

УДК 53.072; 504.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ГИДРОЛИЗА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА, ОСЕДАЮЩИХ НА КОЖУ ЧЕЛОВЕКА ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ

С. П. Бабенко¹, А. В. Бадъин²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва (e-mail: babenkosp@mtu-net.ru);

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва (e-mail: badyin@phys.msu.ru)

Рассмотрены модели загрязнения производственной среды при аварийном выбросе газообразного гексафторида урана в воздух рабочего помещения и для практического использования отобрана модель, которая лучше соответствует экспериментальным данным. Показано, что доза, получаемая человеком при перкутантном поступлении урана, определяется газовыми компонентами продуктов гидролиза гексафторида урана.

Ключевые слова: гексафторид урана, перкутанное поступление, математическая модель.

DETERMINATION OF STATE OF MATTER OF HYDROLYSIS PRODUCTS OF URANIUM HEXAFLUORIDE FALLING ON HUMAN SKIN WITH EMERGENCY DISCHARGE

S. P. Babenko¹, A. V. Bad'in²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow (e-mail: babenkosp@mtu-net.ru);

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

Two models of the industrial environment contamination with emergency discharge of gaseous uranium hexafluoride into the air of the working room are constructed. The model that best matches the experimental data is chosen for the practical use. It is shown that a dose acquired by a man in percutaneous absorption of uranium is determined by the gas components of the hydrolysis products of uranium hexafluoride.

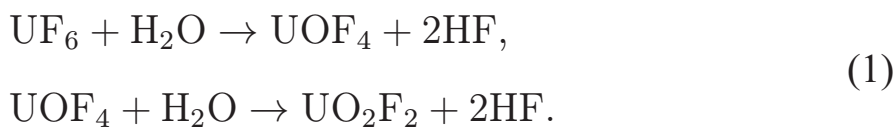
Keywords: uranium hexafluoride, percutaneous absorption, mathematical model.

Гексафторид урана (UF₆, ГФУ) является основным рабочим веществом в технологиях обогащения природного урана изотопом U²³⁵. С этими технологиями неразрывно связаны перспективы развития атомной энергетики, которой в настоящее время в России, как и во всех цивилизованных странах, уделяется очень большое внимание.

Известно, что гексафторид урана представляет большую токсическую и радиологическую опасность для человека [1]. В настоящей

работе рассматривается один из вопросов, которые нужно решить для обеспечения возможности расчета дозы, которую получает человек при перкутанном (через кожу) поступлении продуктов гидролиза UF_6 в организм. Он заключается в определении агрегатного состояния (газы или аэрозоли), в котором продукты гидролиза ГФУ оседают на кожу человека. Для решения этой задачи проводилась верификация модели, построенной для расчета загрязнения производственной среды. Сравнивались рассчитанная поверхностная плотность массы урана $\rho_{S,U}$, кг/м², осевшего на кожу человека и производственные поверхности к моменту времени t , и поверхностная плотность массы урана, осевшего на кожу человека и производственные поверхности к моменту времени t , полученная в эксперименте, моделирующем ситуацию аварийного выброса гексафторида урана на предприятии атомной промышленности [4, 6].

При построении модели загрязнения производственной среды использованы следующие положения. Рассматривается некоторая ограниченная область Q в трехмерном координатном пространстве и некоторый промежуток времени (t_0, T) . Вещество UF_6 (газ) поступает в каждую точку области Q и сразу же начинается процесс гидролиза, протекающий по схеме [2, 3]



Вещества UO_2F_2 и HF переходят из газообразного состояния в состояние аэрозоля (за счет процесса нуклеации), и за короткое время ($\Delta t \approx 50$ с [4]), в области Q появляются следующие вещества: UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль). Они выводятся из области Q за счет воздухообмена (предполагается, что частицы каждого вещества исчезают в каждой точке области), диффузионно оседают на границу области Q , дрейфуют в пространстве (под действием силы тяжести и силы сопротивления среды или вместе с потоком воздуха). Предполагается, что все аэрозольные частицы, содержащие молекулы одного из интересующих веществ, имеют одинаковый радиус, т.е. образуют монодисперсную систему аэрозолей.

Далее рассматриваются отдельно уравнения для урансодержащих и фторсодержащих веществ. Поэтому систему уравнений неразрывности для концентраций молекул веществ удобно записать в общем виде [7]

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k = D_k \Delta n_k - (\vec{v}_k, \text{grad } n_k) + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m + F_k(\vec{x}, t), \tag{2}$$

$$k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q, \quad t \in (t_0, T).$$

Здесь N — число веществ в составе газов и аэрозолей; $n_k(\vec{x}, t)$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке \vec{x} в момент времени t ; D_k — коэффициент диффузии частиц вещества с номером k (предполагается, что D_k не зависит от \vec{x} и t); \vec{v}_k — скорость дрейфа частиц вещества с номером k (предполагается, что \vec{v}_k не зависит от \vec{x} и t); $\{a_{k,m}\}_{k,m=\overline{1,N}}$ — постоянные, 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 .

Для однозначного определения концентраций заданы следующие дополнительные условия, соответствующие рассматриваемым физическим ситуациям:

$$\begin{aligned} n_k(\vec{x}, t_0) &= n_{k,0}(\vec{x}), \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q; \\ \alpha_k(\vec{x}, t) \frac{\partial}{\partial \vec{n}} n_k(\vec{x}, t) + \beta_k(\vec{x}, t) n_k(\vec{x}, t) &= R_k(\vec{x}, t), \quad (3) \\ k &= \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (t_0, T). \end{aligned}$$

Здесь $n_{k,0}(\vec{x})$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке \vec{x} в момент времени t_0 ; \vec{n} — единичная нормаль к поверхности ∂Q , внешняя по отношению к области Q ; α_k, β_k, R_k — некоторые коэффициенты, обсуждаемые далее. Первое из записанных равенств представляет собой начальное условие, второе — краевое условие третьего рода. Если $R_k = 0$, то это условие отражает тот факт, что на границе области Q частицы вещества с номером k частично поглощаются и частично отражаются. Если $R_k \neq 0$, то это условие описывает поступление вещества с номером k внутрь области через ее границу. Коэффициенты α_k, β_k удовлетворяют условиям $|\alpha_k| + |\beta_k| \neq 0, \alpha_k \beta_k \geq 0$ (эти условия связаны с теоремой единственности решения).

Если область Q не является ограниченной, то в список дополнительных условий нужно включить условие регулярности решения на бесконечности.

Поскольку нет возможности найти явное решение общей системы уравнений (2), (3), переходим к рассмотрению частных случаев, в которых в соответствии с конкретными физическими ситуациями заданы конкретные исходные данные, а именно область Q , временной промежуток (t_0, T) , коэффициенты диффузии D_k , векторы скорости \vec{v}_k , коэффициенты $a_{k,m}$, плотности мощности внешних источников $F_k(\vec{x}, t)$, начальные концентрации $n_{k,0}(\vec{x})$, коэффициенты $\alpha_k(\vec{x}, t), \beta_k(\vec{x}, t), R_k(\vec{x}, t)$. Для определения агрегатного состояния продуктов гидролиза ГФУ, в котором эти продукты оседают на кожу человека, достаточно рассмотреть два частных случая (модели) приведенных систем уравнений.

Первая модель процессов оседания описывает следующую ситуацию: оседание частиц происходит в полупространстве $z > 0$ на временном промежутке $(0, +\infty)$; есть диффузия газов, но нет макроскопического движения газов; есть (медленная) диффузия аэрозолей, нет макроскопического движения аэрозолей; есть гидролиз, есть нуклеация газов, нет воздухообмена.

Полагаем, что

$$\begin{aligned} F_k(x, y, z, t) &= F_k(z, t) = F_{k,0}H(t_1 - t), \\ n_{k,0}(x, y, z) &= n_{k,0}(z) = n_{k,0}, \quad \alpha_k(x, y, t) = \alpha_k = \alpha, \\ \beta_k(x, y, t) &= \beta_k = \beta, \quad R_k(x, y, t) = 0 \end{aligned}$$

(здесь $F_{k,0} \geq 0$, $t_1 > 0$, $n_{k,0} \geq 0$; α , β — некоторые константы, H — функция Хевисайда). Тогда систему уравнений неразрывности можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k = D_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} n_k + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m + F_k(z, t), \quad (4)$$

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

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

$$\left(-\alpha_k \frac{\partial}{\partial z} n_k + \beta_k n_k \right) \Big|_{z=0} = 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad t \in (0, +\infty); \quad (5)$$

$$\exists C \geq 0 \exists \delta \geq 0 \forall k = \overline{1, N} \forall z \in (0, +\infty) \forall t \in (0, +\infty)$$

$$(|n_k(z, t)| \leq C e^{\delta t}).$$

Применяя к системе (4), (5) преобразование Лапласа и решая получившуюся систему уравнений, находим изображение $\bar{n}_k(z, p)$ функции $n_k(z, t)$, используя которое далее находим изображение $\bar{j}_k(z, p) = D_k \frac{\partial}{\partial z} \bar{n}_k(z, p)$ функции $j_k(z, t) = D_k \frac{\partial}{\partial z} n_k(z, t)$ (определяющей плотность потока молекул вещества с номером k через нижнюю сторону плоскости $\tilde{z} = z$ в момент времени t) и изображение $\bar{N}_{1,k}(z, p) = S \frac{1}{p} j_k(z, p)$ функции $N_{1,k}(z, t) = S \int_0^t d\tau \cdot j_k(z, \tau)$ (определяющей число молекул вещества с номером k , прошедших через нижнюю сторону участка плоскости $\tilde{z} = z$ площади S на временном промежутке $[0, t]$). Совершая обратное преобразование Лапласа, находим выражения для $j_k(0, t)$, $N_{1,k}(0, t)$.

Принято, что $F_{k,0} = 0$ при $k = \overline{1, N}$, $n_{1,0} > 0$, $n_{k,0} = 0$ при $k = \overline{2, N}$ (это означает, что рассматривается мгновенный выброс ГФУ в воздух рабочего помещения). При этом вычислялись масса урана

$M_{1,k}(0, t) = m_{0,U} N_{1,k}(0, t)$, осевшего на участок плоскости $\tilde{z} = 0$ площадью S на временном промежутке $[0, t]$ в составе вещества с номером k (здесь $m_{0,U} = 238 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — масса атома урана), поверхностная плотность массы урана $\rho_{S,U,k} = M_{1,k}(0, t)/S$, осевшего на плоскость $\tilde{z} = 0$ на временном промежутке $[0, t]$ в составе вещества с номером k , и масса урана $M_1(0, t) = \sum_{k=1}^N M_{1,k}(0, t)$, осевшего на участок плоскости $\tilde{z} = 0$ площадью S на временном промежутке $[0, t]$ в составе всех веществ. При расчете массы урана, осевшего на кожу человека, принималось, что $S = 2 \text{ м}^2$ [5]. Результаты расчетов, проведенных по полученным выражениям, представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Динамика оседания массы урана m на кожу человека в составе газов ($\alpha = 0,01, \beta = 1$)

$t, \text{ с}$	10	30	50	120	240	360	600	5400	7200
$m, \text{ мг}$	1	2,5	3,6	5,5	6,3	6,4	6,4	6,4	6,4

Из данных табл. 1 следует, что согласно первой модели примерно через 10 мин после выброса оседающая масса урана перестает зависеть от времени. Это означает, что газообразные продукты к моменту времени $t \approx 10$ мин практически исчезают из атмосферы рабочего помещения.

Таблица 2

Динамика массы урана m , осевшего на кожу человека в составе всех урансодержащих продуктов гидролиза ГФУ и в составе каждого из них ($\alpha = 0,01, \beta = 1$)

$t, \text{ с}$	$m, \text{ кг, газы и аэрозоли}$	$m, \text{ кг, UF}_6 \text{ (газ)}$	$m, \text{ кг, UOF}_4 \text{ (газ)}$	$m, \text{ кг, UO}_2\text{F}_2 \text{ (газ)}$	$m, \text{ кг, UO}_2\text{F}_2 \text{ (аэрозоль)}$
10	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-7}$	$6,28 \cdot 10^{-7}$	$8,77 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-12}$
30	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$6,88 \cdot 10^{-7}$	$9,72 \cdot 10^{-11}$
50	$3,61 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$	$1,40 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-10}$
120	$5,53 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-6}$	$2,49 \cdot 10^{-9}$
240	$6,31 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$3,79 \cdot 10^{-6}$	$7,97 \cdot 10^{-9}$
360	$6,44 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$3,91 \cdot 10^{-6}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$
600	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-6}$	$2,62 \cdot 10^{-8}$
5400	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-7}$
7200	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-6}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$

Из данных табл. 2 следует, что почти одинаковую долю в поступлении урана имеют UOF_4 (газ) и UO_2F_2 (газ). На порядок меньше

поступление обеспечивают UF_6 (газ) и UO_2F_2 (аэрозоль). Масса урана, осевшего в составе UO_2F_2 (аэрозоль), даже через 2 ч после выброса продолжает изменяться.

Из табл. 3 следует, что по экспериментальным данным масса урана, выброшенного в воздух помещения, хорошо совпадает с суммой следующих масс: осевшей к моменту времени t и находящейся в этот момент в воздухе. При этом *рассчитанная осевшая* масса на два порядка меньше *выброшенной* и состоит она в основном из массы урана, осевшего в составе газов. Это означает, что, в рамках первой модели загрязнения производственной среды, основная доля урана заключена в аэрозольных частицах, которые оседают очень медленно и слабо загрязняют производственные поверхности и кожу человека, что не соответствует экспериментальным данным. Такой результат позволяет заключить, что при описании движения частиц нужно учитывать их дрейф под действием силы тяжести и силы сопротивления среды.

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения составляющих массы урана

Масса урана $m_{\text{пов}}$, г, осевшего на производственные поверхности через 1,5 ч после выброса		Масса урана $m_{\text{возд}}$, г, находящегося в воздухе через 1,5 ч после выброса	Полная экспериментально зафиксированная масса урана m , г	Масса урана $m_{\text{выбр}}$, г, выброшенного в воздух помещения
Теория ($\alpha = 0,01$, $\beta = 1$)	Эксперимент			
0,26	6,68	19,37	26,05	25,69

Вторая модель процессов оседания описывает следующую ситуацию: оседание частиц происходит в плоском слое $0 < z < h$ (здесь $h > 0$) на временном промежутке $(0, +\infty)$; есть диффузия газов, нет макроскопического движения газов; нет диффузии аэрозолей, есть макроскопическое движение аэрозолей (аэрозольные частицы движутся под действием силы тяжести и силы сопротивления среды); есть гидролиз и нуклеация газов, нет воздухообмена.

Для системы N веществ в составе газов (величины, относящиеся к этим веществам, имеют индекс k) и одного вещества в составе аэрозолей при задании $F_k(x, y, z, t) = 0$, $n_{k,0}(x, y, z) = n_{k,0}(z) = n_{k,0}$, $\alpha_{1,k}(x, y, t) = 0$, $R_{1,k}(x, y, t) = 0$, $\alpha_{2,k}(x, y, t) = 0$, $R_{2,k}(x, y, t) = 0$; $F(x, y, z, t) = 0$, $n_0(x, y, z) = 0$, $\alpha_1(x, y, t) = 0$, $R_1(x, y, t) = 0$, $\alpha_2(x, y, t) = 0$, $R_2(x, y, t) = 0$, учитывая допущения об отсутствии диффузии аэрозоля, систему уравнений неразрывности можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k = D_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} n_k + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m, \quad k = \overline{1, N}, \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} n_k|_{t=0} &= n_{k,0}(z), \quad k = \overline{1, N}, \quad z \in (0, h); \\ n_k|_{z=0} &= 0, \\ n_k|_{z=h} &= 0, \quad k = \overline{1, N}, \quad t \in (0, +\infty); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n = v(r) \frac{\partial}{\partial z} n + \sum_{m=1}^N b_m n_m, \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} n|_{t=0} &= 0, \quad z \in (0, h); \\ n|_{z=h} &= 0, \quad t \in (0, +\infty). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь r — радиус аэрозольных частиц, $v(r)$ — модуль скорости дрейфа аэрозольных частиц радиуса r , $\{b_m\}_{m=\overline{1, N}}$ — коэффициенты, описывающие процесс нуклеации. Система уравнений для газов решалась методом разделения переменных, для аэрозолей — методом характеристик [7].

При расчетах рассматривался набор радиусов аэрозольных частиц UO_2F_2 в диапазоне от $5,567 \cdot 10^{-8}$ до $1,391 \cdot 10^{-5}$ м. Такой выбор определялся данными эксперимента, моделирующего аварийную ситуацию на предприятии атомной промышленности. В модельном эксперименте воздух помещения пропускался через следующие приборы, включенные последовательно: импактор с пятью каскадами, фильтр I, диффузионную батарею, фильтр II [4, 6]. Измерялась активность урана, осажденного на каждом элементе измерительной системы [6]. Знание параметров элементов измерительной системы позволило оценить диапазон радиусов аэрозольных частиц UO_2F_2 в воздухе помещения, из которого и выбирались радиусы частиц при изучении монодисперсной модели.

На рис. 1 приведены теоретические зависимости поверхностной плотности массы урана $\rho_{S,U}$ от времени оседания для аэрозолей при нескольких значениях радиуса аэрозольных частиц. Видно, что вначале для любого радиуса r , поверхностная плотность массы урана $\rho_{S,U}$ возрастает с течением времени. Затем, начиная с момента времени $t_{\text{нас}}$, величина $\rho_{S,U}$, достигая значения $1,181 \cdot 10^{-3}$ кг/м², перестает зависеть от времени. Скорость возрастания $\rho_{S,U}$ уменьшается с уменьшением радиуса частиц r .

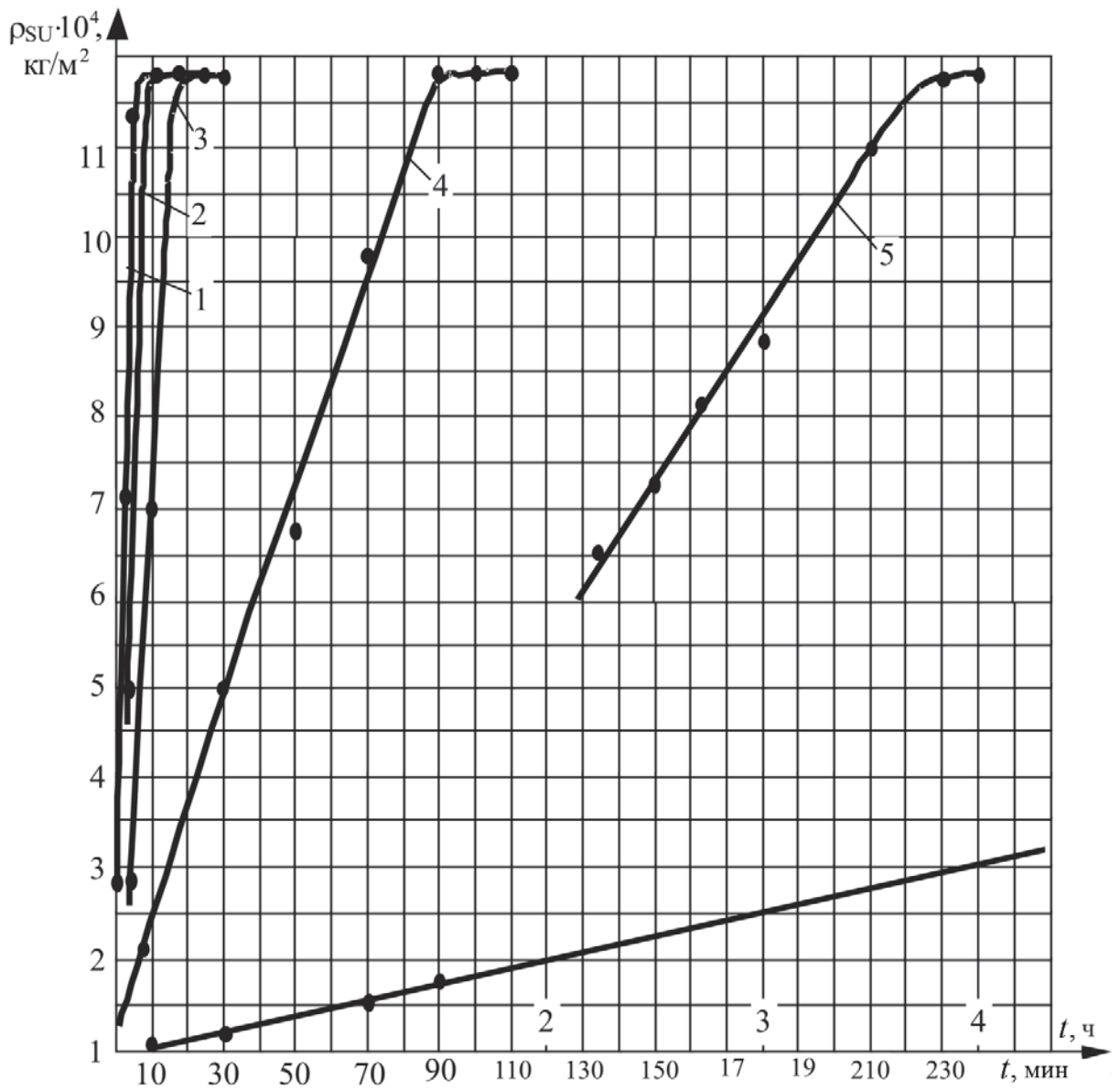


Рис. 1. Зависимость поверхностной плотности массы урана $\rho_{S,U} \cdot 10^4$, кг/м², от времени оседания t для аэрозольных частиц разных радиусов ($r = 13,9, 5,24, 2,62, 1,05, 0,62$ мкм, соответственно кривые 1, 2, 3, 4, 5; $\rho_{\max} = 1,81 \cdot 10^{-3}$ кг/м²)

На рис. 2 приведены зависимости поверхностной плотности массы урана $\rho_{S,U}$, кг/м², от времени оседания для газов и аэрозолей. Видно, что оседание урана в составе газов по второй модели происходит так же, как и по первой модели. В области насыщения значение $\rho_{S,U}$ для аэрозолей на два порядка больше, чем для газов. Горизонтальные линии на рис. 2 соответствуют максимальному значению $\rho_{S,U,\max}$, которого может достигать поверхностная плотность массы урана в соответствии с исходными экспериментальными данными. Верхняя горизонтальная линия соответствует максимальному значению $\rho_{S,U,\max,a}$ поверхностной плотности массы урана для частиц, оседающих под действием силы тяжести (аэрозолей) только на пол рабочего помещения. Используя исходные данные, нетрудно подсчитать, что $\rho_{S,U,\max,a} = 1,28 \times 10^{-3}$ кг/м². Нижняя горизонтальная линия соответствует максимальному значению $\rho_{S,U,\max,r}$ поверхностной плотности массы урана для

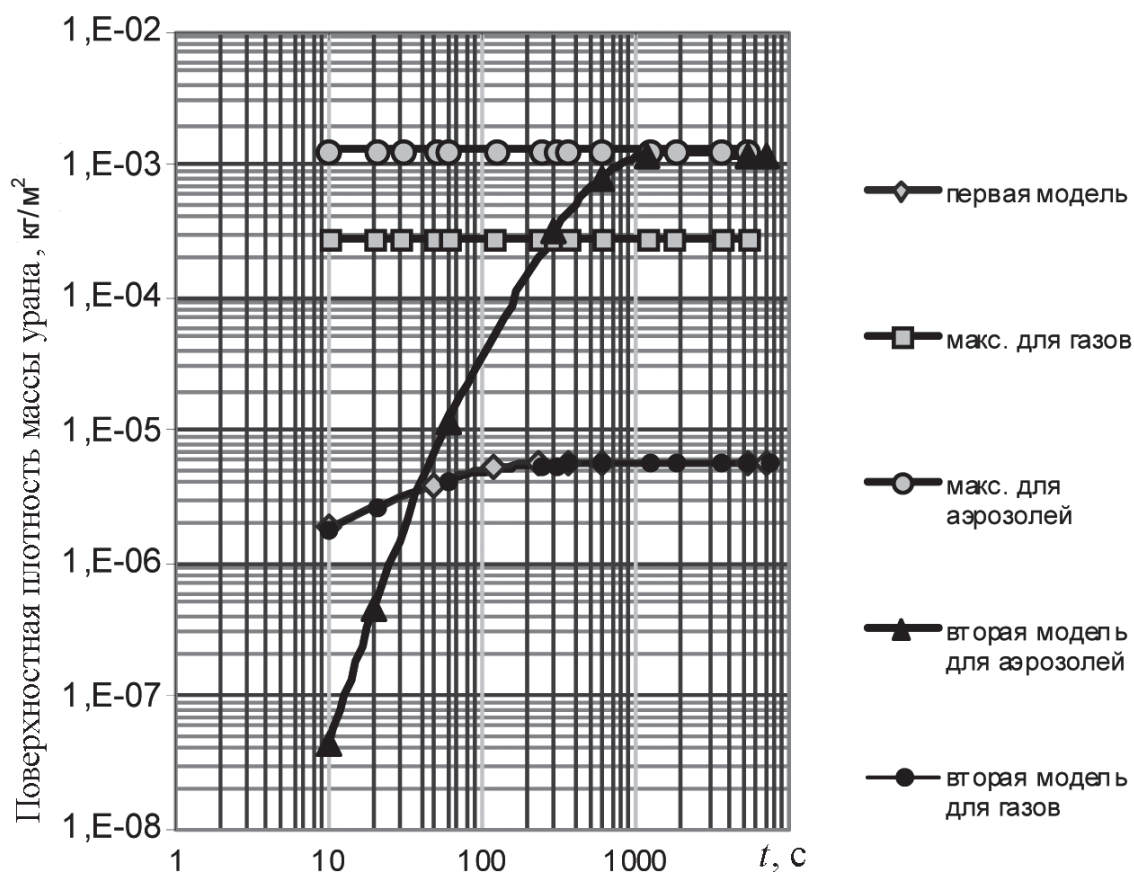


Рис. 2. Зависимость поверхностной плотности массы урана $\rho_{S,U}$, кг/м², от времени t для разных моделей оседания

газов, т.е. для частиц, оседающих за счет диффузии на пол, потолок и стены рабочего помещения. Используя исходные данные, нетрудно подсчитать, что $\rho_{S,U,max,g} = 2,57 \cdot 10^{-4}$ кг/м².

Результаты расчета, проведенного по второй модели, находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с максимальными значениями поверхностной плотности массы урана, соответствующими условиям эксперимента. Действительно, поверхностная плотность массы урана уже за время ~ 20 мин насыщается и для газов, и для аэрозолей. При этом величина $\rho_{S,U}$ для аэрозолей в области насыщения хорошо совпадает с максимальным значением, соответствующим условиям эксперимента. Для урана в составе газов рассчитанное значение $\rho_{S,U}$ в области насыщения много меньше максимально возможного. Это означает, что через несколько минут после выброса почти весь уран сосредоточен в аэрозольной компоненте.

На рис. 3 на кривой теоретической зависимости $\rho_{S,U}$ от времени оседания отмечены отдельные точки, соответствующие экспериментальным значениям $\rho_{S,U}$ на фильтре Петрянова, на стеклах, на одежде и коже, измеренным через 2 ч после выброса ГФУ. Эти величины определены по непосредственно измеренным значениям числа α -частиц, испускаемых ураном за одну минуту с одного квадратного сантиметра поверхности.

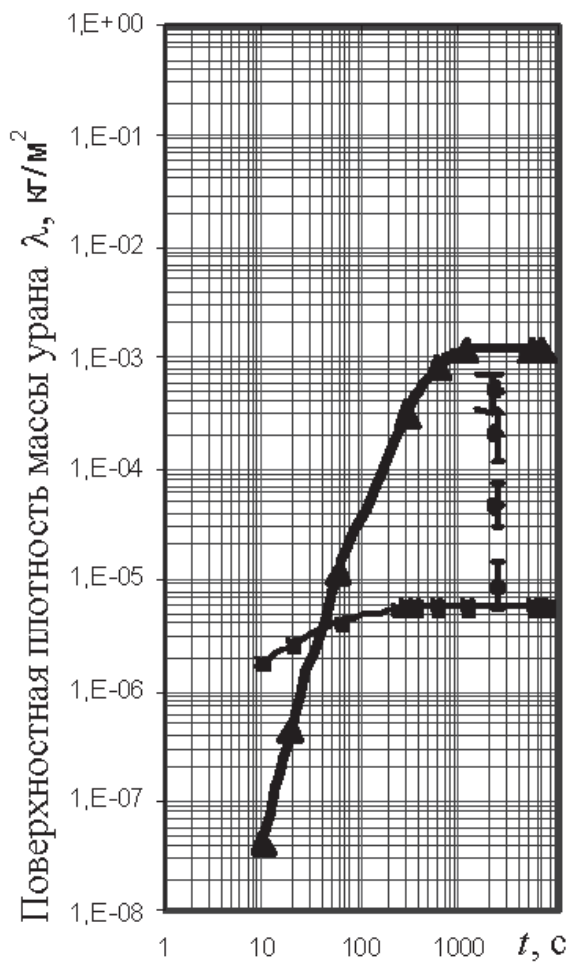


Рис. 3. Зависимость поверхностной плотности массы урана $\rho_{S,U}$, $\text{кг}/\text{м}^2$, от времени оседания для разных моделей

вся осевшая на производственные поверхности масса урана определяется аэрозольными частицами;

4) даже на материале, который хорошо захватывает оседающие частицы, на полу, где оседание максимально, величина $\rho_{S,U}$ остается меньше максимального значения. Это, по-видимому, связано с вторичным сдувом частиц [8] и с тем фактом, что в реальных условиях частицы дрейфуют не строго вертикально и часть частиц, которые согласно расчетам должны были осесть на пол, оседает на стены.

Полученный результат лег в основу метода расчета дозы, которую получает человек при перкутанном поступлении [7] урана.

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. В 2 т. Т. 2. – М. : ИздАт, 2001. – С. 369–389.
2. Г и д р о л и з газообразного гексафторида урана в воздухе / В.И. Бадьин и др. // Отчет предприятия п/я М-5122 и п/я. В-2343. – ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1975. – 76 с. – ИК № М 34559.

Из сопоставления расчетных значений $\rho_{S,U}$ для газов и аэрозолей в области насыщения с экспериментальными точками следует, что оседание урана в составе продуктов гидролиза ГФУ на кожу человека определяется газовыми компонентами, что следует из сравнения рассчитанных и измеренных значений $\rho_{S,U}$. При этом

1) измеренное среднее по отдельным участкам кожи значение $\rho_{S,U}$ близко к рассчитанному для газов. Это значит, что перкутанное поступление урана в составе продуктов гидролиза ГФУ определяется газовыми компонентами;

2) значение $\rho_{S,U}$ на одежде определяется как газами, так и аэрозолями, хотя, по-видимому, из-за подвижности человека основная доля аэрозольных частиц быстро осыпается с одежды;

3) из рис. 3 следует, что почти

3. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF_6 в HF атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК диапазона // Г.Ю. Григорьев, А.И. Надеждинский, Ш.Ш. Набиев и др.: Препринт ИАЭ 6395/12 – М., 2006.
4. Мирхайдаров А. Х., Бабенко С. П., Бадьин В. И. Газоаэрозольная опасность соединений урана с фтором в аварийных ситуациях // Тез. докл. на междунар. конф. 24–26 апреля 2000 г. – М., СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – С. 229. – Доклад № 352.
5. Человек. Медико-биологические данные. Доклады рабочей группы Комитета II МКРЗ по условному человеку, публикация 60 / Пер. с англ. Ю.Д. Парфенова; Под ред. А.А. Моисеева. – М.: Медицина, 1977. – 496 с.
6. Мирхайдаров А. Х. Исследование закономерностей загрязнения воздушной среды и поверхностей в производстве разделения изотопов урана: Дисс... канд. тех. наук. – М.: 1978. – 217 с. – ИБФ МЗ; Архив ФМБА России.
7. Бабенко С. П. Прогнозирование радиационного и токсического воздействия выбросов гексафторида урана методами математического моделирования: Дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: 2008. – 375 с.
8. Пархоменко Г. М. К вопросу обоснования предельно допустимой загрязненности рабочих поверхностей при работе с α -излучателями // Защитные покрытия в атомной технике / Под ред. С.М. Городинского, В.Б. Тихомирова. – Госатомиздат, 1963. – С. 11–15.

Статья поступила в редакцию 21.02.2012