

С. П. Б а б е н к о, А. В. Б а д ь и н

**КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ
ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА
УРАНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ
АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ**

Рассмотрена комплексная модель расчета дозиметрических величин, характеризующих воздействие на организм человека урана и фтора, попадающих в него в составе продуктов гидролиза гексафторида урана. Комплексная модель состоит из трех моделей, каждая из которых описывает определенный этап указанного воздействия. В рамках предложенной модели получена связь между ингаляционным и, отдельно, перкутантным поступлениями урана и фтора и концентрацией гексафторида урана в воздухе в момент его выброса.

Опыт работы предприятий атомной промышленности в последней четверти XX в. показывает, что на производствах по получению и обогащению соединений урана возможны аварийные ситуации, которые могут приводить к гибели рабочего персонала [1]. Кроме того, известно, что в повседневных производственных условиях здоровью работников также может быть нанесен ущерб [2]. Все это приводит к необходимости количественной оценки поступлений токсичных веществ в организм человека. Эта задача решается давно для разных веществ и различных способов их поступления. Наиболее известными публикациями на эту тему являются рекомендации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [3, 4], в которых предлагаются модели, описывающие ингаляционное поступление токсичных веществ в организм человека, а также камерная модель, описывающая процесс распределения прошедших веществ по органам, тканям и жидкостям организма. Однако, все опубликованные методы оценки поступления токсичного вещества в организм человека требуют знания концентрации этого вещества в воздухе производственного помещения как функции времени. Обычно для проведения расчетов используются экспериментальные значения концентрации токсичного вещества, что делает затруднительным описание аварийной ситуации.

В настоящей работе предлагается метод оценки вредного воздействия на организм человека гексафторида урана UF_6 — единственного газообразного соединения урана, используемого в процессе обогащения урана. Построена комплексная модель, состоящая из трех моделей,

описывающих последовательные этапы формирования такого вредного воздействия.

Первая — модель загрязнения производственной среды, представляющая собой систему дифференциальных уравнений, которые описывают процессы ввода и вывода UF_6 и продуктов его гидролиза в объем производственного помещения. Она определяет значение и динамику формирования концентрации атомов урана и фтора в воздухе в составе продуктов гидролиза UF_6 и поверхностной плотности оседающих атомов.

Вторая — модель депонирования в организме урана и фтора при ингаляционном поступлении их в составе газовых и аэрозольных продуктов гидролиза UF_6 . Она определяет количество и динамику накопления урана и фтора в организме исходя из динамики концентрации гексафторида урана в воздухе и с учетом рассчитанного [5] распределения размеров аэрозольных частиц.

Третья — модель депонирования урана и фтора в организме человека при перкутанном поступлении в составе UF_6 и продуктов его гидролиза (как газовых, так и аэрозольных). Она определяет количество и динамику накопления урана и фтора в организме исходя из плотности потоков оседающих атомов урана и фтора в любой момент времени (с учетом дезактивации кожи человека после контакта с производственной средой).

При построении первой модели учитывались следующие физические и химические процессы.

- Вещество UF_6 (газ) поступает в рабочее помещение (принималось, что частицы вещества появляются в каждой точке рассматриваемой области).
- Вещество UF_6 (газ) взаимодействует с парами H_2O [6], в результате чего в воздухе рабочего помещения появляются вещества UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ) и HF (газ).
- Вещества UO_2F_2 и HF переходят из газообразного состояния в состояние аэрозоля [7], в результате чего в воздухе рабочего помещения появляются вещества UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль). В итоге, за короткое время ($\Delta t \approx 50$ с [8]), в рассматриваемой области появляются вещества UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (газ) и HF (аэрозоль).
- Все вещества выводятся из рабочего помещения за счет воздухообмена (принималось, что частицы веществ исчезают в каждой точке рассматриваемой области).
- Все вещества оседают на границу рассматриваемой области за счет диффузии.

- Вещества UO_2F_2 (аэрозоль) и HF (аэрозоль) оседают на границу рассматриваемой области под действием силы тяжести и силы сопротивления среды.

Введем следующие обозначения: Q — рассматриваемая область; $(0, T)$ — рассматриваемый промежуток времени; n_1, n_2, n_3, n_4 — концентрации молекул веществ UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ) соответственно; D_1, D_2, D_3, D_4 — коэффициенты диффузии тех же веществ; $a_{k,m}$ — коэффициенты, описывающие процессы гидролиза, нуклеации и воздухообмена; $F_k(\vec{x}, t)$ — плотность мощности внешних источников вещества с номером k в точке \vec{x} в момент времени t ; $n'(r, \vec{x}, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул интересующего нас вещества (это может быть UO_2F_2 или HF) в составе аэрозольных частиц радиусом r в точке \vec{x} в момент времени t ; $D(r)$ — коэффициент диффузии аэрозольных частиц радиусом r ; $v(r)$ — скорость дрейфа аэрозольных частиц радиусом r ; K — кратность воздухообмена; b_m — коэффициенты, описывающие процессы нуклеации; g — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации (иными словами, $g(r)$ — плотность вероятности того, что в процессе нуклеации молекула интересующего нас вещества попадет в аэрозольную частицу радиусом r) [5].

Для газов можно записать следующую систему уравнений непрерывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n_k &= D_k \Delta n_k + \sum_{m=1}^4 a_{k,m} n_m + F_k(\vec{x}, t), \\ k &= \overline{1, 4}, \quad \vec{x} \in Q, \quad t \in (0, T); \\ n_k(\vec{x}, 0) &= n_{k,0}(\vec{x}), \quad k = \overline{1, 4}, \quad \vec{x} \in Q; \\ \alpha_k(\vec{x}, t) \frac{\partial}{\partial \vec{n}} n_k(\vec{x}, t) + \beta_k(\vec{x}, t) n_k(\vec{x}, t) &= 0, \\ k &= \overline{1, 4}, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (0, T). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $n_{k,0}(\vec{x})$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке \vec{x} в момент времени $t = 0$; \vec{n} — единичный вектор нормали к поверхности ∂Q , внешней по отношению к области Q ; коэффициенты α_k и β_k удовлетворяют условиям $|\alpha_k| + |\beta_k| \neq 0$, $\alpha_k \beta_k \geq 0$ (эти условия связаны с теоремой о единственности решения).

Для аэрозолей можно записать следующую систему уравнений непрерывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n' &= D(r) \Delta n' - (\vec{v}(r), \text{grad}(n')) - K n' + g(r) \sum_{m=1}^4 b_m n_m(\vec{x}, t), \\ \vec{x} &\in Q, \quad t \in (0, T); \end{aligned}$$

$$n'(r, \vec{x}, 0) = 0, \quad \vec{x} \in Q; \quad (2)$$

$$\alpha(r, \vec{x}, t) \frac{\partial}{\partial \vec{n}} n'(r, \vec{x}, t) + \beta(r, \vec{x}, t) n'(r, \vec{x}, t) = 0,$$

$$\vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (0, T).$$

Здесь r — параметр, $r \in (0, +\infty)$; \vec{n} — единичный вектор нормали к поверхности ∂Q , внешней по отношению к области Q ; коэффициенты α и β удовлетворяют условиям $|\alpha| + |\beta| \neq 0$, $\alpha\beta \geq 0$ (эти условия связаны с теоремой о единственности решения).

При решении системы уравнений (2) в приближении отсутствия диффузии газов и аэрозолей получены аналитические выражения для концентраций молекул интересующих нас веществ в воздухе рабочего помещения и плотностей потоков молекул этих веществ.

В табл. 1 приведены расчетные данные по динамике концентрации атомов урана в воздухе рабочего помещения, по динамике массы вдохнутого урана, по динамике массы прошедшего внутрь организма урана, а также по динамике поверхностной плотности урана, осевшего на производственные поверхности. Данные соответствуют начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_{1,0} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

В основу второй модели — депонирования урана и фтора в организме человека при ингаляционном поступлении — положены: аналитические выражения для концентраций молекул гексафторида урана и продуктов его гидролиза, полученные в рамках первой модели; аналитическое выражение для функции удержания урана в организме человека (при ингаляционном поступлении) и значения входящих в это выражение постоянных $\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2$ [10]; полученное ранее аналитическое выражение для функции распределения радиусов аэрозольных частиц UO_2F_2 , образующихся в процессе нуклеации [5].

Следует отметить, что вторая модель используется для определения массы урана, находящегося в организме человека, а также массы урана, вышедшего из организма человека. Не ставится задача нахождения распределения урана по отдельным органам.

Для вычисления числа атомов прошедшего внутрь организма урана использовалась модель, предложенная в 66-й публикации МКРЗ [4]. Согласно этой модели число атомов урана, прошедшего внутрь организма, может быть получено умножением числа атомов вдохнутого урана на некоторый коэффициент задержки ξ ($0 \leq \xi \leq 1$). Для газов $\xi = 1$, для аэрозолей $0 < \xi < 1$, причем коэффициент задержки различен для разных отделов дыхательного тракта и зависит от размеров аэрозольных частиц. Для вычисления среднего коэффициента задержки аэрозольных частиц можно использовать функцию распределения

Динамика концентрации атомов урана в воздухе рабочего помещения, динамика массы вдыхнутого урана, динамика массы прошедшего внутрь организма урана, динамика поверхностной плотности массы урана, осевшего на производственные поверхности

Аварийная ситуация. Пренебрежение диффузионными процессами. Полидисперсные аэрозоли, $r_g = 2.744$ мкм							
t	$n_U(z_0, t)$ (м^{-3}) ($z_0 = 1.5$ м)		m_U вдыхнутая (мг)		m_U прошедшая внутрь организма (мг)		$\rho_{S, \infty, U}$ ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$)
	аэрозоли	сумма газов	аэрозоли	сумма газов	аэрозоли $\xi = 0.341$	сумма газов $\xi = 1$	аэрозоли
10 с	$1.225 \cdot 10^{19}$	$9.877 \cdot 10^{20}$	$5.556 \cdot 10^{-3}$	1.553	$1.89 \cdot 10^{-3}$	1.553	$1.9 \cdot 10^{-1}$
20 с	$5.432 \cdot 10^{19}$	$9.454 \cdot 10^{20}$	$5.418 \cdot 10^{-2}$	3.063	$1.85 \cdot 10^{-2}$	3.063	1.8
1 мин	$3.231 \cdot 10^{20}$	$6.631 \cdot 10^{20}$	1.21	8.11	$4.12 \cdot 10^{-1}$	8.11	$3.59 \cdot 10^1$
5 мин	$6.412 \cdot 10^{20}$	$2.71 \cdot 10^{19}$	$2.458 \cdot 10^1$	$1.589 \cdot 10^1$	8.38	$1.589 \cdot 10^1$	$4.734 \cdot 10^2$
10 мин	$4.29 \cdot 10^{20}$	$4.239 \cdot 10^{17}$	$4.918 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.68 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$7.308 \cdot 10^2$
20 мин	$2.436 \cdot 10^{20}$	$1.035 \cdot 10^{14}$	$7.916 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$2.7 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$9.23 \cdot 10^2$
30 мин	$1.645 \cdot 10^{20}$	$2.526 \cdot 10^{10}$	$9.783 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$3.34 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.006 \cdot 10^3$
40 мин	$1.208 \cdot 10^{20}$	$6.168 \cdot 10^6$	$1.11 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$3.79 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.053 \cdot 10^3$
50 мин	$9.389 \cdot 10^{19}$	$1.51 \cdot 10^3$	$1.209 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$4.12 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.082 \cdot 10^3$
1 час	$7.478 \cdot 10^{19}$	$3.68 \cdot 10^{-1}$	$1.287 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$4.39 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.103 \cdot 10^3$
1.5 час	$4.384 \cdot 10^{19}$	0	$1.448 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$4.94 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.138 \cdot 10^3$
2 час	$2.901 \cdot 10^{19}$	0	$1.548 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$5.28 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.155 \cdot 10^3$
6 час	$4.571 \cdot 10^{18}$	0	$1.809 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$6.17 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.186 \cdot 10^3$
1 сут	$2.34 \cdot 10^{17}$	0	$1.922 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$6.55 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	$1.192 \cdot 10^3$
10 сут	$3.239 \cdot 10^{14}$	0	$1.941 \cdot 10^2$	$1.619 \cdot 10^1$	$6.62 \cdot 10^1$	$1.619 \cdot 10^1$	1.192

радиусов аэрозольных частиц. Функция распределения радиусов аэрозольных частиц, которые образуются в процессе нуклеации, получена сопоставлением значений концентрации атомов урана в составе всех аэрозольных частиц, рассчитанных в рамках упрощенного варианта первой модели, со значениями, измеренными в рамках эксперимента, моделирующего аварийную ситуацию.

На основании изложенного записаны выражения для числа $N_{1(1)}(t)$ атомов урана, вдыхнутого человеком на временном промежутке $[0, t]$; числа $N_{2(1)}(t)$ атомов урана, находящегося в организме человека в момент времени t ; числа $N_{3(1)}(t)$ атомов урана, вышедшего с мочой человека на временном промежутке $[0, t]$ (здесь индекс (1) означает,

что речь идет об ингаляционном поступлении):

$$N_{1(1)}(t) = q \int_0^t d\tau \cdot n(z_0, \tau), \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{1(1)}(t) = q \int_0^{t_0} d\tau \cdot n(z_0, \tau), \quad t \in (t_0, +\infty);$$

$$N_{2(1)}(t) = \xi q \int_0^t d\tau \cdot n(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{2(1)}(t) = \xi q \int_0^{t_0} d\tau \cdot n(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (t_0, +\infty);$$

$$N_{3(1)}(t) = \xi q \int_0^t d\tau \cdot n(z_0, \tau) \left(C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + \right. \\ \left. + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{3(1)}(t) = \xi q \int_0^{t_0} d\tau \cdot n(z_0, \tau) \left(C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + \right. \\ \left. + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in (t_0, +\infty).$$

Здесь t_0 — момент выхода человека из аварийного помещения; q — объем воздуха, вдыхаемого человеком за единицу времени.

В табл. 2 приведены расчетные данные по динамике массы вдыхнутого урана, а также по динамике массы урана, находящегося в организме человека. Данные соответствуют начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_{1,0} = 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

При построении третьей модели — депонирования урана и фтора в организме при перкутанном поступлении, использовались данные, полученные в эксперименте, моделирующем аварийную ситуацию [9]. Ниже сформулированы основные положения модели.

1. Перкутанное поступление определяется только газовыми продуктами гидролиза гексафторида урана [11].
2. Все атомы урана, поступившего в организм человека перкутанном путем, относятся к одной из трех групп. К первой группе отнесены атомы урана, находящегося на поверхности кожи человека. Ко второй группе отнесены атомы урана, находящегося в глубине кожи человека. К третьей группе мы относим атомы

Динамика массы вдыхнутого урана, динамика массы урана, находящегося в организме человека

t	Масса вдыхнутого урана, m (кг)		Масса урана, находящегося в организме, m (кг)	
	С газами	С аэрозолями всех размеров	С газами $\xi = 1$	С аэрозолями всех размеров $\xi = 0.341$
10 с	$1.55 \cdot 10^{-6}$	$5.56 \cdot 10^{-9}$	$1.55 \cdot 10^{-6}$	$1.89 \cdot 10^{-9}$
20 с	$3.06 \cdot 10^{-6}$	$5.43 \cdot 10^{-8}$	$3.06 \cdot 10^{-6}$	$1.85 \cdot 10^{-8}$
1 мин	$8.11 \cdot 10^{-6}$	$1.23 \cdot 10^{-6}$	$8.11 \cdot 10^{-6}$	$4.19 \cdot 10^{-7}$
5 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$2.75 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$
10 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$5.97 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$2.04 \cdot 10^{-5}$
20 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$3.58 \cdot 10^{-5}$
30 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$4.71 \cdot 10^{-5}$
40 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$5.52 \cdot 10^{-5}$
50 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$6.21 \cdot 10^{-5}$
60 мин	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$1.98 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-5}$	$6.75 \cdot 10^{-5}$

урана, находящегося во внутренних органах, тканях и жидкостях организма [9].

3. Вводятся следующие обозначения: $N_{2(2)}(t)$ — число атомов урана, находящегося на поверхности кожи человека в момент времени t ; $N_{3(2)}(t)$ — число атомов урана, находящегося в глубине кожи человека в момент времени t ; $\tilde{N}_{3(2)}(t)$ — число атомов урана, находящегося во внутренних органах человека в момент времени t ; $N_{4(2)}(t)$ — число атомов урана, вышедшего с мочой человека на временном промежутке $[0, t]$. На основе опубликованных данных предполагаем, что $N_{2(2)}(t) = N_{2(2),0}e^{-\lambda t}$ при $t \in [0, t_0]$. Кроме того, очевидно, что $N_{2(2)}(t) = 0$ при $t \in (t_0, +\infty)$ (здесь t_0 — момент дезактивации кожи человека; индекс (2) означает, что речь идет о перкутанном поступлении).
4. Используются данные, которые были измерены в модельном эксперименте: активность урана в коже непосредственно перед дезактивацией $A_{1,к} = A_{2(2)}(t_0) + A_{3(2)}(t_0)$; активность урана в коже сразу после дезактивации $A_{2,к} = A_{3(2)}(t_0)$; набор значений активности урана в коже $A_{1,1}, \dots, A_{1,m_1}$ для некоторого набора моментов времени $t_{1,1}, \dots, t_{1,m_1}$; набор значений активности суточной мочи человека $A_{2,1}, \dots, A_{2,m_2}$ для некоторого набора моментов времени $t_{2,1}, \dots, t_{2,m_2}$.

5. С помощью $A_{1,k}, A_{2,k}$ находится λ . Если нанести на график точки с координатами $(t_{1,i}, \ln(A_{1,i}))$, то станет видно, что промежуток $[0, t_{1,m_1}]$ естественным образом разбивается на два участка, на каждом из которых точки $(t_{1,i}, \ln(A_{1,i}))$ хорошо ложатся на прямую. Если нанести на график точки с координатами $(t_{2,i}, \ln(A_{2,i}))$, то станет видно, что промежуток $[0, t_{2,m_2}]$ естественным образом разбивается на два участка, на каждом из которых точки $(t_{2,i}, \ln(A_{2,i}))$ хорошо ложатся на прямую [9].
6. На основании п. 5 записываются аналитические выражения для $N_{2(2)}(t), N_{3(2)}(t), \tilde{N}_{3(2)}(t), N_{4(2)}(t)$.
7. Принимается, что полученные аналитические выражения описывают процессы прохождения через организм человека урана, попавшего на кожу на малом временном промежутке $[\tau, \tau + d\tau]$. Количество элементарного поступления определяется выражением $j(\tau)d\tau$, где $j(\tau)$ — плотность потока атомов урана, полученная в рамках первой модели.

В рамках модели, описывающей длительное поступление урана в организм человека, получены следующие выражения для $N_{2(2)}(t), N_{3(2)}(t), \tilde{N}_{3(2)}(t), N_{4(2)}(t)$:

$$N_{2(2)}(t) = S \int_0^t d\tau \cdot j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{2(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in (t_0, t_1],$$

$$N_{2(2)}(t) = 0, \quad t \in (t_1, +\infty);$$

$$N_{3(2)}(t) = S \int_0^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{3(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (t_0, t_1],$$

$$N_{3(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t_1-\tau)}) \times \\ \times (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (t_1, +\infty);$$

$$\tilde{N}_{3(2)}(t) = S \int_0^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)} + \tilde{C}_2 e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)} \right), \quad t \in [0, t_0],$$

$$\tilde{N}_{3(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)} + \tilde{C}_2 e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)} \right), \quad t \in (t_0, t_1],$$

$$\tilde{N}_{3(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t_1-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)} + \tilde{C}_2 e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)} \right), \quad t \in (t_1, +\infty);$$

$$N_{4(2)}(t) = S \int_0^t d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)}) + \tilde{C}_2 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in [0, t_0],$$

$$N_{4(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)}) + \tilde{C}_2 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in (t_0, t_1],$$

$$N_{4(2)}(t) = S \int_0^{t_0} d\tau \cdot j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t_1-\tau)}) \times \\ \times \left(\tilde{C}_1 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)}) + \tilde{C}_2 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in (t_1, +\infty).$$

Здесь t_0 — момент выхода человека из аварийного помещения; t_1 — момент дезактивации кожи человека; постоянные $\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2$ получены на основе данных модельного эксперимента, а постоянные $\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ получены на основе данных работы [10].

В табл. 3 приведены данные, рассчитанные в рамках описанной модели.

Построенные модели, как уже было отмечено, не позволяют найти распределение токсичных веществ по отдельным органам, но позволяют найти количество токсичного вещества, поступившего в организм, находящегося в организме и вышедшего из организма. Следует отметить, что в рамках построенных моделей указанные величины связываются с уровнем аварийного выброса, определяемым начальной кон-

Динамика загрязнения кожи ураном и поступления урана в организм при аварийном выбросе UF₆

Динамика концентрации n (м ⁻³) атомов урана в воздухе, динамика массы урана, осевшего на кожу, динамика массы урана, находящегося в глубине кожи. Время отсчитывается от момента выброса. Начальная концентрация молекул гексафторида урана $n_{1,0} = 1 \cdot 10^{21}$ м ⁻³						
t (мин)	Время пребывания в аварийной зоне $t_0 = 3$ мин			Время пребывания в аварийной зоне $t_0 = 10$ час		
	n (м ⁻³)	m (мг) с газами		n (м ⁻³)	m (мг) с газами	
		осевшая на кожу	находящаяся в глубине кожи		осевшая на кожу	находящаяся в глубине кожи
1	$6.63 \cdot 10^{20}$	8.4	0.012	$6.63 \cdot 10^{20}$	8.4	0.012
2	$3.17 \cdot 10^{20}$	10.25	0.03	$3.17 \cdot 10^{20}$	10.25	0.03
3	$1.42 \cdot 10^{20}$	10.91	0.051	$1.42 \cdot 10^{20}$	10.91	0.051
5	$2.71 \cdot 10^{19}$	10.91	0.094	$2.71 \cdot 10^{19}$	11.24	0.095
10	$4.24 \cdot 10^{17}$	10.91	0.2	$4.24 \cdot 10^{17}$	11.3	0.211
15	$6.62 \cdot 10^{15}$	10.91	0.305	$6.62 \cdot 10^{15}$	11.3	0.314
20	$1.04 \cdot 10^{14}$	10.91	0.41	$1.04 \cdot 10^{14}$	11.3	0.442
30	$2.53 \cdot 10^{10}$	10.91	0.61	$2.53 \cdot 10^{10}$	11.3	0.63
300	0	10.91	4.87	0	11.3	5.04

центрацией молекул гексафторида урана. Это делает расчеты в рамках описанных моделей востребованными в тех ситуациях, когда необходимо получить информацию о поступлении урана в организм человека гораздо быстрее, чем это позволяет методика, основанная на измерении активности урана в суточной моче пострадавшего. Применение предлагаемой методики предполагает измерение объемной плотности активности урана в составе газов в воздухе рабочих помещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дэвис Л. Терроризм и насилие. Террор и катастрофы / Пер. с англ. – Смоленск: Русич. – 1998. – 496 с.
2. Гастева Г. Н., Бадьин В. И., Молоканов А. А., Мордашева В. В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // Радиационная медицина. – М.: ИздАт. – 2001. – Т. 2. – С. 369–389.
3. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публикация 30 МКРЗ / Ч. 1. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1982. – 136 с.

4. I C R P Publication 66. Human respiratory tract model for radiological protection // Annals of the ICRP. – 1994. – 24. – № 4.
5. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранилфторида // Атомная энергия. – 2005. – 99. – № 5. – С. 353–358.
6. U r a n i u m hexafluoride – safe handling, processing, and transporting // Conference Proceedings. May 24–26. – Oak Ridge, Tennessee. – 1988.
7. П е т р я н о в - С о к о л о в И. С., С у т у г и н А. Г. Аэрозоли. – М.: Наука. – 1989. – 144 с.
8. М и р х а й д а р о в А. Х., Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н В. И. Некоторые аспекты аварийных ситуаций на урановых заводах // Известия Академии промышленной экологии. – 2002. – № 1. – С. 67–71.
9. М и р х а й д а р о в А. Х. Исследование закономерностей загрязнения воздушной среды и поверхностей в производстве разделения изотопов урана / Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: ИБФ Мин. Здр. – 1978. – 217 с. (Архив ФМБА России).
10. М е д и к о - э к о л о г и ч е с к и е материалы по биологическим эффектам при поступлении соединений урана и фтора и допустимым уровням их поступления в организм человека / Отчет по теме № 30612-01-0: Подготовка данных для определения зависимости биологического эффекта от поступления гексафторида урана в организм человека с учетом вариабельности индивидуальной чувствительности. – 2002. – 25 с. (Архив ФМБА России).
11. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В., Б а д ь и н В. И. Математическое моделирование процесса оседания UF_6 и продуктов его гидролиза в присутствии силы тяжести // Известия Академии промышленной экологии. – 2003. – № 2. – С. 70–85.

Статья поступила в редакцию 24.11.2006

Светлана Петровна Бабенко родилась в 1937 г., окончила в 1960 г. Московский государственный педагогический институт им. В.И. Ленина. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 65 научных работ.

S.P. Babenko (b. 1937) graduated from the Lenin Moscow State Pedagogical Institute in 1960. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman State Technical University. Author of 65 publications.

Андрей Валентинович Бадьин родился в 1970 г., окончил в 1992 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры математики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор 12 научных работ.

A.V. Badiin (b. 1970) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1992. Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of mathematics department of physical faculty of the Lomonosov Moscow State University. Author of 12 publications.