

УДК 51-74; 51-76; 614.876; 614.878

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

С.П. Бабенко¹, А.В. Бадьин²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: babenkosvetlana@mail.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
e-mail: badyin@phys.msu.ru

Проведена количественная оценка воздействия гексафторида урана (UF₆) на сотрудников предприятий атомной промышленности. Рассмотрены различные условия, в которых может оказаться человек при аварийной ситуации разового выброса гексафторида урана, а также стационарные производственные условия, когда возможны слабые технологические выходы этого газа из емкостей для его хранения. Описана математическая модель процессов формирования и оседания гексафторида урана и продуктов его гидролиза в закрытом помещении. В ее рамках приведен расчетный метод определения концентрации атомов урана и фтора в воздухе рабочего помещения, плотности потока этих частиц при аварийном выбросе газообразного гексафторида урана и при стационарном производственном процессе. Эти величины являются определяющими в формировании доз по массе урана и фтора, проникающих в организм человека при ингаляционном и перкутанном поступлении. Даны уравнения, описывающие процесс загрязнения атмосферы производственного помещения и дальнейшего оседания продуктов гидролиза гексафторида урана на производственные поверхности. Рассмотрены условия и упрощающие предположения, при которых решаются исходные уравнения. Приведены полученные расчетным путем величины и распределение концентраций атомов урана и фтора в объеме рабочего помещения, лежащие в основе расчета доз наиболее значимого ингаляционного поступления урана и фтора.

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

ON PREDICTING TOXIC IMPACT OF URANIUM HEXAFLUORIDE DISCHARGES

S.P. Babenko¹, A.V. Bad'in²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: babenkosvetlana@mail.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
e-mail: badyin@phys.msu.ru

The quantitative assessment of uranium hexafluoride (UF₆) impact on workers of atomic industry factories is performed. The different conditions are considered in which a person can find oneself under the emergency with one-time uranium hexafluoride discharge, and the stationary production conditions are discussed when weak technological emissions of this gas are possible from the vessels for its storage.

A mathematical model of processes of formation and sedimentation of uranium hexafluoride and products of its hydrolysis in the enclosed space is described. The calculation method is given in the context of the model for determining the concentration of the uranium and fluorine atoms in the air of the working rooms, the density of a flow of these particles in case of emergency discharge of gaseous uranium hexafluoride and during the stationary production process. These quantities are governing in formation of the uranium and fluorine mass doses entering the human body through the inhalation and percutaneous penetration. The equations are given that describe a process of air pollution in the industrial room and subsequent sediment of products of uranium hexafluoride hydrolysis on the industrial surfaces. The conditions and simplifying suggestions are considered under which the initial equations are solved. The values calculated numerically and distribution of concentrations of the uranium and fluorine atoms in the volume of industrial room are given that underlie the calculation of doses of the most significant inhalation penetration of uranium and fluorine.

Keywords: uranium hexafluoride, uranium, fluorine, mathematical model, inhalation penetration, percutaneous penetration, dose.

Введение. В настоящей статье оценен уровень воздействия выходов гексафторида урана (UF_6 , ГФУ) на предприятиях атомной промышленности в зависимости от ситуаций, в которые попадает человек.

При комнатной температуре ГФУ — твердое вещество. На производстве ГФУ хранится в специальных емкостях при температуре, близкой к его температуре плавления [1]. При этом большая часть ГФУ находится в твердом или жидком агрегатном состоянии, а меньшая — в состоянии насыщенного пара. При указанной температуре давление насыщенного пара выше атмосферного [1]. Это способствует тому, что в обычном производственном процессе воздух загрязняется газообразным ГФУ. Возможны также случайные разовые выбросы ГФУ, которые приводят к резкому увеличению его концентрации в воздухе рабочего помещения.

Чтобы оценить профессиональный вред от работы с ГФУ и степень опасности попадания в аварийную ситуацию, необходимо уметь рассчитывать распределение ГФУ и продуктов его гидролиза в объеме рабочего помещения, определять максимально возможную концентрацию ГФУ в нем, плотность мощности струи разлета ГФУ из локального источника, а также плотность потока частиц на производственные поверхности. В данной статье изложены расчетные методы определения перечисленных величин. Подробно рассмотрен частный случай ингаляционного (через органы дыхания) поступления токсичных веществ в организм человека, которое играет основную роль в формировании поглощенной человеком дозы. В связи с этим была поставлена задача определения концентрации атомов урана и фтора в воздухе рабочего помещения в составе газов и аэрозолей.

Рассмотрим следующие условия, в которых может оказаться любой работник на производстве:

- 1) работник попал в аварийную ситуацию и пробыл в ней минуты или десятки минут;
- 2) работник не попадал в аварийную ситуацию, а спокойно проработал на предприятии в течение определенного количества лет;
- 3) работник попал в аварийную ситуацию, оказавшись под струей газа, выходящего из емкости для его хранения;
- 4) работник в момент аварии не попал под струю газа и имеет возможность выхода из аварийного помещения.

Методы исследования. Проведенное исследование основано на методах математического моделирования и экспериментально наблюдаемых фактах.

Экспериментальное наблюдение аварийной ситуации (ее моделирование) показало, что ГФУ выходит из емкости узкой струей, а затем, приблизительно за минуту, быстро расширяется и равномерно заполняет объем помещения [2, 3].

В настоящей статье первое (человек оказывается в атмосфере равномерно распределенного по объему помещения пара) и второе (человек не попадал в аварийную ситуацию, но проработал на предприятии много лет) условия будут рассмотрены более подробно.

Для расчета первых двух условий создана математическая модель процессов формирования и оседания ГФУ и продуктов его гидролиза в закрытом помещении. Математическая модель загрязнения производственной среды — первая составляющая комплексной модели формирования вредного воздействия ГФУ на организм человека в производственных условиях на сублиматных и обогатительных заводах [4, 5]. Цель ее построения — получить аналитические выражения и численные значения физических величин, характеризующих распределение и перемещение изучаемого вещества в производственном объеме, выразить их через начальную концентрацию ГФУ в аварийной ситуации или плотность мощности его источников в стационарном производственном процессе. Эти выражения используются при последующем расчете скорости депонирования токсичных веществ в организме человека при перкутанном (через кожу) и ингаляционном поступлениях [6, 7].

Появляющийся в воздухе ГФУ, взаимодействуя с парами воды, быстро гидролизуется, в результате чего в воздухе образуются три новых газа. Молекулы двух из них склонны к созданию сложных комплексных частиц (нуклеации). Поэтому в воздухе формируются сложные аэродисперсные системы. В общем случае описать все протекающие в таких системах процессы — очень сложная задача. В связи с этим она решалась с учетом принятых приближений, соответствующих реальным условиям рассматриваемых процессов:

— в начальный момент ГФУ равномерно распределен в пространстве;

— формирование аэрозольных частиц происходит за счет нуклеации [8–9];

— единственный внешний фактор, участвующий в процессах изменения концентрации молекул ГФУ, — воздухообмен в рабочем помещении. Остальные процессы, изменяющие концентрацию молекул, имеют внутренний характер. К ним относятся гидролиз, нуклеация, оседание молекул за счет силы тяжести, диффузионное перемещение молекул к границам раздела сред;

— все процессы ввода частиц и вывода их из рабочего объема линейны;

— в явном виде никакие процессы, перемешивающие возникающую в воздухе сложную систему газов и аэрозолей (термофорез, фотофорез, диффузиофорез, турбофорез, перемешивание естественной и принудительной конвекцией, за счет перемещения людей по рассматриваемому помещению [11–14]) не учитывались. Однако перемешивание без определения конкретных его видов учтено, так как приняты предположения, что воздухообмен в помещении реализуется через каждую точку пространства и что в начальный момент ГФУ равномерно распределен в пространстве.

Для описания распределения образовавшихся газов и аэрозолей в пространстве при аварийной и стационарной ситуациях использовались уравнения непрерывности. Приведем эти уравнения (без начальных и краевых условий):

для газов

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

для аэрозолей

$$\frac{\partial}{\partial t} n' = D(r) \Delta n' - (\vec{v}(r), \text{grad}(n')) - K n' + g_0(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m(\vec{x}, t),$$
$$\vec{x} \in Q, \quad t \in (0, +\infty),$$

где $n_k(\vec{x}, t)$ — 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 ; N — число изучаемых веществ в составе газов; $\{a_{k,m}\}_{m=1, N}^{k=1, N}$ — 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 ; Q — некоторая область в пространстве \mathbb{R}^3 ; $n'(r, \vec{x}, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул изучаемого вещества в составе аэрозольных частиц радиусом r в точке \vec{x} в момент времени t ; $D(r)$ — коэффициент диффузии аэрозольных частиц радиусом r ; $\vec{v}(r)$ — скорость дрейфа аэрозольных частиц радиусом r ; K — кратность воздухообмена; $g_0(r)$ — плотность вероятности попадания молекулы изучаемого вещества в процессе нуклеации в состав аэрозольной частицы радиусом r (g_0 — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации); r — радиус аэрозольных частиц (входит в рассматриваемую систему как параметр); b_1, \dots, b_N — коэффициенты, описывающие процесс нуклеации.

Решение указанных уравнений (после наложения начальных и краевых условий) позволяет найти выражения для концентраций атомов урана и фтора $n_U(\vec{x}, t)$, $n_F(\vec{x}, t)$ и плотностей их потоков $\vec{j}_U(\vec{x}, t)$, $\vec{j}_F(\vec{x}, t)$. К сожалению, исследовать записанные уравнения в общем случае невозможно. Однако можно подобрать упрощающие предположения, которые позволяют сделать уравнения решаемыми при сохранении правдоподобности модели.

Аварийная ситуация рассматривалась в следующих упрощающих предположениях:

- оседание частиц происходит в слое между плоскостями: $z = 0$, $z = h$ (h — высота рабочего помещения), воздухообмен отсутствует;
- в нулевой момент времени произошел разовый выброс ГФУ в воздух рабочего помещения (в дальнейшем утечки ГФУ в воздух рабочего помещения не происходит);
- в воздухе рабочего помещения есть газы и аэрозоли, содержащие изучаемые вещества (есть гидролиз и нуклеация газов);
- есть диффузия газов, отсутствует макроскопическое движение газов;
- нет диффузии аэрозолей, есть макроскопическое движение аэрозолей (аэрозольные частицы движутся только под действием силы тяжести и силы сопротивления среды);
- аэрозольные частицы, содержащие каждое из интересующих нас веществ, имеют разные радиусы, т.е. образуют полидисперсную систему аэрозолей.

Уравнения непрерывности для газов имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k = D_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} n_k + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m, \quad k = \overline{1, N}, \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty);$$

$$n_k|_{t=0} = n_{k,0}, \quad k = \overline{1, N}, \quad z \in (0, h);$$

$$n_k|_{z=0} = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad t \in (0, +\infty);$$

$$n_k|_{z=h} = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad t \in (0, +\infty),$$

где $n_k(z, t)$ — концентрация молекул вещества с номером k на высоте z в момент времени t ; $\{a_{k,m}\}_{m=\overline{1, N}}^{k=\overline{1, N}}$ — коэффициенты, описывающие процессы гидролиза и нуклеации; $n_{k,0}$ — концентрация молекул вещества с номером k в нулевой момент времени.

Система уравнений для газов решалась методом разделения переменных (методом Фурье). Однако во многих задачах можно пренебречь диффузией газов. В этом случае система уравнений для газов превращается в систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которой стандартным способом записывается с помощью собственных значений и собственных векторов матрицы $\{a_{k,m}\}_{m=\overline{1, N}}^{k=\overline{1, N}}$. Полученную модель (она тоже рассматривалась) нельзя использовать для описания перкутанного поступления токсичного вещества в составе газов в организм человека.

Уравнение непрерывности для аэрозолей имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} n' = v(r) \frac{\partial}{\partial z} n' + g_0(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m(t), \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty);$$

$$n'|_{t=0} = 0, \quad z \in (0, h);$$

$$n'|_{z=h} = 0, \quad t \in (0, +\infty),$$

где $n'(r, z, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул изучаемого вещества в составе аэрозольных частиц радиусом r на высоте z в момент времени t ; $v(r)$ — модуль скорости оседания аэрозольных частиц радиусом r (под действием силы тяжести и силы сопротивления среды). Модуль скорости $v(r)$ вычисляется по формуле

$$v(r) = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{m_1 g}{6\pi\eta r_1^3} r^2 = \gamma r^2,$$

где m_1 — масса молекулы изучаемого вещества; g — ускорение свободного падения; η — коэффициент вязкости воздуха; r_1 — радиус молекулы вещества.

Уравнение непрерывности для аэрозолей решалось методом характеристик.

Повседневные производственные условия рассматривались со следующими упрощающими предположениями:

- оседание частиц происходит в слое между плоскостями $z = 0$, $z = h$, имеется воздухообмен;

- в воздух рабочего помещения происходит постоянная утечка ГФУ;
- в воздухе рабочего помещения есть газы и аэрозоли, содержащие изучаемые вещества (есть гидролиз и нуклеация газов);
- есть диффузия газов, отсутствует макроскопическое движение газов (не происходит оседания газов);
- нет диффузии аэрозолей, есть макроскопическое движение аэрозолей;
- аэрозольные частицы образуют полидисперсную систему аэрозолей.

Система уравнений для газов имеет вид

$$D_k \frac{d^2}{dz^2} n_k + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m + F_k = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad z \in (0, h);$$

$$n_k|_{z=0} = 0, \quad k = \overline{1, N};$$

$$n_k|_{z=h} = 0, \quad k = \overline{1, N},$$

где $n_k(z)$ — концентрация молекул вещества с номером k на высоте z ; $\{a_{k,m}\}_{m=1, N}^{k=1, N}$ — коэффициенты, описывающие процессы гидролиза, нуклеации и воздухообмена; F_k — плотность мощности внешних источников молекул вещества с номером k .

Система уравнений для газов рассматривалась в так называемом приближении малой диффузии. При этом коэффициенты диффузии интерпретировались как малые параметры и использовались асимптотические методы (теория пограничных слоев) для построения приближенного решения. Однако во многих задачах можно полностью пренебречь диффузией газов. В этом случае система уравнений для газов превращается в систему линейных алгебраических уравнений. Поскольку (в данном случае) $\{a_{k,m}\}_{m=1, N}^{k=1, N}$ — нижнетреугольная матрица, для решения этой системы уравнений нетрудно записать рекуррентные формулы. Полученную модель (тоже рассматривалась) нельзя применять для описания перкутанного поступления токсичного вещества в составе газов в организм человека.

Уравнение для аэрозолей имеет вид

$$v(r) \frac{d}{dz} n' - K n' + g_0(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m = 0, \quad z \in (0, h);$$

$$n'|_{z=h} = 0,$$

где $n'(r, z)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул изучаемого вещества в составе аэрозольных частиц радиусом r на высоте z ; $v(r)$ — модуль скорости оседания аэрозольных

частиц радиусом r (под действием силы тяжести и силы сопротивления среды).

Уравнение для аэрозолей решалось методом вариации постоянной.

Результаты исследования. Согласно поставленной задаче, в статье приведены результаты расчета концентрации урана и фтора в воздухе рабочего помещения. Указанная задача лежит в основе расчета доз по массе урана и фтора, поступающих в организм человека ингаляционным путем.

Оценка доз для первого (работник попал в аварийную ситуацию и пробыл в ней минуты или десятки минут) и второго (работник не попадал в аварийную ситуацию, но проработал на предприятии много лет) условий осуществляется путем численных расчетов в рамках созданной модели. Значения концентрации атомов урана и фтора в воздухе рабочего помещения в составе аэрозолей в зависимости от времени приведены в таблице.

Значения концентрации атомов урана и фтора в воздухе рабочего помещения в составе аэрозолей в зависимости от времени

Время t	$n_{\infty,U}(z_0, t), \text{м}^{-3}$		$n_{\infty,F}(z_0, t), \text{м}^{-3}$	
	Аэрозоль	Сумма газов	Аэрозоль	Сумма газов
10 с	$1,225 \cdot 10^{19}$	$9,877 \cdot 10^{20}$	$2,13 \cdot 10^{20}$	3,79
20 с	$5,432 \cdot 10^{19}$	$9,454 \cdot 10^{20}$	$5,3 \cdot 10^{20}$	3,47
1 мин	$3,231 \cdot 10^{20}$	$6,631 \cdot 10^{20}$	$1,77 \cdot 10^{21}$	2,23
5 мин	$6,412 \cdot 10^{20}$	$2,71 \cdot 10^{19}$	$3,84 \cdot 10^{21}$	1,68
10 мин	$4,29 \cdot 10^{20}$	$4,239 \cdot 10^{17}$	$3,75 \cdot 10^{21}$	1,36
20 мин	$2,436 \cdot 10^{20}$	$1,035 \cdot 10^{14}$	$3,41 \cdot 10^{21}$	0
30 мин	$1,645 \cdot 10^{20}$	$2,526 \cdot 10^{10}$	$3,12 \cdot 10^{21}$	0
40 мин	$1,208 \cdot 10^{20}$	$6,168 \cdot 10^6$	$2,87 \cdot 10^{21}$	0
50 мин	$9,389 \cdot 10^{19}$	$1,51 \cdot 10^3$	$2,67 \cdot 10^{21}$	0
1 ч	$7,478 \cdot 10^{19}$	$3,68 \cdot 10^{-1}$	$2,49 \cdot 10^{21}$	0
1,5 ч	$4,384 \cdot 10^{19}$	0	$2,49 \cdot 10^{21}$	0
2 ч	$2,901 \cdot 10^{19}$	0	$1,77 \cdot 10^{21}$	0
6 ч	$4,571 \cdot 10^{18}$	0	$7,88 \cdot 10^{21}$	0
1 сут.	$2,34 \cdot 10^{17}$	0	$1,62 \cdot 10^{21}$	0
10 сут.	$3,239 \cdot 10^{14}$	0	$2,55 \cdot 10^{20}$	0

Примечание. Аварийная ситуация. Полидисперсные аэрозоли, $r_g = 2,744 \text{ мкм}$, $z_0 = 1,5 \text{ м}$, $n_{0,\infty,U} = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $n_{0,\infty,F} = 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

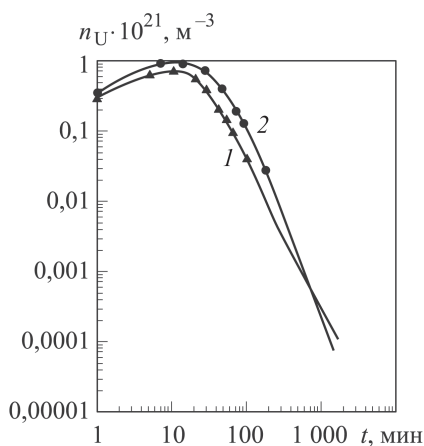


Рис. 1. Зависимости концентрации атомов урана от времени, построенные по полидисперсной модели (1) и по результатам эксперимента (2)

Зависимости концентрации атомов урана от времени, построенные по полидисперсной модели (кривая 1) и по результатам эксперимента (кривая 2) представлены на рис. 1. Кривые находятся в хорошем соответствии друг с другом, поэтому можно утверждать, что принятые приближения, с учетом которых решалась задача, хорошо описывают реальные процессы.

На рис. 2 приведены зависимости концентрации n от высоты z для стационарной задачи (т.е. в повседневных производственных условиях). В качестве параметра кривых принят коэффициент воздухообмена K , значение которого изменялось в диапазоне $0 \dots 10$.

Значения концентраций соответствуют наиболее распространенному производственному режиму, когда объемная плотность активности урана в газовой фазе в воздухе рабочего помещения составляет $A_V = 3,7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³.

Зависимость концентрации урана и фтора в составе всех газов, образующихся при гидролизе ГФУ, от высоты приведена на рис. 2, а и б.

В соответствии с рассмотренными зависимостями было установлено, что

- 1) газы распределены в пространстве равномерно;
- 2) концентрация фтора на порядок выше концентрации урана;
- 3) воздухообмен приводит к незначительному изменению концентрации токсичного вещества в составе газов.

На рис. 2, в и г показаны зависимости концентрации атомов урана и фтора в составе всех аэрозолей от высоты. Определено, что

1) суммарная концентрация атомов урана на аэрозолях различных размеров при всех указанных значениях коэффициентов воздухообмена зависит от высоты z . В отсутствие воздухообмена концентрация уменьшается в 5 раз при увеличении значения z в диапазоне $0,5 \dots 2,5$ м. При наличии воздухообмена эта зависимость не очень резкая, концентрация снижается примерно в 2–2,5 раза в том же диапазоне значений высоты z ;

2) воздухообмен способствует уменьшению концентрации атомов урана на уровне роста человека (1,5 м, примерный уровень входа

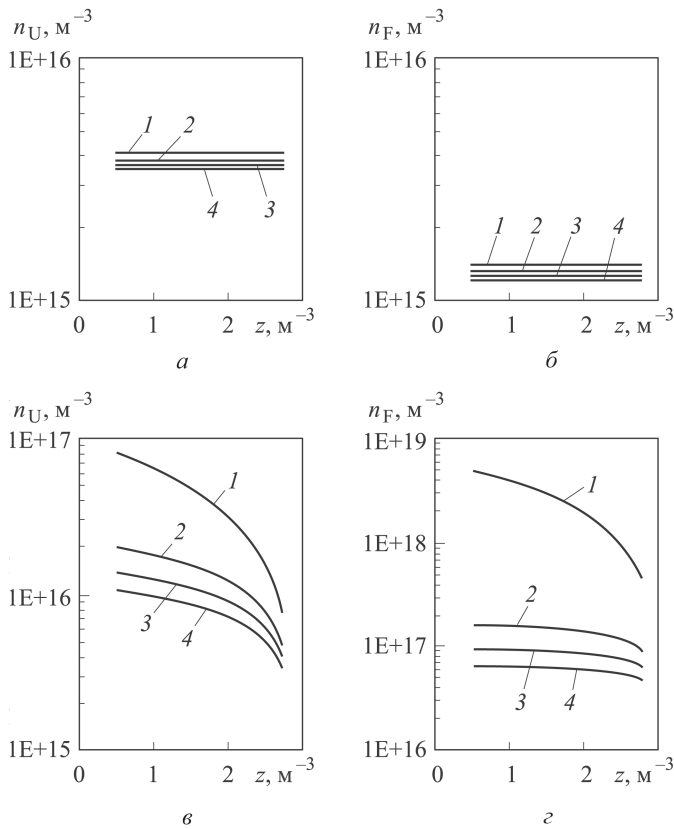


Рис. 2. Зависимость концентрации урана (а, в) и фтора (б, г) от высоты при $K = 0$ (1), 3 (2), 5 (3) и 7 (4) ч^{-1} в составе всех газов (а, б) и аэрозолей (в, г)

продуктов гидролиза в органы дыхания человека) в 3,1 раза для $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, в 4,3 раза для $K = 5 \text{ ч}^{-1}$ и в 5,5 раз для $K = 7 \text{ ч}^{-1}$, т.е. переход от режима работы с $K = 0 \text{ ч}^{-1}$ к режиму работы с $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ уменьшает концентрацию урана на аэрозолях в 3,1 раза, а переход от режима с $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ к режиму с $K = 5 \text{ ч}^{-1}$ — только в 1,4 раза;

3) с увеличением высоты z концентрация атомов урана в аэрозольной фазе уменьшается, а в газовой фазе не изменяется. Поэтому с возрастанием высоты z процент урана в газовой фазе увеличивается;

4) концентрация фтора в составе аэрозолей в отсутствие воздухообмена также уменьшается примерно в 5 раз при увеличении высоты z с 0,5 до 2,5 м. Начиная со значения $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ зависимость $n(z)$ практически исчезает;

5) воздухообмен уменьшает концентрацию атомов фтора на уровне роста человека (1,5 м) в 20 раз для $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, в 32 раза для $K = 5 \text{ ч}^{-1}$ и в 46 раз для $K = 7 \text{ ч}^{-1}$, т.е. переход от режима работы с $K = 0 \text{ ч}^{-1}$ к режиму с $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ снижает концентрацию фтора в аэрозолях различных размеров в 20 раз, а переход от режима с $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ к режиму с $K = 5 \text{ ч}^{-1}$ — только в 1,6 раза;

б) как и для урана, с увеличением высоты z процент фтора в газовой фазе увеличивается по сравнению с процентом фтора в аэрозольной фазе.

Итак, в соответствии с изложенным выше можно сделать следующие выводы:

- для более мелких частиц (фтор) имеет место более равномерное распределение их в пространстве;
- наибольшее влияние на концентрацию атомов урана и фтора воздухообмен оказывает при переходе от значения $K = 0$ до $K = 3 \text{ ч}^{-1}$.

В присутствии воздухообмена распределение концентрации фтора практически равномерно на тех уровнях ($z = 0,5 \dots 2,5$ м), на которых обычно располагаются рабочие места и поэтому устанавливаются измерительные приборы.

Рассмотрим третье условие, когда человек в момент аварии оказывается под струей разлета ГФУ из емкости для его хранения. В промежутке времени, в течение которого газ, выходя из емкости узкой струей, еще не расширился, но уже охладился до комнатной температуры, он перенасыщен. При $t = 23^\circ\text{C}$ давление насыщенных паров $p_{\text{н.п}} = 100$ мм рт. столба [1], что соответствует концентрации насыщенного пара $n = 3,26 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Получаемое человеком количество токсичных веществ, образующихся в аварийной ситуации в воздухе рабочих помещений производств, использующих ГФУ, зависит от расположения человека относительно источника выброса и времени пребывания в этих условиях.

Оценка дозы, получаемой человеком, оказавшимся на пути выходящей струи пара, проводилась так. Учитывалось, что в модельном эксперименте выброс определенного количества ГФУ (37,4 г) реализовывался за $\Delta t = 50$ с [2]. Это соответствовало скорости выброса массы ГФУ $\Delta m_{\text{УФ}_6} / \Delta t = 0,76$ г/с и скорости выброса массы фтора $\Delta m_{\text{F}} / \Delta t = 0,25$ г/с. Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [15], разовое поступление фтора в организм человека смертельно при $m_{\text{F CM}} = 330$ мг. При наблюдавшейся в эксперименте скорости выброса ГФУ смертельная доза фтора может быть получена человеком, попавшим в струю газа, за время $(m_{\text{F CM}} \Delta t) / \Delta m_{\text{F}} = 1,32$ с. Следовательно, попадание человека в струю газа означает его неминуемую гибель. Это подтвердилось в реальной жизненной ситуации [15].

Если в следующий после выброса ГФУ момент у человека будет возможность быстрого выхода из аварийного помещения, пока еще ГФУ и продукты его гидролиза не распределились по всему объему помещения, человек может обойтись без серьезных последствий.

Заключение. Наибольший вред приносит человеку попадание в не разлетевшуюся по объему помещения струю ГФУ. Как показывает практика, такое воздействие кончается летальным исходом. В подобную ситуацию попадает человек, который в момент выброса оказывается рядом с аварийной емкостью [15].

В соответствии с модельным экспериментом [2, 3] гидролиз и распределение продуктов гидролиза по объему происходит за одну минуту. Поэтому люди, находящиеся настолько близко от выхода, что смогут выйти из производственного помещения за это время, не получат заметной дозы токсичного вещества.

После распределения продуктов гидролиза ГФУ по всему объему помещения человек вместе с вдыхаемым воздухом начнет пропускать в организм токсичные вещества (ингаляционное поступление). Величина этого поступления зависит от концентрации молекул в воздухе в момент выброса, времени нахождения работника в помещении, временной зависимости изменения концентрации в объеме (см. рис. 1) [6].

Исходя из рассчитанного в стационарных условиях распределения концентрации токсичных веществ, можно утверждать следующее. Ингаляционное поступление токсичных веществ в организм человека при прочих равных условиях будет зависеть от расположения его рабочего места. Перкутанное поступление зависит только от концентрации токсичных веществ в составе газов [6, 7], которые равномерно распределяются по всем высотам, и не будет зависеть от расположения рабочего места человека.

Зависимость концентрации на определенной высоте от коэффициента воздухообмена позволяет сделать вывод о том, что в целях экономии можно использовать кратность воздухообмена $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ вместо $K = 5 \text{ ч}^{-1}$, при этом условия труда практически не ухудшаются.

Анализ рассчитанного значения распределения концентрации в пространстве позволяет упростить решение вопроса о расположении приборов, измеряющих концентрацию урана в газовой и аэрозольной фазах в различных исследовательских целях и для определения наиболее безопасного расположения работников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Таблицы физических величин: Справочник* / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с. С. 89–100.
2. *Мирхайдаров А.Х.* Исследование закономерностей загрязнения воздушной среды и поверхностей в производстве разделения изотопов урана: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 217 с.
3. *Мирхайдаров А.Х., Бабенко С.П., Бадьин В.И.* Некоторые аспекты аварийных ситуаций на урановых заводах // Известия Академии промышленной экологии. 2002. № 1. С. 67–71.

4. *Бабенко С.П., Бад'ин А.В.* Комплексная модель формирования вредного воздействия гексафторида урана на организм человека в условиях аварийной ситуации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2007. № 3 (26). С. 89.
5. *Бабенко С.П.* Прогнозирование радиационного и токсического воздействия выбросов гексафторида урана методами математического моделирования: Дис. . . . д-р тех. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 375 с.
6. *Бабенко С.П.* О расчете эффективных доз, получаемых человеком при перкутанном поступлении урана во время аварийной ситуации на производствах, работающих с гексафторидом урана // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 38–43.
7. *Бабенко С.П., Бад'ин А.В.* Математическая модель ингаляционного и перкутанного поступлений в организм человека токсичных веществ на предприятиях атомной промышленности // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. № 3. С. 13–22.
8. *Галкин Н.П., Крутиков А.Б.* Технология фтора. М.: Атомиздат, 1968. 188 с.
9. *Петрянов-Соколов И.С., Сутугин А.Г.* Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 144 с.
10. *Химия фтористых соединений актинидов / Топанаев И.В., Николаев Н.С., Лукьянычев Ю.А. и др.* М.: Изд-во АН СССР, 1963. 166 с.
11. *Белоусов В.В.* Теоретические основы процессов газоочистки. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
12. *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию / пер. с англ.; под ред. Б.Ф. Садовского. М.: Мир, 1987. 280 с.
13. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
14. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М. Изд-во АН СССР, 1955. 363 с.
15. *Гастева Г.Н., Бад'ин В.И., Молоканов А.А. и др.* Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции. Радиационная медицина. Т. 2. М.: ИздАт, 2001. С. 369–389.

REFERENCES

- [1] Kikoin I.K. Tablitsy fizicheskikh velichin: Spravochnik [Database tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
- [2] Mirkhaydarov A.Kh. Issledovanie zakonornostey zagryazneniya vozdushnoy sredy i poverkhnostey v proizvodstve razdeleniya izotopov urana. Diss. kand. tekhn. nauk [Study pollution relationships of air and surfaces in the production of uranium isotope separation. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1978. 217 p.
- [3] *Izv. Akad. Promyshlennoy Ekologii* [Bull. Acad. Industrial Ecology], 2002, no. 1, pp. 67–71 (in Russ.).
- [4] Babenko S.P., Bad'in A.V. Integrated model of the harmful effects of uranium hexafluoride on the human body under emergency conditions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2007, vol. 26, no. 3, pp. 89–100 (in Russ.).
- [5] Babenko S.P. Prognozirovanie radiatsionnogo i toksicheskogo vozdeystviya vybrosov geksaforida urana metodami matematicheskogo modelirovaniya. Diss. dokt. tekhn. nauk [Prediction of radiate and toxicological effects of uranium hexafluoride injection using mathematical simulation methods. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 375 p.
- [6] Babenko S.P. O raschete effektivnykh doz, poluchaemykh chelovekom pri perkutannom postuplenii urana vo vremya avariynoy situatsii na proizvodstvakh, rabotayushchikh s geksaforidom urana [On calculation of effective doses received by a person at percutaneous injection of uranium during an incident on the manufactures dealing with uranium hexafluoride]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry], 2005, no. 10, pp. 38–43 (in Russ.).

- [7] Babenko S.P., Bad'in A.V. A mathematical model of percutaneous and inhalation injection of toxic substances into the human organism in the nuclear industry. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematic simulation], 2006, vol. 18, no. 3, pp. 13–22 (in Russ.).
- [8] Galkin N.P., Krutikov A.B. *Tekhnologiya flora* [Process engineering of fluorine]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 188 p.
- [9] Petryanov-Sokolov I.S., Sutugin A.G. *Aerозоли* [The aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 144 p.
- [10] Topanaev I.V., Nikolaev N.S., Luk'yanychev Yu.A., Alenchikova I.F. *Khimiya floristykh soedineniy aktinidov* [Chemistry of actinide fluorides]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963. 166 p.
- [11] Belousov V.V. *Teoreticheskie osnovy protsessov gazoochistki* [Theoretical fundamentals of gas purification processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 256 p.
- [12] Reist Parker C. *Introduction to aerosols science*. Macmillan Publ. Company Incorporated, 1984. 299 p. (Russ. ed.: Rayst P. *Aerозоли. Vvedenie v teoriyu*. Moscow, Mir Publ., 1987. 280 p.).
- [13] Teverovskiy E. N., Dmitriev E.S. *Perenos aerозоl'nykh chastits turbulentnymi potokami* [Aerosol particles transfer by turbulent flows]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 160 p.
- [14] Fuks N.A. *Mekhanika aerозолей* [Mechanics of aerosols]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955. 363 p.
- [15] Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A. *Radiatsionnaya meditsina. T. 2. Klinicheskaya toksikologiya khimicheskikh soedineniy urana pri khronicheskoy ekspozitsii* [Radiation medicine. Vol. 2. Clinical toxicology of chemical compounds of uranium at chronic exposure]. Moscow, Izdat Publ., 2001, pp. 369–389.

Статья поступила в редакцию 18.12.2013

Светлана Петровна Бабенко — д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 25 научных работ в области токсического и радиологического воздействия на организм человека веществ, загрязняющих атмосферу рабочих помещений предприятий атомной промышленности вследствие технологических выходов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.P. Babenko — Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Phys.–Math.), professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 25 publications in the field of toxic and radiological impact on the human body of substances polluting the air of working rooms of atomic industry factories due to technological outputs.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Андрей Валентинович Бад'ин — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математики Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор 16 научных работ в области дифференциальной геометрии “в целом”, нелинейных уравнений математической физики, применения методов математической физики в дозиметрии.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1.

A.V. Bad'in — Cand. Sci. (Phys.–Math.), assoc. professor of mathematics department of the Faculty of Physics of the Lomonosov Moscow State University. Author of 16 publications in the field of differential geometry “as a whole”, nonlinear equations of mathematical physics, application of methods of mathematical physics in dosimetry.

Lomonosov Moscow State University, ul. Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russian Federation.