

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Оценка допустимого времени пребывания человека в зоне аварийного выброса гексафторида урана при учете ингаляционного поступленияС. П. Бабенко^{1,a}, А. В. Бадьин^{2,b}, А. В. Овчинников²¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки», кафедра «Физика» (ФН-4). Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.*² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^a babenkosvetlana@mail.ru, ^b badyin@phys.msu.ru*

Статья поступила 01.04.2016, подписана в печать 18.06.2016.

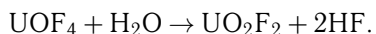
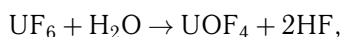
В настоящей работе описана комплексная модель, позволяющая вычислить массу вредных веществ, попадающих в организм человека в условиях аварийного выброса гексафторида урана (UF₆) в производственном помещении. Она охватывает все звенья процесса от загрязнения производственной среды газообразным UF₆ до проникновения токсичных веществ в организм. Модель построена с учетом имеющихся в литературе сведений об исследованиях в этом направлении. На основе численных расчетов, проведенных в рамках построенной модели, делается заключение о преобладающей роли ингаляционного поступления. Для него приведена зависимость между временем пребывания в аварийной ситуации и количеством попавшего в организм фтора, наиболее токсичного для человека. Проведена оценка допустимого времени пребывания человека в зоне аварийного выброса.

Ключевые слова: уран, фтор, гексафторид урана, математическая модель, функция распределения, перкутанное поступление, ингаляционное поступление.

УДК: 614.876, 614.878. PACS: 87.10.-e, 87.53.-j.

Введение

Известно [1], что на предприятиях атомной промышленности, использующих UF₆ (гексафторид урана, ГФУ), возможны аварийные выбросы этого вещества (в газообразном состоянии) в воздух рабочих помещений. В воздухе газообразный UF₆ взаимодействует с парами воды (участвует в процессе гидролиза), образуя вещества: газообразный UOF₄, газообразный HF (фтороводород). В свою очередь, газообразный UOF₄ взаимодействует с парами воды, образуя вещества: газообразный UO₂F₂ (уранилфторид), газообразный HF. Эти процессы описываются следующими химическими уравнениями [2–5]:



Газообразный уранилфторид и газообразный фтороводород образуют аэрозольные частицы (участвуют в процессе нуклеации). В результате воздух рабочего помещения оказывается насыщен следующими продуктами гидролиза ГФУ: UF₆ (газ), UOF₄ (газ), UO₂F₂ (газ), HF (газ), UO₂F₂ (аэрозоль), HF (аэрозоль). Из воздуха эти вещества могут попасть в организм человека. Причем есть два пути поступления: ингаляционный (через дыхательную систему, при этом дыхательная система называется барьерным органом) и перкутанный (через кожу, при этом кожа называется барьерным органом). Попадая в ор-

ганизм, продукты гидролиза ГФУ приносят с собой атомы токсичных веществ — урана и фтора.

Очевидно: молекулы UF₆, UOF₄, UO₂F₂ содержат по одному атому урана, молекула HF содержит ноль атомов урана. Далее вещества UF₆, UOF₄, UO₂F₂ будем называть урансодержащими продуктами гидролиза ГФУ. Попадая в организм, уран оказывает на человека сильное негативное воздействие как химическое, так и радиационное (уран α-активен) [1, 6].

Далее мы будем рассматривать только те атомы фтора, которые в процессе гидролиза войдут в состав фтороводорода. Такие атомы будем называть активными. Очевидно, что молекула UF₆ содержит четыре активных атома фтора, молекула UOF₄ содержит два активных атома фтора, молекула UO₂F₂ содержит ноль активных атомов фтора, молекула HF содержит один активный атом фтора. Далее вещества UF₆, UOF₄, HF будем называть фторсодержащими продуктами гидролиза ГФУ. Попадая в организм человека, HF растворяется в воде. Водный раствор фтороводорода (плавиковая кислота) — сильный яд. Попадая на кожу, плавиковая кислота быстро всасывается и через некоторое время вызывает химические ожоги; попадая в кровь, вызывает нарушение сердечной деятельности, отек легких, изменение кровяных и пищеварительных органов. Известно [1], что попадание в организм более 300 мг

фтора в составе HF может привести к летальному исходу.

Для определения ингаляционного поступления нужно знать концентрацию молекул для каждого продукта гидролиза ГФУ около носа человека в каждый момент времени. Для определения перкутанного поступления нужно знать плотность потока числа молекул для каждого продукта гидролиза ГФУ на коже человека в каждый момент времени. В любом случае нужна математическая модель, описывающая загрязнение воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза UF_6 . Кроме того, нужны модели, описывающие прохождение токсичных веществ через барьерные органы. Наконец, для изучения воздействия урана и фтора на организм человека нужны модели, описывающие прохождение токсичных веществ через организм в целом.

Исследованию процессов поступления токсичных веществ в организм человека посвящено большое количество работ (рассматривающих эти процессы с различных точек зрения). Среди них в первую очередь нужно назвать публикации Международной комиссии по радиационной защите, МКРЗ (International Commission on Radiological Protection, ICRP) и многочисленные работы отечественных ученых. Серия работ авторов настоящей статьи отличается количественным описанием поступления урана и фтора в организм человека, прохождения этих веществ через барьерные органы и через организм в целом. В частности, в работе [7] рассмотрен вопрос о допустимом времени пребывания человека в аварийном помещении при условии, что человек защищен от ингаляционного поступления, но не защищен от перкутанного поступления токсичных веществ. Такой подход оправдан тем, что защита от перкутанного поступления на предприятиях гораздо реже реализуется, хотя принципиально этот вопрос решен.

В настоящей статье рассматривается вопрос о допустимом времени пребывания человека в аварийном помещении при условии, что он не защищен и от ингаляционного поступления тоже. Решение этого вопроса может оказаться важным, поскольку в жизни большую роль играет человеческий фактор, зачастую приводящий к тому, что в момент аварии на человеке нет ни противогаза, ни даже респиратора «Лепесток», усложняющих рабочий процесс.

1. Методы исследования

Для определения допустимого времени пребывания человека в зоне аварийного выброса гексафторида урана использовалась комплексная модель воздействия ГФУ на организм человека при ингаляционном поступлении. В основу этой модели положены:

1) модель загрязнения воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ [8, 9];

2) рекомендуемая МКРЗ модель прохождения токсичных веществ через дыхательную систему [10–14];

3) интегральная модель прохождения токсичных веществ через организм при ингаляционном поступлении [9].

Рассмотрим некоторое рабочее помещение, некоторого человека и временной промежуток $[0, +\infty)$. Предположим, что на временном промежутке $[0, t_{em}]$ (здесь $t_{em} \in (0, +\infty)$) в рабочем помещении произошёл выброс газообразного гексафторида урана. Кроме того, предположим, что на временном промежутке $[0, t_{out}]$ (здесь $t_{out} \in (t_{em}, +\infty)$) человек находился внутри рабочего помещения, а на временном промежутке $(t_{out}, +\infty)$ — вне его. Введем обозначения: $N_1(t)$ — число атомов интересующего нас токсичного вещества в составе интересующего нас продукта гидролиза ГФУ, вдохнутых на временном промежутке $[0, t]$ (далее мы будем рассматривать прохождение этих атомов через организм человека); $N_2(t)$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм на временном промежутке $[0, t]$; $N_3(t)$ — 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 $[0, t]$. Далее мы предполагаем, что число t_{em} настолько мало, что выброс газообразного гексафторида урана можно считать мгновенным. Соответственно можно ввести понятие начальной концентрации молекул ГФУ.

Прежде чем пытаться построить модель распределённого во времени поступления токсичного вещества в организм человека, имеет смысл изучить вырожденный случай разового поступления. Предположим, что число t_{out} настолько мало, что поступление токсичного вещества в организм можно считать мгновенным. Пусть в нулевой момент времени человек вдохнул $N_{1,0}$ атомов токсичного вещества. Тогда $N_1(t) = N_{1,0}$ при $t \in [0, +\infty)$. Обозначим через ξ коэффициент прохождения в организм атомов токсичного вещества (здесь $\xi \in [0, 1]$). Тогда $\xi N_{1,0}$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм в нулевой момент времени. Следовательно, $N_2(t) = \xi N_{1,0}$ при $t \in [0, +\infty)$. Используя литературные данные [15, 16], получаем

$$N_3(t) = \xi N_{1,0} (C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}), \quad t \in [0, +\infty).$$

Здесь $\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2$ — некоторые коэффициенты ($\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2 \in (0, +\infty)$, $\lambda_2 < \lambda_1$, $C_1 + C_2 = 1$). Тогда

$$N_4(t) = \xi N_{1,0} (C_1 (1 - e^{-\lambda_1 t}) + C_2 (1 - e^{-\lambda_2 t})), \\ t \in [0, +\infty).$$

Теперь перейдем к изучению распределённого поступления. Пусть $n(z, t)$ — концентрация атомов токсичного вещества на высоте z в момент времени t ; z_0 — высота, на которой находится нос

человека; q — объем воздуха, вдыхаемого человеком в единицу времени. Пусть $\tau \in [0, t_{\text{out}}]$. Рассмотрим малый временной промежуток $[\tau, \tau + \Delta\tau]$ (здесь $\Delta\tau \in (0, +\infty)$). Тогда $n(z_0, \tau)(q\Delta\tau)$ — число атомов токсичного вещества, вдохнутых на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$; $\xi(n(z_0, \tau)(q\Delta\tau))$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$. Обозначим $\Phi_1(z, t) = qn(z, t)$, $\Phi_2(z, t) = qn(z, t)\xi$. Тогда $\Phi_1(z_0, \tau)\Delta\tau$ — число атомов токсичного вещества, вдохнутых на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$; $\Phi_2(z_0, \tau)\Delta\tau$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$. Предположим, что процессы прохождения через организм токсичного вещества, вдохнутого на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$, описываются приведенными выше законами для разового поступления. Тогда

$$N_1(t) = \int_0^t d\tau \cdot \Phi_1(z_0, \tau), \quad t \in [0, t_{\text{out}}], \quad (1)$$

$$N_1(t) = \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau \cdot \Phi_1(z_0, \tau), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty);$$

$$N_2(t) = \int_0^t d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau), \quad t \in [0, t_{\text{out}}], \quad (2)$$

$$N_2(t) = \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty);$$

$$N_3(t) = \int_0^t d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in [0, t_{\text{out}}], \quad (3)$$

$$N_3(t) = \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty);$$

$$N_4(t) = \int_0^t d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau) \left(C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in [0, t_{\text{out}}], \quad (4)$$

$$N_4(t) = \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau \cdot \Phi_2(z_0, \tau) \left(C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)}) \right), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty).$$

В работе [8] получены выражения для концентраций атомов токсичных веществ в составе газообразных продуктов гидролиза ГФУ. Мы предполагаем, что: $z_0 = 1.5$ м; $q = 3.922 \cdot 10^{-4}$ м³·с⁻¹; $\xi = 1$ для газов. В работах [15, 16] приведены значения коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, C_1, C_2$. Все это позволяет вычислить величины $N_1(t) - N_4(t)$ для газов с помощью равенств (1)–(4). Кроме того, в работе [8] получены выражения для концентраций атомов токсичных веществ в составе аэрозольных частиц всех радиусов. Это позволяет вычислить величину $N_1(t)$ для по-

лидисперсных аэрозолей с помощью равенства (1). Однако вычисление величин $N_2(t) - N_4(t)$ для полидисперсных аэрозолей представляет определенную проблему. Дело в том, что коэффициент прохождения зависит от радиуса аэрозольных частиц и не может быть связан с системой аэрозольных частиц всех радиусов.

Наиболее правильный подход к решению проблемы состоит в следующем. Пусть $n(r, z, t)$ — концентрация атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц радиусов не больше r на высоте z в момент времени t ; $n_{\infty}(z, t) = \lim_{r \rightarrow +\infty} n(r, z, t)$; $n'(r, z, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r (здесь $\int_0^r d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, z, t) = n(r, z, t)$); $\xi(r)$ — коэффициент прохождения в организм атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r . Пусть $\tau \in [0, t_{\text{out}}]$. Рассмотрим малый временной промежуток $[\tau, \tau + \Delta\tau]$ (здесь $\Delta\tau \in (0, +\infty)$). Пусть $\tilde{r} \in (0, +\infty)$. Рассмотрим малый промежуток $[\tilde{r}, \tilde{r} + \Delta\tilde{r}]$ (здесь $\Delta\tilde{r} \in (0, +\infty)$). Тогда $n'(\tilde{r}, z_0, \tau)\Delta\tilde{r}$ — концентрация атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц с радиусами из малого промежутка $[\tilde{r}, \tilde{r} + \Delta\tilde{r}]$; $(n'(\tilde{r}, z_0, \tau)\Delta\tilde{r})(q\Delta\tau)$ — число атомов токсичного вещества, вдохнутых в составе аэрозольных частиц с радиусами из малого промежутка $[\tilde{r}, \tilde{r} + \Delta\tilde{r}]$ на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$; $\xi(\tilde{r}) \left((n'(\tilde{r}, z_0, \tau)\Delta\tilde{r})(q\Delta\tau) \right)$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм в составе аэрозольных частиц с радиусами из малого промежутка $[\tilde{r}, \tilde{r} + \Delta\tilde{r}]$ на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$. Следовательно, $\left(q \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, z_0, \tau) \xi(\tilde{r}) \right) \Delta\tau$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм в составе аэрозольных частиц всех радиусов на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$. Обозначим $\Phi_2(z, t) = q \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, z, t) \xi(\tilde{r})$. Тогда $\Phi_2(z_0, \tau)\Delta\tau$ — число атомов токсичного вещества, прошедших в организм в составе аэрозольных частиц всех радиусов на малом временном промежутке $[\tau, \tau + \Delta\tau]$. Следовательно, величины $N_2(t) - N_4(t)$ для полидисперсных аэрозолей удовлетворяют равенствам (2)–(4).

В работе [8] получено выражение для величины $n'(r, z, t)$. Однако для вычисления величин $N_2(t) - N_4(t)$ для полидисперсных аэрозолей с помощью равенств (2)–(4) нужно знать функцию $\{\xi(r)\}_r$.

Попробуем «обойти» последнее ограничение. Обозначим $G_1(r, z, t) = \frac{n(r, z, t)}{n_{\infty}(z, t)}$; $g_1(r, z, t) = \frac{n'(r, z, t)}{n_{\infty}(z, t)}$ (очевидно, $\int_0^r d\tilde{r} \cdot g_1(\tilde{r}, z, t) = G_1(r, z, t)$); $\xi_1(z, t) =$

$$= \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot g_1(\tilde{r}, z, t) \xi(\tilde{r}). \text{ Тогда}$$

$$\begin{aligned} \Phi_2(z, t) &= q \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, z, t) \xi(\tilde{r}) = \\ &= q n_\infty(z, t) \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot \frac{n'(\tilde{r}, z, t)}{n_\infty(z, t)} \xi(\tilde{r}) = \\ &= q n_\infty(z, t) \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot g_1(\tilde{r}, z, t) \xi(\tilde{r}) = q n_\infty(z, t) \xi_1(z, t). \end{aligned}$$

Очевидно, число $G_1(r, z, t)$ можно интерпретировать как вероятность обнаружить атом токсичного вещества в составе аэрозольной частицы радиуса не больше r (на высоте z в момент времени t). Тогда $\{G_1(r, z, t)\}_r$ — интегральная функция распределения радиусов аэрозольных частиц (на высоте z в момент времени t); $\{g_1(r, z, t)\}_r$ — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц (на высоте z в момент времени t); $\xi_1(z, t)$ — среднее значение коэффициента прохождения (на высоте z в момент времени t).

Рассмотрим более подробно процесс нуклеации. Введем обозначения: G_0 — интегральная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации (здесь $G_0(r)$ — вероятность того, что в процессе нуклеации атом токсичного вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса не больше r); g_0 — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации (здесь $\int_0^r d\tilde{r} \cdot g_0(\tilde{r}) = G_0(r)$); r_g — геометрическое среднее радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации; β_g — геометрическое стандартное отклонение радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации; $\xi_0 = \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot g_0(\tilde{r}) \xi(\tilde{r})$. В работе [9] показано, что функции G_0, g_0 описываются логарифмически нормальным законом. При этом использованы результаты работы [17]. В работе [8] с помощью функций G_0, g_0 получены выражения для величин $n'(r, z, t)$, $n_\infty(z, t)$. В работе [18] проводится исследование функции $\{g_1(r, z, t)\}_r$, построенной с помощью величин $n'(r, z, t)$, $n_\infty(z, t)$. Функция $\{g_1(r, z, t)\}_r$,

вообще говоря, зависит от высоты z и момента времени t , отличается от функции g_0 и даже не описывается логарифмически нормальным законом. Отличие функции $\{g_1(r, z, t)\}_r$ от функции g_0 можно описать следующим образом. Существует такое пороговое значение $R(z, t)$ радиусов аэрозольных частиц (здесь $R(z, t) \in (0, +\infty)$), что на промежутке $(0, R(z, t)]$ функция $\{g_1(r, z, t)\}_r$ отличается от функции g_0 умножением на положительное число; а на промежутке $(R(z, t), +\infty)$ функция $\{g_1(r, z, t)\}_r$ отличается от функции g_0 умножением на положительную бесконечно малую функцию (при $r \rightarrow +\infty$). Можно сказать, что функция $\{g_1(r, z, t)\}_r$ получена из функции g_0 с помощью несколько сглаженного «усечения» и последующей перенормировки. Если пороговое значение $R(z, t)$ достаточно велико, то функцию $\{g_1(r, z, t)\}_r$ можно заменить функцией g_0 (в грубом приближении) и считать, что $\Phi_2(z, t) = q n_\infty(z, t) \xi_0$. Величина $R(z, t)$ увеличивается при уменьшении массы молекул, из которых состоит аэрозольная частица, поэтому для вещества HF (аэрозоль) такая замена более обоснована, чем для вещества UO_2F_2 (аэрозоль). В работах [11, 13] для системы аэрозолей с логарифмически нормальным законом распределения радиусов аэрозольных частиц построены графики зависимостей среднего коэффициента прохождения от массового медианного аэродинамического диаметра (ММАД) для различных отделов дыхательного тракта. В свою очередь ММАД можно выразить через геометрическое среднее радиусов аэрозольных частиц и плотность массы аэрозольной частицы. Все это позволяет найти ξ_0 для интересующих нас аэрозолей. В табл. 1 приведены значения ξ_0 для вещества HF (аэрозоль) и для различных отделов дыхательного тракта.

2. Результаты расчета поступления фтора

Предположим, что число t_{out} настолько велико, что пребывание человека в аварийном помещении можно считать бесконечно долгим. В табл. 2 (для случая, когда начальная концентрация молекул ГФУ удовлетворяет условию $n_0 = 1.0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$) приведены значения следующих величин: $m_{\text{п.г.}}$ — масса активных атомов фтора, поступивших перкутанно с газами в организм человека на временном промежутке $[0, t]$ (в работе [9] показано, что токсичные

Таблица 1

Средний коэффициент прохождения для вещества HF (аэрозоль)

$r_g = 2.744 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, ММАД = $3.370 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\beta_g = 2.18$ (безразмерная величина)					
ξ_0 (безразмерная величина)					
Передняя часть носового хода	Задняя часть носового хода, рот, глотка, гортань	Трахео- бронхиальный отдел	Бронхиолы	Альвеолы	Все отделы, кроме передней части носового хода
0.300	0.230	0.019	0.011	0.080	0.340

Таблица 2

Сравнение перкутанного и ингаляционного поступлений фтора

$n_0 = 1.0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$					
t	$m_{\text{п.г.}}, \text{ МГ}$	$m_{\text{и.г.}}, \text{ МГ}$	$m_{\text{и.а.}}, \text{ МГ}$	$m_{\text{и.}}, \text{ МГ}$	$m_{\text{и.}}/m_{\text{п.г.}}$
10 с	$3.382 \cdot 10^{-3}$	$4.871 \cdot 10^{-1}$	$3.598 \cdot 10^{-3}$	$4.907 \cdot 10^{-1}$	$1.451 \cdot 10^2$
20 с	$1.030 \cdot 10^{-2}$	$9.388 \cdot 10^{-1}$	$1.924 \cdot 10^{-2}$	$9.581 \cdot 10^{-1}$	$9.299 \cdot 10^1$
1 мин	$5.642 \cdot 10^{-2}$	2.348	$2.170 \cdot 10^{-1}$	2.565	$4.546 \cdot 10^1$
5 мин	$4.746 \cdot 10^{-1}$	4.374	3.562	7.936	$1.672 \cdot 10^1$
10 мин	$9.882 \cdot 10^{-1}$	4.451	8.415	$1.287 \cdot 10^1$	$1.302 \cdot 10^1$
20 мин	1.876	4.452	$1.750 \cdot 10^1$	$2.195 \cdot 10^1$	$1.170 \cdot 10^1$
30 мин	2.604	4.452	$2.578 \cdot 10^1$	$3.023 \cdot 10^1$	$1.161 \cdot 10^1$

Таблица 3

Динамика массовой дозы фтора $m_{\text{и.}}, \text{ мг}$, для различных значений начальной концентрации молекул ГФУ

$t \backslash n_0, \text{ м}^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{22}$	$3.5 \cdot 10^{22}$	$4.0 \cdot 10^{22}$	$6.0 \cdot 10^{22}$	$1.0 \cdot 10^{23}$	$2.0 \cdot 10^{23}$	$3.0 \cdot 10^{23}$
10 с	4.907	$1.718 \cdot 10^1$	$1.963 \cdot 10^1$	$2.944 \cdot 10^1$	$4.907 \cdot 10^1$	$9.815 \cdot 10^1$	$1.472 \cdot 10^2$
20 с	9.581	$3.353 \cdot 10^1$	$3.832 \cdot 10^1$	$5.749 \cdot 10^1$	$9.581 \cdot 10^1$	$1.916 \cdot 10^2$	$2.874 \cdot 10^2$
1 мин	$2.565 \cdot 10^1$	$8.977 \cdot 10^1$	$1.026 \cdot 10^2$	$1.539 \cdot 10^2$	$2.565 \cdot 10^2$	$5.130 \cdot 10^2$	$7.695 \cdot 10^2$
5 мин	$7.936 \cdot 10^1$	$2.778 \cdot 10^2$	$3.174 \cdot 10^2$	$4.761 \cdot 10^2$	$7.936 \cdot 10^2$	$1.587 \cdot 10^3$	$2.381 \cdot 10^3$
10 мин	$1.287 \cdot 10^2$	$4.503 \cdot 10^2$	$5.146 \cdot 10^2$	$7.719 \cdot 10^2$	$1.287 \cdot 10^3$	$2.573 \cdot 10^3$	$3.860 \cdot 10^3$
20 мин	$2.195 \cdot 10^2$	$7.684 \cdot 10^2$	$8.782 \cdot 10^2$	$1.317 \cdot 10^3$	$2.195 \cdot 10^3$	$4.391 \cdot 10^3$	$6.586 \cdot 10^3$
30 мин	$3.023 \cdot 10^2$	$1.058 \cdot 10^3$	$1.209 \cdot 10^3$	$1.814 \cdot 10^3$	$3.023 \cdot 10^3$	$6.047 \cdot 10^3$	$9.070 \cdot 10^3$

вещества перкутанно с аэрозолями в организм человека не поступают); $m_{\text{и.г.}}$ — масса активных атомов фтора, поступивших ингаляционно с газами в организм человека на временном промежутке $[0, t]$; $m_{\text{и.а.}}$ — масса активных атомов фтора, поступивших ингаляционно с аэрозолями в организм человека на временном промежутке $[0, t]$; $m_{\text{и.}}$ — масса активных атомов фтора, поступивших ингаляционно с газами и аэрозолями в организм человека на временном промежутке $[0, t]$. При расчете данных по перкутанному поступлению использовались результаты работы [19].

Видно, что в пределах реального времени пребывания человека в аварийном помещении ($t \approx 10$ мин) ингаляционное поступление фтора значительно превышает перкутанное. Поэтому при оценке вреда, нанесенного фтором, перкутанным поступлением можно пренебречь. Согласно данным табл. 2, при начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_0 = 1.0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ массовая доза фтора, поступающего в организм человека за 30 мин, значительно меньше дозы, приводящей к летальному исходу (300 мг). Чтобы решить поставленную в начале настоящей работы задачу, приведем в табл. 3 значения $m_{\text{и.}}$ для различных моментов времени и для различных значений начальной концентрации молекул ГФУ (здесь

стоит заметить, что величина $m_{\text{и.}}$ линейно зависит от величины n_0).

Обозначим через t_* время, за которое человек получает смертельно опасную дозу фтора за счет ингаляционного поступления (здесь $t_* \in [0, +\infty)$, $m_{\text{и.}}(n_0, t_*) = 300$). Величину t_* можно рассматривать как некоторую оценку допустимого времени пребывания человека в аварийном помещении. Значения этой величины можно грубо оценить, используя данные табл. 3. Однако, пользуясь тем, что величина $m_{\text{и.}}(n_0, t)$ легко вычисляется, функция $\{m_{\text{и.}}(n_0, t)\}_t$ возрастает, значения величины t_* можно уточнить с помощью численных методов. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Видно, что при изменении начальной концентрации молекул ГФУ от $n_0 = 1.0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $n_0 = 3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ допустимое время пребывания в аварийном помещении изменяется от $t_* = 29$ мин 42 с до $t_* = 21$ с. Соответственно если $n_0 < 1.0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, то $t_* > 29$ мин 42 с, а если $n_0 > 3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, то $t_* < 21$ с. Очевидно, что в лучшем случае, когда авария застала человека рядом с выходом, когда в помещении не возник густой туман и не лишил человека ориентировки, когда человек имеет возможность быстро перемещаться, у него есть шанс выйти из помещения за вре-

Таблица 4

Допустимое время пребывания человека в аварийном помещении

$n_0, \text{м}^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{22}$	$3.5 \cdot 10^{22}$	$4.0 \cdot 10^{22}$	$6.0 \cdot 10^{22}$	$1.0 \cdot 10^{23}$	$2.0 \cdot 10^{23}$	$3.0 \cdot 10^{23}$
$t_*, \text{с}$	$1.782 \cdot 10^3$	$3.371 \cdot 10^2$	$2.751 \cdot 10^2$	$1.471 \cdot 10^2$	$7.284 \cdot 10^1$	$3.239 \cdot 10^1$	$2.093 \cdot 10^1$
t_*	29 мин 42 с	5 мин 37 с	4 мин 35 с	2 мин 27 с	1 мин 13 с	32 с	21 с

мя, меньшее одной минуты. Однако невыполнение любого из этих условий может увеличить время пребывания человека в зоне аварийного выброса ГФУ до 10–30 мин, что не однажды наблюдалось в реальных ситуациях [1].

Заключение

Вычислено время t_* пребывания человека в зоне аварийного выброса ГФУ, за которое он получает смертельно опасную дозу фтора за счет ингаляционного поступления.

При вычислении величины t_* рассматривались те значения начальной концентрации молекул ГФУ, при которых t_* лежит в пределах реального времени пребывания человека в аварийном помещении. Получены следующие результаты. При изменении начальной концентрации молекул ГФУ от $n_0 = 3.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $n_0 = 3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ допустимое время пребывания в аварийном помещении изменяется от $t_* = 5 \text{ мин } 37 \text{ с}$ до $t_* = 21 \text{ с}$. При температуре $t = 23^\circ \text{C}$ наибольшая возможная концентрация молекул газообразного ГФУ (концентрация насыщенных паров UF_6) составляет $n = 3.155 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Это значит, что массовая доза фтора в организме человека, способная привести к летальному исходу, достигается за короткое время уже при средних уровнях выброса гексафторида урана, которые имеют большую вероятность реализации.

Как показано в работе [7], при перкутанном поступлении фтора в организм человека для аналогичных величин справедливы следующие результаты. При изменении начальной концентрации молекул ГФУ от $n_0 = 3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ до $n_0 = 5.0 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ допустимое время пребывания в аварийном помещении изменяется от $t_* = 12 \text{ мин}$ до $t_* = 1 \text{ мин}$. Здесь значения начальной концентрации молекул ГФУ имеют значительно меньшую вероятность реализации. Это значит, что уже защита органов дыхания с большой вероятностью поможет сохранить жизнь человека. Поэтому требования к защите дыхательного тракта должны быть очень жесткими.

Полученная теоретическая зависимость для фтора $\{m_{\text{и}}(n_0, t)\}_{n_0, t}$ и выводы из нее должны стимулировать администрацию соответствующих предприятий обеспечить в цехах контроль концентрации молекул ГФУ в воздухе, научить людей фиксировать время пребывания в аварийном помещении. Эти величины необходимы лечащему персоналу в выборе (после оценки полученной дозы) мероприятий по облегчению состояния человека и его спасению.

Список литературы

1. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Мордашева В.В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // Радиационная медицина. Т. II. Радиационные поражения человека. М.: ИздАТ, 2001. С. 369.
2. Бадьин В.И., Пархоменко Г.М. и др. Гидролиз газообразного гексафторида урана в воздухе: Отчет предприятия п/я М-5122 и п/я В-2343. ИК № М 34559. М.: ЦНИИАтоминформ, 1976.
3. Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш., Надеждинский А.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2005. **18**, № 09. С. 785.
4. Shao-Wen Hu, Xiang-Yun Wang, Tai-Wei Chu, Xin-Qi Liu // J. Phys. Chem. A. 2008. **112**. P. 37.
5. Shao-Wen Hu, Hao Lin, Xiang-Yun Wang, Tai-Wei Chu // J. Mol. Struct. 2014. **1062**. P. 29.
6. Галибин Г.П., Новиков Ю.В. Токсикология промышленных соединений урана. М.: Атомиздат, 1976.
7. Бабенко С.П. // Медицина труда и промышленная экология. М., 2005. № 11. С. 30.
8. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. М., 2006. № 1. С. 36.
9. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. М., 2014. № 2. С. 22. (Babenko S.P., Bad'in A.V. // Moscow University Phys. Bull. 2014. **69**, N 2. P. 124.)
10. Morrow P.E. // Amer. Industr. Hygiene Assoc. J. 1964. **25**, N 3. P. 213.
11. Morrow P.E. // Health Physics. 1966. **12**, N 2. P. 173.
12. Morrow P.E. // Rev. Environ. Health. 1974. **1**. P. 186.
13. ICRP 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1–3).
14. ICRP 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4).
15. Мордашева В.В. Содержание и распределение урана в организме человека при различных путях поступления: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИБФ МЗ СССР, 1980.
16. Медико-экологические материалы по биологическим эффектам при поступлении соединений урана и фтора и допустимым уровням их поступления в организм человека. Отчет по теме «Подготовка данных для определения зависимости биологического эффекта от поступления гексафторида урана в организм человека с учетом вариабельности индивидуальной чувствительности». № 30612-01-0. 2002.
17. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1955.
18. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Атомная энергия. М., 2007. **103**, № 3. С. 198.
19. Osanov D.P., Ershov E.B., Klickov O.V., Rackova V.A. // Health Physics. 1971. **20**, N 6. P. 559.

Estimation of the permissible time for human presence in the zone of an emergency release of uranium hexafluoride with inhalation**S. P. Babenko^{1,a}, A. V. Bad'in^{2,b}, A. V. Ovchinnikov²**¹ *Department «Physics», Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia.*² *Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^a babenkosvetlana@mail.ru, ^b badyin@phys.msu.ru.*

This paper describes a complex model that allows one to calculate the mass of harmful substances that enter the human body in the conditions of an emergency release of uranium hexafluoride (UF_6) in a work space. It covers all parts of the process, from the pollution of the work environment by gaseous UF_6 , before the penetration of toxic substances in the body. The model is built based on the available data in the literature about the research on this subject. On the basis of numerical calculations carried out within the framework of the constructed model it is concluded that the predominant harmful role belongs to inhalation. It shows the relationship between the residence time in an emergency and the amount of fluorine taken into the body, which is the most toxic to humans. The allowable residence time of a person in an emergency release zone is estimated.

Keywords: titanium, fluorine, uranium hexafluoride, mathematical model, distribution function, percutaneous injection, inhalation.

PACS: 87.10.-e, 87.53.-j.

Received 1 April 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 5. Pp. 514–519.

Сведения об авторах

1. Бабенко Светлана Петровна — доктор техн. наук, доцент, профессор; тел.: (499) 263-63-68, e-mail: babenkosvetlana@mail.ru.
2. Бад'ин Андрей Валентинович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: badyin@phys.msu.ru.
3. Овчинников Алексей Витальевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: al.v.ovchinnikov@mail.ru.