

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53.072: 504.5

## ДИСПЕРСНОСТЬ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Бабенко С.П. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Бадьин А.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Гидролиз сопровождается выбросом гексафторида урана ( $UF_6$ ) в воздух производственного помещения [1]. Возникающие при этом газообразные и аэрозольные продукты отрицательно воздействуют на организм человека, что требует количественного учета их попадания внутрь [2, 3].

Ингаляционное поступление аэрозолей в организм человека подробно изложено в рекомендациях МКРЗ [4, 5]. Задержка аэрозольных частиц в дыхательном тракте зависит от их дисперсности, определение которой представляет собой сложную задачу. Определение коэффициента задержки упрощается для частиц, распределение размера которых описывается логарифмически нормальным законом. Результат расчета коэффициента задержки таких аэрозольных частиц приведен в публикации МКРЗ [5] в форме графической зависимости коэффициента задержки  $\xi$  от активностного медианного аэродинамического диаметра. Определение распределения размера аэрозольных частиц и выяснение степени ее приближения к логарифмически нормальному закону имеет важное практическое значение.

В работе [6] приведены данные о распределении аэрозольных частиц уранил-фторида и фтористого водорода, формирующихся при столкновении молекул этих соединений в условиях аварийного выброса гексафторида урана. Показано, что распределение аэрозольных частиц  $g(r)$  описывается логарифмически нормальным законом. Там же показано, что включение аэрозольных частиц в процесс оседания с разной скоростью дрейфа приводит к формированию нового распределения размера аэрозольных частиц  $g_1(r, z, t)$ , которое становится также функцией времени и координаты частицы, отсчитываемой по вертикали от пола к потолку.

В настоящей работе функция  $g_1(r, z, t)$  определена для двух моделей загрязнения производственной среды. Эти функции сопоставлены одна с другой и с распределением  $g(r)$ , формирующимся при нуклеации. Обоснована возможность использования функции  $g(r)$  для расчета количества урана и фтора, попадающих в организм человека.

Первая модель базируется на следующих предположениях: частицы оседают в плоском слое, в воз-

духе рабочего помещения есть аэрозоли, но нет газов, содержащих уран и фтор (гидролиз и нуклеация газов быстро закончились), аэрозольные частицы движутся только под действием силы тяжести и силы сопротивления среды, имеют разный радиус, т.е. образуют полидисперсную систему. Система уравнений непрерывности имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} n' = v(r) \frac{\partial}{\partial z} n'; \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n'|_{z=h} &= 0; & t \in (0, +\infty); \\ n'|_{t=0} &= n_{\infty,0}(z)g(r); & z \in (0, h), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r$  — радиус аэрозольной частицы;  $h$  — высота рабочего помещения;  $z$  — координата, отсчитываемая по вертикали от пола к потолку рабочего помещения;  $t$  — время, отсчитываемое от момента выброса гексафторида урана;  $n'(r, z, t)$  — удельная концентрация молекул рассматриваемого вещества в составе аэрозольных частиц радиусом  $r$  на высоте  $z$  в момент времени  $t$  (т.е. концентрация молекул, приходящаяся на единичный интервал радиуса аэрозольных частиц около радиуса  $r$ );  $v(r)$  — скорость дрейфа аэрозольной частицы радиусом  $r$ ;  $v(r) = \gamma r^2$ , где  $\gamma$  — постоянная величина;  $n_{\infty,0}(z)$  — концентрация молекул рассматриваемого вещества в составе всех аэрозольных частиц на высоте  $z$  в нулевой момент времени;  $g$  — дифференциальная функция распределения радиуса аэрозольных частиц, образующихся при нуклеации (т.е. плотность вероятности того, что при нуклеации молекула рассматриваемого вещества попадет в аэрозольную частицу радиусом  $r$ ). Далее используются следующие обозначения:

$$n(r, z, t) = \int_0^r d\tilde{r} n'(\tilde{r}, z, t) \quad \text{— концентрация молекул}$$

рассматриваемого вещества в составе аэрозольных частиц радиусом  $\tilde{r} \leq r$  на высоте  $z$  в момент времени

$$t; \quad n_{\infty}(z, t) = \lim_{r \rightarrow +\infty} n(r, z, t) = \int_0^{+\infty} d\tilde{r} n'(\tilde{r}, z, t) \quad \text{— концент-}$$

рация молекул в составе всех аэрозольных частиц на высоте  $z$  в момент времени  $t$ ;  $g_1(r, z, t) =$

$= n'(r, z, t)/n_\infty(z, t)$ ,  $G_1(r, z, t) = n(r, z, t)/n_\infty(z, t)$  — дифференциальная и интегральная функции распределения радиуса аэрозольных частиц на высоте  $z$  в момент времени  $t$ .

Решая систему уравнений (1), (2) методом характеристик, получаем

$$n'(r, z, t) = n_{\infty,0} g(r) H(h - z - v(r)t), \quad (3)$$

где  $H$  — функция Хевисайда ( $H(u) = 0$  при  $u \in (-\infty, 0)$ ,  $H(u) = 1$  при  $u \in [0, +\infty)$ ). Предполагается, что  $n_{\infty,0}(z) = n_{\infty,0}$ . Интегрируя выражение (3), получаем

$$\begin{aligned} n(r, z, t) &= n_{\infty,0} G(r), \quad z + v(r)t \leq h; \\ n(r, z, t) &= n_{\infty,0} G(R(z, t)), \quad z + v(r)t > h. \end{aligned}$$

Здесь  $R(z, t)$  — решение уравнения  $z + v(r)t = h$  относительно  $r$  при заданных  $z$  и  $t$ . Тогда

$$n_\infty(z, t) = n_{\infty,0} G(R(z, t)).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} g_1(r, z, t) &= \frac{g(r) H(h - z - v(r)t)}{G(R(z, t))}; \\ G_1(r, z, t) &= \frac{G(r)}{G(R(z, t))}; \quad z + v(r)t \leq h; \\ G_1(r, z, t) &= 1, \quad z + v(r)t > h. \end{aligned}$$

Особенностью второй модели по сравнению с первой является предположение о том, что в воздухе рабочего помещения, кроме аэрозолей, есть и газы, причем диффузией газов можно пренебречь. Поэтому для второй модели записывалась система уравнений непрерывности для газов

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n_k &= \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m, \quad k = \overline{1, N}, \quad t \in (0, +\infty); \\ n_k|_{t=0} &= n_{k,0}(z), \quad k = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где  $N$  — число рассматриваемых веществ в составе газов;  $n_k(z, t)$  — концентрация молекул вещества с номером  $k$  на высоте  $z$  в момент времени  $t$ ;  $a_{k,m}$  — коэффициенты, описывающие процессы гидролиза и нуклеации;  $n_{k,0}(z)$  — концентрация молекул вещества с номером  $k$  на высоте  $z$  в нулевой момент времени.

Система уравнений непрерывности для аэрозолей при наличии газов имеет вид

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

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

где  $g$  — дифференциальная функция распределения радиуса аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации;  $b_m$  — коэффициент, описывающий нуклеацию.

Решая систему уравнений для газов, получаем

$$n_k(z, t) = \sum_{m=1}^N \chi_{k,m} C_m(z) \exp(-\delta_m t),$$

где  $-\delta_1, \dots, -\delta_N$  — собственные значения матрицы  $A$ ;  $\chi_1, \dots, \chi_N$  — линейно независимые собственные векторы матрицы  $A$ ; коэффициенты  $C_1, \dots, C_N$  определяются как решение следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{m=1}^N \chi_{k,m} C_m = n_{k,0}(z), \quad k = \overline{1, N}.$$

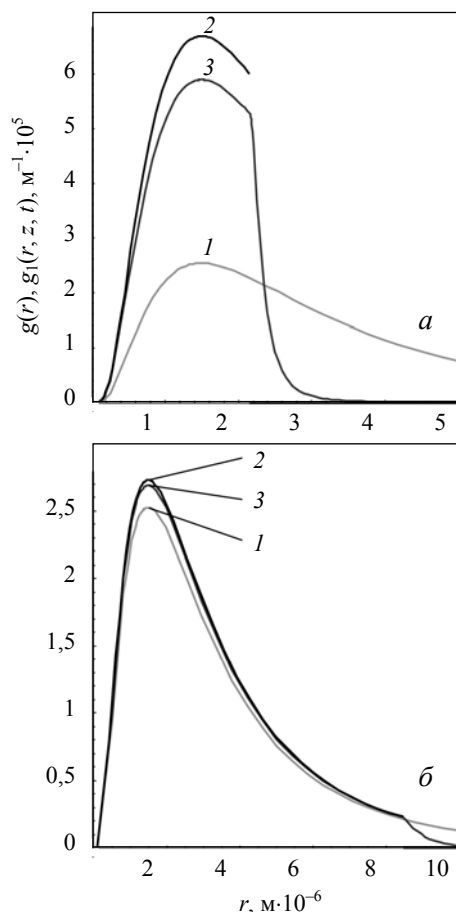
Решая систему уравнений для аэрозолей методом характеристик, получаем

$$\begin{aligned} n'(r, z, t) &= g(r) \sum_{j=1}^N \left( \sum_{m=1}^N b_m \chi_{m,j} \right) C_j \frac{1}{\delta_j} (1 - \exp(-\delta_j t)); \\ z + v(r)t &\leq h; \\ n'(r, z, t) &= g(r) \sum_{j=1}^N \left( \sum_{m=1}^N b_m \chi_{m,j} \right) \times \\ &\times C_j \frac{1}{\delta_j} \left\{ \exp \left[ -\delta_j \left( t - \frac{h-z}{v(r)} \right) \right] - \exp(-\delta_j t) \right\}; \\ z + v(r)t &> h; \\ n_\infty(z, t) &= \sum_{j=1}^N \left( \sum_{m=1}^N b_m \chi_{m,j} \right) C_j \frac{1}{\delta_j} \left\{ -\exp(-\delta_j t) + \right. \\ &+ \bar{G}(R(z, t), r_g) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\ln(R(z, t)) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g)\sqrt{2}}}^{+\infty} dx \times \\ &\times \exp \left[ -x^2 - \delta_j \left( t - \frac{h-z}{v(r)} \exp(-x \ln(\beta_g) 2\sqrt{2}) \right) \right] \Bigg\}. \end{aligned}$$

Здесь предполагается, что  $g(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln(\beta_g)}} \frac{1}{r} \times$

$$\begin{aligned} &\times \exp \left[ - \left( \frac{\ln(r) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g)\sqrt{2}} \right)^2 \right], \quad r_g > 0; \quad \beta_g > 1; \quad n_{k,0}(z) = \\ &= n_{k,0}. \end{aligned}$$

Используя приведенные выражения для  $n'(r, z, t)$ ,  $n_\infty(z, t)$ , можно вычислить  $n(r, z, t)$ ,  $g_1(r, z, t)$ ,  $G_1(r, z, t)$  и для наглядности изобразить их графически (см. рисунок). Видно, что распределе-



Распределение радиуса аэрозольных частиц уранил-фторида (а) и фтористого водорода (б) на высоте  $z_0 = 1,5$  м в момент времени 10 мин: 1 —  $g(r)$ ; 2 —  $g'_1(r, z, t)$ , первая модель; 3 —  $g''_1(r, z, t)$ , вторая модель

ние  $g_1(r, z, t)$  описывается логарифмически нормальным законом лишь приближенно. При этом характер зависимостей  $g'_1(r, z, t)$  и  $g''_1(r, z, t)$  (рассматривается зависимость от переменной  $r$ , переменные  $z$  и  $t$  выступают как параметры) для обеих моделей близок. Их отличие заключается в том, что во второй модели усечение кривой логарифмически нормального распределения размыто относительно некоторого значения  $r$ . Функции распределения нормированы.

По виду этих кривых можно сказать следующее. За реальное время, которое человек может находиться в аварийной ситуации, распределение радиуса аэрозольных частиц уранил-фторида меняется от своего исходного в момент выброса гексафторида урана значительно, а распределение радиуса аэрозольных частиц фтористого водорода почти не меняется. Это связано с тем, что при заданном размере частицы уранил-фторида значительно тяжелее и соответственно усечение исходной функции распределения происходит при гораздо меньшем радиусе. Поэтому функция  $g(r)$  хорошо описывает поступление фтора в организм в составе аэрозольных частиц фтористого водорода. Однако для расчета поступления урана в составе аэрозольных частиц уранил-фторида в организм человека, задержавшегося в аварийной ситуации более 10 мин, необходимо пользоваться более сложной зависимостью  $g_1(r, z, t)$ . Оценка показывает, что при этом рассчитанную по функции  $g(r)$  дозу следует увеличить в 1,5 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Uranium Hexafluoride** — Safe Handling, Processing, and Transporting. Proc. Conf. Oak Ridge, USA, May 24—26, 1988.
2. **Петрянов-Соколов И.С., Сутугин А.Г.** Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 144 с.
3. **Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Мордашева В.В.** Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции. — Рад. медицина, 2001, т. 2, с. 369—389.
4. **Пределы** поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением. Публикация № 30 МКРЗ. Ч. 1. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1982. 136 с.
5. **Human respiratory tract model for radiological protection.** ICRP Publication 66. — An. ICRP, 1994, v. 24, № 4, p. 1—482.
6. **Бабенко С.П., Бадьин А.В.** Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранил-фторида. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 5, с. 353—358.

Поступило в Редакцию 11.12.06

УДК 621.039.58

### ПЕНООБРАЗУЮЩИЕ СОСТАВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЯТЦ

Степанов А.И., Тишков В.П. (НПО «Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина»),  
Степанов И.К. (Ленинградский спецкомбинат «Радон»),  
Доильницын В.А. (СПб гос. технологический ин-т)

При штатной эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, а также возникновении на них аварийных ситуаций возникает необходимость проведения профилактических противопожарных

мероприятий или прямых действий по тушению пожаров. Так, на АЭС нашей страны в период с 1981 по 1997 г. было зарегистрировано 144 пожара и возго-