng.0120.0000161](https://doi.org/10.36027/rdeng.0120.0000161)

Представлена в редакцию: 26.12.2019

© Бабенко С.П., Бадьин А.В.

УДК 51-74, 51-76, 614.876, 614.878

Рекомендации по выбору модели, описывающей воздействие на человека гексафторида урана

Бабенко С.П.¹, Бадьин А.В.^{2,*}

[*badyin@phys.msu.ru](mailto:badyin@phys.msu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье рассматриваются вопросы защиты человека от негативного (химического и радиационного) воздействия гексафторида урана, используемого на обогатительных предприятиях атомной промышленности. Приведены результаты расчета таких параметров поступления урана в организм, как масса урана, депонированного в организме, и накопленное число распадов к заданному моменту времени. Рассмотрено перкутанное (через кожные покровы) поступление в условиях аварийной ситуации и в обычном рабочем режиме. Описаны две модели, позволяющие провести расчет. Проведено сравнение полученных результатов и описаны условия, в которых предпочтительнее каждая из моделей.

Ключевые слова: гексафторид урана, продукты гидролиза гексафторида урана, уран, фтор, математическая модель, перкутанное поступление

Введение

Известно, что газообразный гексафторид урана (ГФУ, UF_6) используется в процессе обогащения природного урана изотопом ^{235}U и создает проблемы при решении вопросов обеспечения безопасности труда на производствах атомной промышленности [1, 2]. Это связано с тем, что ГФУ, попадая в воздух рабочего помещения, порождает в его объеме целый ряд газов и аэрозолей, молекулы которых содержат атомы урана и фтора (токсичных веществ). Через кожу человека (перкутанно) и через дыхательную систему (ингаляционно) они попадают в организм.

К задачам обеспечения безопасности труда на производстве относятся: контроль загрязнения среды и поступления вещества в организм, предсказание последствий воздействия на человека рассматриваемого вещества, выбор способа оказания медицинской помощи. Решение таких задач нуждается в количественном описании указанных процессов. Традиционно оно реализуется экспериментальными методами. Однако такие методы не очень продуктивны в аварийных ситуациях, когда необходимо быстрое решение медицин-

ских проблем. Поэтому первые же серьезные аварии навели на мысль о необходимости теоретических расчетов различных этапов поступления гексафторида урана от источника (производственные емкости) до внутренних органов и естественного выхода из организма. Подробнее всего такие исследования описаны в публикациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [3, 4, 5, 6, 7], основанной в 1928 году на втором Международном Конгрессе по радиологии в Стокгольме. Они основаны на разработанных моделях ингаляционного поступления и математических моделях метаболизма. Авторы настоящей статьи тоже приняли участие в решении этих проблем. Ими была предложена модель для расчета поступления урана и фтора в организм человека на всем этапе от источника до состояния депонирования в организме и выхода из него при ингаляционном и перкутанном поступлениях. В настоящей статье речь пойдет о прохождении урана в организм через кожные покровы. Для расчета количества урана, поступившего в организм перкутанно, были построены две модели поступления урана от источника ГФУ до выхода из организма. Эти модели одинаковы на этапах перемещения от источника UF_6 до кожных покровов человека, прохождения через толщу кожи [8, 9], частичного депонирования в ней и выхода из кожи в организм [10].

При построении таких моделей учитывались описанные в литературе процессы гидролиза гексафторида урана, образования из продуктов гидролиза аэрозольных частиц. Для всех частиц записывались уравнения диффузии, описывающие их движение в объеме производственного помещения. Функция распределения радиусов аэрозольных частиц, необходимая для расчета (удельной) концентрации молекул рассматриваемого вещества, рассчитывалась авторами настоящей работы на основе данных, полученных сотрудниками ФМБЦ им. А. И. Бурназяна (Института биофизики МЗ СССР) в эксперименте, моделирующем аварийную ситуацию по выбросу ГФУ в производственном помещении [11]. Было получено, что распределение аэрозольных частиц хорошо описывается логарифмически нормальным законом [10]. Рассчитанная (удельная) концентрация позволила найти плотность потока атомов урана, и, в конечном счете, вычислить массу урана, осевшего на кожный покров человека.

Сравнение рассчитанных таким образом данных с данными, полученными сотрудниками ФМБЦ им. А. И. Бурназяна по загрязнению одежды человека и стеклянных пластин на поверхности пола, позволило заключить, что перкутанное поступление урана в организм определяется только газообразными продуктами гидролиза гексафторида урана. Соответственно, модель перкутанного поступления строилась на этом предположении.

Далее по первой модели (названной интегральной) весь организм человека делился на три раздела: барьерный орган (кожу), все внутренние органы и, отдельно, мочевой пузырь. При этом считалось, что уран, прошедший в последний раздел, уже вышел из обменного процесса и как бы покинул организм. Такое разделение представляло собой последний этап построенной нами общей модели для расчета негативного воздействия на организм в рассматриваемых условиях.

По второй модели [12] (названной дифференциальной) масса урана, прошедшая через границу между кожей и внутренними органами, распределялась по отдельным органам по законам внутреннего метаболизма. Такое разделение было принято в соответствии с работами [3, 4, 5, 6, 7]. Различие между нашей работой и указанными работами заключается в том, что у них исследуемое вещество вводилось в организм разовой инъекцией, а у нас этот процесс был непрерывным и длился до тех пор, пока вещество поступало на поверхность кожи [12].

1. Материал и методы

Очевидно, что если необходимо выяснить нагрузку ураном отдельных органов, то для расчета нужно использовать дифференциальную модель. Однако есть положительные моменты и у интегральной модели. Окончательное заключение об угрозе здоровью человека делают медики. В большинстве исследований выбор способа оказания медицинской помощи основывается на экспериментальном определении связи количества вещества, проникшего в организм, и вызванного им изменения общего состояния человека [13]. Поэтому представляет интерес сравнить массы урана, находящегося в организме в интересующий нас момент времени (и массы урана, вышедшего к этому моменту из организма), полученные в рамках двух моделей и сделать заключение относительно ситуаций, в которых нужно использовать ту или иную модель. Именно такой работе посвящена настоящая статья.

Расчет проводился для двух режимов:

- 1) для **аварийной ситуации**, заключающейся в разовом выбросе гексафторида урана в объем рабочего помещения (предполагается, что выброс ГФУ произошёл в нулевой момент времени);
- 2) для **каждодневного производственного режима**, реализуемого на предприятиях по обогащению природного урана изотопом ^{235}U (предполагается, что начало производственной деятельности сотрудника приходится на нулевой момент времени).

Рассматривалось перкутанное поступление урана в организм. Рассчитывалась масса урана, поступившего (пройдя через барьерный орган, т. е. через кожу) внутрь организма к моменту времени t . Далее рассчитывалась масса урана, которая выделилась из этой прошедшей и к моменту времени t осталась в организме, а также масса урана, вышедшая к упомянутому моменту из организма. Кроме того рассчитывалось число Q α -распадов, произошедших за время t в инкорпорированном (накопленном в организме) уране. Рассматривалась временная динамика этих поступлений и распределений.

В табл. 1 и 2 приведены данные для аварийной ситуации, повторяющей условия модельного эксперимента [11]. Они соответствуют той интенсивности выброса, при которой концентрация молекул гексафторида урана в объеме рабочего помещения в момент выброса (начальная концентрация) равна $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Максимальная начальная концентрация, которую можно ожидать в аварийной ситуации, равна $n_0 = 3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ (она соот-

ветствует насыщению паров UF_6 в помещении). Указанный в таблицах коэффициент K означает производственный коэффициент воздухообмена (кратность воздухообмена). Экспериментаторы покинули аварийное помещение в момент времени $t_1 = 1.5$ ч и сразу произвели дезактивацию кожи. В табл. 1 приведена временная зависимость накопления и выхода из организма массы, т. е. параметра, характеризующего токсическое действие урана. В табл. 2 приведена такая же зависимость для числа распадов Q , накопленных организмом за время t , т. е. параметра, характеризующего радиационное воздействие урана.

Таблица 1. Временная динамика ввода и вывода массы урана из всех органов по двум моделям

Аварийная ситуация, газы, перк. пост., масса атомов урана (мг); $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $t_1 = 1.5 \text{ ч}$					
Время (ч)	Прошло	Все органы, инт. модель	Все органы, дифф. модель	Выход, инт. модель	Выход, дифф. модель
1	$1.287 \cdot 10^{-2}$	$1.274 \cdot 10^{-2}$	$1.011 \cdot 10^{-2}$	$1.289 \cdot 10^{-4}$	$2.737 \cdot 10^{-3}$
2	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.845 \cdot 10^{-2}$	$1.179 \cdot 10^{-2}$	$3.720 \cdot 10^{-4}$	$6.980 \cdot 10^{-3}$
3	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.828 \cdot 10^{-2}$	$1.010 \cdot 10^{-2}$	$5.483 \cdot 10^{-4}$	$8.662 \cdot 10^{-3}$
24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.582 \cdot 10^{-2}$	$6.574 \cdot 10^{-3}$	$3.004 \cdot 10^{-3}$	$1.216 \cdot 10^{-2}$
2·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.465 \cdot 10^{-2}$	$6.188 \cdot 10^{-3}$	$4.180 \cdot 10^{-3}$	$1.254 \cdot 10^{-2}$
3·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.415 \cdot 10^{-2}$	$5.865 \cdot 10^{-3}$	$4.672 \cdot 10^{-3}$	$1.286 \cdot 10^{-2}$
30·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.183 \cdot 10^{-2}$	$2.429 \cdot 10^{-3}$	$6.997 \cdot 10^{-3}$	$1.627 \cdot 10^{-2}$
50·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.049 \cdot 10^{-2}$	$1.801 \cdot 10^{-3}$	$8.334 \cdot 10^{-3}$	$1.688 \cdot 10^{-2}$
280·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$2.640 \cdot 10^{-3}$	$7.533 \cdot 10^{-4}$	$1.619 \cdot 10^{-2}$	$1.788 \cdot 10^{-2}$
365·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.585 \cdot 10^{-3}$	$7.114 \cdot 10^{-4}$	$1.724 \cdot 10^{-2}$	$1.792 \cdot 10^{-2}$
3·280·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$9.170 \cdot 10^{-5}$	$6.251 \cdot 10^{-4}$	$1.874 \cdot 10^{-2}$	$1.800 \cdot 10^{-2}$
3·365·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.985 \cdot 10^{-5}$	$5.917 \cdot 10^{-4}$	$1.881 \cdot 10^{-2}$	$1.803 \cdot 10^{-2}$
50·280·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$4.682 \cdot 10^{-39}$	$1.657 \cdot 10^{-4}$	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.846 \cdot 10^{-2}$
50·365·24	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$3.944 \cdot 10^{-50}$	$1.292 \cdot 10^{-4}$	$1.883 \cdot 10^{-2}$	$1.849 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2. Временная динамика накопления α -распадов урана во всех органах по двум моделям

Аварийная ситуация, газы, перк. пост., накопленное число распадов (безразмерная величина); $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $t_1 = 1.5 \text{ ч}$		
Время (ч)	Все органы, инт. модель	Все органы, дифф. модель
1	$5.715 \cdot 10^2$	$4.853 \cdot 10^2$
2	$2.089 \cdot 10^3$	$1.576 \cdot 10^3$
3	$3.720 \cdot 10^3$	$2.536 \cdot 10^3$
24	$3.520 \cdot 10^4$	$1.625 \cdot 10^4$
2·24	$6.748 \cdot 10^4$	$2.982 \cdot 10^4$
3·24	$9.810 \cdot 10^4$	$4.266 \cdot 10^4$
30·24	$8.376 \cdot 10^5$	$2.513 \cdot 10^5$
50·24	$1.313 \cdot 10^6$	$3.397 \cdot 10^5$
280·24	$4.102 \cdot 10^6$	$8.371 \cdot 10^5$
365·24	$4.477 \cdot 10^6$	$9.693 \cdot 10^5$
3·280·24	$5.007 \cdot 10^6$	$1.640 \cdot 10^6$
3·365·24	$5.033 \cdot 10^6$	$1.970 \cdot 10^6$
50·280·24	$5.040 \cdot 10^6$	$1.980 \cdot 10^6$
50·365·24	$5.040 \cdot 10^6$	$1.131 \cdot 10^7$

В табл. 3 и 4 приведены данные, аналогичные данным табл. 1 и 2, описывающие производственный режим. В верхних строчках таблиц указаны параметры этого режима: $K = 0 \text{ ч}^{-1}$ — коэффициент воздухообмена, $F_1 = 1.164 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ — плотность

мощности внешних источников молекул газообразного гексафторида урана (мы предполагаем, что газообразный ГФУ постоянно подтекает из производственных емкостей и быстро распространяется по рабочему помещению, в результате, в грубом приближении, можно считать, что молекулы ГФУ постоянно возникают в каждой точке рабочего помещения). Производственный режим также можно описывать с помощью величин K , A_V , где $A_V = 1.185 \cdot 10^{-1}$ Бк·м⁻³ — плотность активности атомов урана в составе газов вдали от стенок рабочего помещения. Наконец, принято, что после шестичасового рабочего дня сотрудники производят дезактивацию кожи.

Таблица 3. Временная динамика ввода и вывода массы урана из всех органов по двум моделям

Производ. услов., газы, перк. пост., масса атомов урана (мг); $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 1.164 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ($K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $A_V = 1.185 \cdot 10^{-1} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$)					
Время (ч)	Прошло	Все органы, инт. модель	Все органы, дифф. модель	Выход, инт. модель	Выход, дифф. модель
1	$2.781 \cdot 10^{-6}$	$2.762 \cdot 10^{-6}$	$2.342 \cdot 10^{-6}$	$1.880 \cdot 10^{-8}$	$4.359 \cdot 10^{-7}$
2	$1.071 \cdot 10^{-5}$	$1.056 \cdot 10^{-5}$	$8.064 \cdot 10^{-6}$	$1.419 \cdot 10^{-7}$	$2.621 \cdot 10^{-6}$
3	$2.320 \cdot 10^{-5}$	$2.275 \cdot 10^{-5}$	$1.616 \cdot 10^{-5}$	$1.524 \cdot 10^{-7}$	$6.988 \cdot 10^{-6}$
24	$8.326 \cdot 10^{-5}$	$7.072 \cdot 10^{-5}$	$2.943 \cdot 10^{-5}$	$1.254 \cdot 10^{-5}$	$5.341 \cdot 10^{-5}$
2·24	$1.655 \cdot 10^{-4}$	$1.358 \cdot 10^{-4}$	$5.700 \cdot 10^{-5}$	$3.074 \cdot 10^{-5}$	$1.087 \cdot 10^{-4}$
3·24	$2.498 \cdot 10^{-4}$	$1.985 \cdot 10^{-4}$	$8.312 \cdot 10^{-5}$	$5.127 \cdot 10^{-5}$	$1.654 \cdot 10^{-4}$
30·24	$2.498 \cdot 10^{-3}$	$1.729 \cdot 10^{-3}$	$5.105 \cdot 10^{-4}$	$7.690 \cdot 10^{-4}$	$1.972 \cdot 10^{-3}$
50·24	$4.163 \cdot 10^{-3}$	$2.713 \cdot 10^{-3}$	$6.929 \cdot 10^{-4}$	$1.451 \cdot 10^{-3}$	$3.443 \cdot 10^{-3}$
280·24	$2.331 \cdot 10^{-2}$	$8.486 \cdot 10^{-3}$	$1.723 \cdot 10^{-3}$	$1.483 \cdot 10^{-2}$	$2.138 \cdot 10^{-2}$
365·24	$3.039 \cdot 10^{-2}$	$9.262 \cdot 10^{-3}$	$1.998 \cdot 10^{-3}$	$2.113 \cdot 10^{-2}$	$2.811 \cdot 10^{-2}$
3·280·24	$6.994 \cdot 10^{-2}$	$1.036 \cdot 10^{-2}$	$3.389 \cdot 10^{-3}$	$5.958 \cdot 10^{-2}$	$6.585 \cdot 10^{-2}$
3·365·24	$9.117 \cdot 10^{-2}$	$1.041 \cdot 10^{-2}$	$4.075 \cdot 10^{-3}$	$8.076 \cdot 10^{-2}$	$8.617 \cdot 10^{-2}$
50·280·24	1.166	$1.043 \cdot 10^{-2}$	$2.069 \cdot 10^{-2}$	1.155	1.132
50·365·24	1.520	$1.043 \cdot 10^{-2}$	$2.345 \cdot 10^{-2}$	1.509	1.480

Таблица 4. Временная динамика накопления α -распадов урана во всех органах по двум моделям

Производ. услов., газы, перк. пост., накопленное число распадов (безразмерная величина); $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 1.164 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ($K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $A_V = 1.185 \cdot 10^{-1} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$)		
Время (ч)	Все органы, инт. модель	Все органы, дифф. модель
1	$8.270 \cdot 10^{-2}$	$7.273 \cdot 10^{-2}$
2	$6.396 \cdot 10^{-1}$	$5.145 \cdot 10^{-1}$
3	2.088	1.575
24	$1.349 \cdot 10^2$	$6.367 \cdot 10^1$
2·24	$4.136 \cdot 10^2$	$1.879 \cdot 10^2$
3·24	$8.281 \cdot 10^2$	$3.693 \cdot 10^2$
30·24	$5.906 \cdot 10^4$	$2.008 \cdot 10^4$
50·24	$1.553 \cdot 10^5$	$4.656 \cdot 10^4$
280·24	$3.229 \cdot 10^6$	$6.805 \cdot 10^5$
365·24	$4.847 \cdot 10^6$	$1.020 \cdot 10^6$
3·280·24	$1.504 \cdot 10^7$	$3.776 \cdot 10^6$
3·365·24	$2.070 \cdot 10^7$	$5.814 \cdot 10^6$
50·280·24	$3.082 \cdot 10^8$	$3.931 \cdot 10^8$
50·365·24	$4.029 \cdot 10^8$	$5.936 \cdot 10^8$

2. Анализ и сравнение результатов, полученных по двум моделям для поступления в условиях аварийного выброса UF_6

1. По обеим моделям, начиная с момента $t_1 = 1.5$ ч (когда люди покидают аварийное помещение и производят дезактивацию кожи), масса урана в организме убывает со временем. Выведенная же из организма масса со временем возрастает.

2. Согласно расчетам, в интегральной модели средняя скорость убывания депонированной массы уменьшается от $\left| \frac{\Delta m}{\Delta t} \right| = 6 \cdot 10^{-7} \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1}$ в течение первых трех лет и до

$\left| \frac{\Delta m}{\Delta t} \right| = 5 \cdot 10^{-11} \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1}$ при $t > 3$ г.. Величина депонированной массы убывает примерно в 1.5 раза за один месяц, в 11 раз за один год и в 900 раз за три года.

3. По данным расчетов, в дифференциальной модели средняя скорость убывания депонированной массы больше, чем в интегральной. В течение первых 3-х лет

$\left| \frac{\Delta m}{\Delta t} \right| = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1}$, а на участке $t > 3$ г., $\left| \frac{\Delta m}{\Delta t} \right| = 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ мг} \cdot \text{ч}^{-1}$. Величина депонированной массы за один месяц убывает почти в 5 раз, за один год примерно в 17 раз, а за 50 лет примерно в 20 раз.

Из сравнения этих результатов можно сказать следующее. В первые три года интегральная модель показывает более медленное убывание массы урана, чем дифференциальная. Поэтому, чтобы не допустить критические нагрузки на организм, лучше пользоваться при расчетах интегральной моделью (если отсутствует необходимость оценивать нагрузку отдельных органов). Через три года депонированный уран, рассчитанный по дифференциальной модели, начинает преобладать над рассчитанным по интегральной модели. Расчеты, проведенные по модели МКРЗ, показали, что больше всего урана в единичном объеме органа откладывается в трабекулярной и кортикальной костях. Есть мнение [13], что попавший туда уран практически не выводится из организма. Полученный нами результат находится в согласии с положением, так как показывает, что вывод урана по дифференциальной модели со временем замедляется (практически прекращается).

Наблюдение за временной зависимостью числа α -распадов, накопленных в организме за время t от начала поступления, показывает, что оно растет с ростом t . В расчете по интегральной модели эта величина несколько больше, чем в расчете по дифференциальной модели и остается такой на протяжении длительного времени ($t \approx 3$ г. и даже больше). Однако и при $t > 3$ г. число накопленных распадов во второй модели продолжает расти и в самом конце рассмотренного диапазона времен превышает эту величину в первой модели.

Все рассмотренные результаты позволяют сделать следующее заключение. Если в задачу исследования входит нахождение распределения дозы по отдельным органам, то при расчете нужно использовать дифференциальную модель. Если же ориентироваться на

экспериментальные соотношения между массовой дозой, полученной всем организмом, и вызванными ею заболеваниями [13], то лучше использовать интегральную модель.

3. Анализ и сравнение результатов, полученных по двум моделям для поступления в рабочих условиях

1. Все рассчитанные величины возрастают со временем.

2. Начиная с первых часов работы, масса урана в интегральной модели накапливается несколько быстрее, чем в дифференциальной и остается большей на промежутке времени $t \approx 15$ лет. При $t \geq 15$ лет депонированная масса, рассчитанная по дифференциальной модели, становится больше, чем рассчитанная по интегральной модели.

3. В интегральной модели депонированная масса перестает зависеть от времени (насыщается) практически с 1-го года, а в дифференциальной только вблизи максимально возможного срока производственной деятельности $t = 50$ лет.

4. Вывод урана из организма в обеих моделях растет со временем с большей скоростью, чем растет депонирование урана, причем вывод становится больше депонирования при $t \approx 120$ сут в интегральной модели и $t \approx 10$ ч в дифференциальной.

5. Через сутки после начала работы отношение депонированной массы в интегральной модели ($m_{\text{и}}$) и в дифференциальной ($m_{\text{д}}$) равно $\frac{m_{\text{и}}}{m_{\text{д}}} \approx 2.3$, через месяц $\frac{m_{\text{и}}}{m_{\text{д}}} \approx 1.5$, через год $\frac{m_{\text{и}}}{m_{\text{д}}} \approx 4.5$, через три года $\frac{m_{\text{и}}}{m_{\text{д}}} \approx 2.5$ и через 15 лет $\frac{m_{\text{и}}}{m_{\text{д}}} \approx 1$.

6. При наблюдении за процессом накопления числа α -распадов в организме нужно отметить следующее. Практически для всего рабочего периода жизни человека интегральная модель дает большее значение величины Q .

Из всех полученных результатов следует, что (как и для аварийной ситуации) чтобы не занижить полученную человеком дозу (массу и накопленное число распадов) лучше пользоваться интегральной моделью, если целью расчета не считать нахождение распределение дозы по отдельным органам. Так как все рассчитываемые по разным моделям величины отличаются не более чем в 3—4 раза и на не самых важных промежутках времени, то нужно отметить, что интегральная модель позволяет оценить поступление в организм и тех веществ (в нашей ситуации второго токсичного вещества фтора), для которых неизвестны метаболические параметры, без знания которых нельзя воспользоваться дифференциальной моделью.

Заключение

1. Во введении читатель вводится в курс того, что единственное соединение урана, находящееся в газообразном состоянии при условиях, близких к нормальным, гексафторид урана UF_6 , используется при обогащении природного урана изотопом ^{235}U . Он опа-

сен для человека и потому его появление в воздухе рабочего помещения создает ряд проблем.

2. Со ссылками на литературу показано, что одним из способов решения этих проблем является разработка расчетных методов определения величин, характеризующих химическое воздействие урана и фтора и радиационное воздействие урана. Приведена литература, описывающая это воздействие, включая и работы авторов настоящей статьи. Отмечено, что расчетные методы определения воздействия гексафторида урана на организм человека имеют такие важные, особенно для аварийной ситуации, преимущества, что позволяют определить полученные человеком дозы значительно быстрее экспериментальных методов и, соответственно, позволяют быстрее сориентироваться относительно медицинского обслуживания пострадавших.

3. Описаны две модели для расчета массы урана в организме и числа накопленных в организме α -распадов. Используются эти модели для анализа перкутанного поступления урана в организм. Приведены расчетные данные, полученные в рамках обеих моделей.

4. Проанализированы полученные данные и высказаны рекомендации по использованию каждой из моделей.

Список литературы

1. Дэвис Л. Средиземное море. 7-9 октября 1985 г. // Дэвис Л. Терроризм и насилие. Террор и катастрофы: энциклопедия. Смоленск: Русич, 1998. С. 247—251.
2. Булюбаш Б.В. Семь бед от обедненного урана. Низкая радиоактивность и отсутствие гамма-излучения ещё не повод считать вещество безопасным. Режим доступа: <http://www.vokrugsveta.ru/telegraph/theory/848/> (дата обращения 29.01.2009).
3. Человек. Медико-биологические данные: Доклад рабочей группы ком. 2 МКРЗ по условному человеку: пер с англ. М.: Медицина, 1977. 496 с. [Report of the Task Group on Reference Man / Prepared by a task group of Committee 2 of the Intern. Commission on Radiological Protection. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1975. 480 p.].
4. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публикация 30 МКРЗЖ: пер с англ. Ч. 1-3. М.: Энергоатомиздат, 1982 – 1984 [Limits for intakes of radionuclides by workers: a report of Committee 2 of the ICRP. Pt. 1-3. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1980-1982].
5. Радиационная безопасность: Публ. 60, ч. 1, 61 МКРЗ: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1994. 190 с. [Radiation protection: 1990 recommendations of the ICRP. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1992. 83 p.].
6. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers: a report of a Task Group of Committee 2 of the ICRP. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1994. 83 p.
7. Leggett R.W., Pellmar T.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments // J. 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)

8. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990. 230 с.
9. Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Оценка доз облучения кожных покровов при их загрязнении радионуклидами. Ч. 2: Практика // АНРИ. 2019. № 3 (98). С. 11—18.
10. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2014. № 2. С. 22—30.
11. Мирхайдаров А.Х. Метод и средство измерения гексафторида урана в воздухе // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: междунар. конф. (Москва, Россия 24-26 апреля 2000 г.): Тез. докл. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. С. 92.
12. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Овчинников А.В. О возможности ускоренной медицинской помощи людям после однократного воздействия на них гексафторида урана // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 3. С. 213—219. DOI: [10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219)
13. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Мордашева В.В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // Радиационная медицина: руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения / Под ред. Л.А. Ильина. Т. 2: Радиационные поражения человека. М.: ИздАТ, 2001. С. 369—388.

Recommendations for Choosing a Model Describing the Human Exposure to Uranium Hexafluoride

S.P. Babenko¹, A.V. Bad'in^{2,*}

[*badyin@phys.msu.ru](mailto:badyin@phys.msu.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Keywords: uranium hexafluoride, products of hydrolysis of uranium hexafluoride, uranium, fluorine, mathematical model, percutaneous intake

The article notes the fact that uranium hexafluoride (UHF) is the only uranium compound in a gaseous state under conditions close to normal to be used in the enrichment of natural uranium with an isotope. It is noted that during the hydrolysis of UHF in the air of a working room, this room is polluted with gases and aerosols that are carriers of uranium and fluorine atoms, which have a negative chemical and radiation effect on the human body. This, of course, poses problems when using uranium hexafluoride at the enterprises of the nuclear industry both in everyday work and, especially, in possible emergency situations. The problems lie with a need for protective measures, development of the quantitative assessment methods for the intake of toxic substances, and establishment of relationships between the amount of incorporated (ingested) substance and the measure of its effect on the body. A review of certain publications on the quantitative description of the uranium and fluorine intake in the body of employees is given. The paper notes an involvement of this article's authors in solving this issue in their previous works too. Their calculation methods are described. The conditions under which they were carried out and the experimental results that they used were described. The article presents the calculation results both of the uranium mass intake in the body (by the time t) that characterizes the toxic effect of uranium and of the number Q of decays accumulated in the body that characterize the radiation effect. The uranium penetration through the skin (percutaneous intake) in an emergency and under normal production conditions is considered. There is given a description of two models suitable for calculations, which are distinguished by various accounting for metabolism when uranium moves from the UHF source to the exit from the human body in the natural way. It is indicated that one of the models was partially borrowed from publications of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The results obtained using two different models are compared and recommendations are made regarding their use depending on the tasks assigned to the researcher.

References

1. Davis L. Sredizemnoe more. 7-9 oktiabria 1985 [The Mediterranean Sea. October 7-9th 1985]. Davis L. *Terrorizm i nasilie. Terror i katastrofy* [Terrorism and violence. Terror and disasters]: an encyclopedia. Smolensk: Rusich Publ., 1998. Pp. 247—251 (in Russian).
2. Bulyubash B.V. *Sem' bed ot obednennogo uragana. Nizkaia radioaktivnost' i otsutstvie gamma-izlucheniia eshche ne povod schitat' veshchesnvo bezopasnym* [Seven troubles from depleted uranium. Low radioactivity and the absence of gamma radiation is not a reason to consider the substance safe]. Available at: <http://www.vokrugsveta.ru/telegraph/theory/848/>, accessed 29.02.2009 (in Russian).
3. *Report of the Task Group on Reference Man* / Prepared by a task group of Committee 2 of the Intern. Commission on Radiological Protection. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1975. 480 p. (Russ. ed.: *Chelovek. Mediko-biologicheskie dannye : Doklad rabochej gruppy komiteta 2 po uslovnomy cheloveku*. Moscow: Meditsina Publ., 1977. 496 p.
4. *Limits for intakes of radionuclides by workers: a report of Committee 2 of the ICRP*. Pt. 1-3. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1980-1982 (Russ. ed.: *Predely postupleniia radionuklidov dlia rabotayushchikh s ioniziruyushchim izlucheniem: Publikatsiia 30 MKRZ. Pt. 1-3*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1982 - 1984).
5. *Radiation protection: 1990 recommendations of the ICRP*. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1992. 83 p. (Russ. ed.: *Radiatsionnaia bezopasnost': Publikatsiia 60, pt. 1, 61 MKRZ*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1994. 190 p.).
6. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers: a report of a Task Group of Committee 2 of the ICRP. Oxf.; N.Y.: Pergamon Press, 1994. 83 p.
7. Leggett R.W., Pellmar T.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments. *J. 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)
8. Osanov D.P. *Dozimetriia i radiatsionnaia biofizika kozhi* [Dosimetry and radiation biophysics of the skin]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 230 p. (in Russian).
9. Onishchenko A.D., Zhukovskiy M.V. Estimation of skin doses after skin contamination by radionuclides. Pt. 2: Practice. *ANRI* [ANRI J.], 2019, no. 3 (98), pp. 11—18 (in Russian).
10. Babenko S.P., Bad'in A.V. Verification of a mathematical model describing the effect of uranium hexafluoride on the human body in facilities of the atomic industry. *Moscow Univ. Physics Bull.*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 124—133. DOI: [10.3103/S0027134914020040](https://doi.org/10.3103/S0027134914020040)
11. Mirkhajdarov A.Kh. Metod i sredstvo izmereniia geksافتorida urana v vozdukhe [Method and means for measuring uranium hexafluoride in air]. *Radioaktivnost' pri iadernykh vzryvakh i avariakh: mezhdunarodnaia konferentsiia: Tezisy dokladov* [Radioactivity in nuclear explosions and accidents: Intern. conf. (Moscow, Russia, April 24-26, 2000)]: Abstracts. S.-Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2000. P. 92 (in Russian).

12. Babenko S.P., Bad'in A.V., Ovchinnikov A.V. On the possibility of the rapid assistance for people after a single exposure to uranium hexafluoride. *Gigiena i sanitaria* [Hygiene and Sanitation], 2018, vol. 97, no. 3, pp. 213—219. DOI: [10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219) (in Russian)
13. Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., Mordasheva V.V. Klinicheskaia toksikologiya khimicheskikh soedinenij urana pri khronicheskoy ekspozitsii [Clinical toxicology of chemical compounds of uranium during chronic exposure]. *Radiatsionnaia meditsina. Tom 2: Radiatsionnye porazheniia cheloveka* [Radiation medicine / Ed. by L.A. Il'in. Vol. 2: Human radiation damage. Moscow: IzdAT Publ., 2001. Pp. 369—388 (in Russian).