

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности

С. П. Бабенко^{1,a}, А. В. Бадьин^{2,b}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, факультет «Фундаментальные науки», кафедра «Физика». Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

²Московский 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 07.12.2013, подписана в печать 27.12.2013.

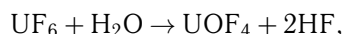
Рассматривается комплексная математическая модель, описывающая воздействие на человека гексафторида урана, поступающего в воздух рабочего помещения на предприятии атомной промышленности. Обсуждаются частные модели, описывающие загрязнение рабочего помещения, перкутанное и ингаляционное поступления токсичных веществ в организм. Приводятся исходные уравнения, рассматриваются основные экспериментальные предпосылки. Обсуждается выбор некоторых важных параметров комплексной модели. Проводится сравнение предсказаний модели с известными экспериментальными результатами.

Ключевые слова: гексафторид урана, математическая модель, функция распределения, перкутанное поступление, ингаляционное поступление, коэффициент прохождения.

УДК: 51-74, 51-76, 614.876, 614.878. PACS: 87.10.-e, 87.53.-j.

Введение

В настоящей работе проводится верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана (ГФУ, UF_6), поступающего в воздух рабочего помещения на предприятии атомной промышленности. Известно, что выброшенный в воздух ГФУ гидролизует (взаимодействует с водяными парами) по следующей схеме [1, 2]:



Молекулы UO_2F_2 и HF образуют аэрозольные частицы вследствие нуклеации. В результате оказывается, что воздух рабочего помещения загрязнен веществами: UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль).

Молекулы UF_6 , UOF_4 , UO_2F_2 , HF являются носителями атомов урана и фтора, оказывающих негативное воздействие на организм человека как при ингаляционном (через органы дыхания), так и при перкутанном (через кожу) поступлении. В настоящей работе рассматривается комплексная модель загрязнения производственного помещения, построенная в статьях [3–8]. В комплексной модели поэтапно описываются все сопутствующие загрязнению физические процессы, начиная с появления в воздухе гексафторида урана и кончая выходом токсичных веществ (урана и фтора) из организма человека. В комплексной модели в качестве составных частей используются некоторые элементы моделей МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите) [9–11], взятые в несколько свернутом виде, достаточном для решения поставленных задач.

В рамках комплексной модели были решены следующие задачи.

1. Описано пространственное распределение концентраций и плотностей потоков атомов токсичных веществ в рабочем помещении.

2. Количественно описано депонирование урана и фтора в организме человека вообще и в барьерных органах в частности (барьерными называются органы, через которые токсичные вещества попадают в организм).

3. Установлено количественное соотношение между поступлениями токсичных веществ в организм человека через дыхательную систему и через кожные покровы.

4. Определено максимально возможное загрязнение рабочего помещения и найдены поступления токсичных веществ в организм человека, соответствующие этому загрязнению.

5. Определена величина дозового коэффициента для перкутанного поступления урана.

1. Исходные уравнения и основные экспериментальные данные

Исходными уравнениями для решения первой задачи являлись уравнения непрерывности, записанные для концентраций молекул интересующих нас веществ в составе газов и для удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей [4, 7]. Наиболее общие уравнения для газов имеют вид

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

$$k = \overline{1, N}, \quad \mathbf{x} \in Q, \quad t \in (t_0, +\infty).$$

Здесь N — число интересующих нас веществ в составе газов; Q — некоторая область в $\mathbb{R}^3$; t_0 — «начальный» момент времени; $n_k(\mathbf{x}, t)$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке $\mathbf{x}$ ($\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$) в момент времени t ; D_k — коэффициент диффузии молекул вещества с номером k ; $\mathbf{v}_k$ — скорость дрейфа молекул вещества с номером k ; $\{a_{k,m}\}_{k,m=\overline{1,N}}$ — постоянные, описывающие процессы гидролиза, нуклеации и воздухообмена; $F_k(\mathbf{x}, t)$ — плотность мощности внешних источников молекул вещества с номером k в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t .

Для однозначного определения концентраций молекул интересующих нас веществ в составе газов заданы следующие дополнительные условия:

$$n_k(\mathbf{x}, t_0) = n_{k,0}(\mathbf{x}), \quad k = \overline{1, N}, \quad \mathbf{x} \in Q;$$

$$\alpha_k(\mathbf{x}, t) \frac{\partial}{\partial n} n_k + \beta_k(\mathbf{x}, t) n_k = R_k(\mathbf{x}, t),$$

$$k = \overline{1, N}, \quad \mathbf{x} \in \partial Q, \quad t \in (t_0, +\infty).$$

Здесь $n_{k,0}(\mathbf{x})$ — концентрация молекул вещества с номером k в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t_0 ; $\mathbf{n}$ — единичная нормаль к поверхности ∂Q , внешняя по отношению к области Q ; α_k, β_k, R_k — некоторые коэффициенты (см. ниже). Первое из записанных равенств представляет собой начальное условие. Второе из записанных равенств представляет собой краевое условие третьего рода. Если $R_k = 0$, то это условие отражает тот факт, что на границе области Q молекулы вещества с номером k частично поглощаются, а частично отражаются. Если $R_k \neq 0$, то это условие описывает поступление молекул 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 о единственности решения). Если область Q не является ограниченной, то в список дополнительных условий нужно включить условие регулярности решения на бесконечности.

Уравнение для аэрозолей записано с учетом принятого предположения, что в процессе нуклеации аэрозольные частицы разных размеров образуются с разной вероятностью. Наиболее общее уравнение для аэрозолей имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} n' = D(r) \Delta n' - (\mathbf{v}(r), \text{grad}(n')) - K n' +$$

$$+ g_0(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m(\mathbf{x}, t) + F'(r, \mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in Q, \quad t \in (t_0, +\infty).$$

Здесь r — радиус аэрозольных частиц (величина r входит в рассматриваемое уравнение как параметр); $n'(r, \mathbf{x}, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t ; $D(r)$ — коэффициент диффузии аэрозольных частиц радиуса r ; $\mathbf{v}(r)$ — скорость дрейфа аэрозольных частиц радиуса r ; K — кратность воз-

духообмена; g_0 — дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации ($g_0(r)$ — плотность вероятности того, что в процессе нуклеации молекула интересующего нас вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса r); $b_1, \dots, b_N$ — коэффициенты, описывающие процесс нуклеации; $F'(r, \mathbf{x}, t)$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) плотность мощности внешних источников молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t .

Для однозначного определения удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей заданы следующие дополнительные условия:

$$n'(r, \mathbf{x}, t_0) = n'_0(r, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in Q;$$

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

$$\mathbf{x} \in \partial Q, \quad t \in (t_0, +\infty).$$

Здесь $n'_0(r, \mathbf{x})$ — удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t_0 ; α, β, R — коэффициенты, смысл которых аналогичен смыслу коэффициентов α_k, β_k, R_k для газов. Если область Q не является ограниченной, то в список дополнительных условий нужно включить условие регулярности решения на бесконечности.

Обозначим $G_0(r) = \int_0^r \tilde{d}\tilde{r} g_0(\tilde{r})$. Тогда $G_0(r)$ — вероятность того, что в процессе нуклеации молекула интересующего нас вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса не больше r (G_0 — интегральная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации).

Обозначим $n(r, \mathbf{x}, t) = \int_0^r \tilde{d}\tilde{r} n'(\tilde{r}, \mathbf{x}, t)$, $n_\infty(\mathbf{x}, t) = \int_0^{+\infty} \tilde{d}\tilde{r} n'(\tilde{r}, \mathbf{x}, t)$, $n_0(r, \mathbf{x}) = \int_0^r \tilde{d}\tilde{r} n'_0(\tilde{r}, \mathbf{x})$, $n_{\infty,0}(\mathbf{x}) = \int_0^{+\infty} \tilde{d}\tilde{r} n'_0(\tilde{r}, \mathbf{x})$. Тогда $n(r, \mathbf{x}, t)$ — концентрация молекул интересующего нас вещества в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t в составе аэрозольных частиц радиусов не больше r ; $n_\infty(\mathbf{x}, t)$ — концентрация молекул интересующего нас вещества в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t в составе аэрозольных частиц всех радиусов; $n_0(r, \mathbf{x})$ — концентрация молекул интересующего нас вещества в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t_0 в составе аэрозольных частиц радиусов не больше r ; $n_{\infty,0}(\mathbf{x})$ — концентрация молекул интересующего нас вещества в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t_0 в составе аэрозольных частиц всех радиусов.

Обозначим $g_1(r, \mathbf{x}, t) = n'(r, \mathbf{x}, t)/n_\infty(\mathbf{x}, t)$, $G_1(r, \mathbf{x}, t) = n(r, \mathbf{x}, t)/n_\infty(\mathbf{x}, t)$. Тогда $G_1(r, \mathbf{x}, t)$ можно интерпретировать как вероятность обнаружить молекулу интересующего нас вещества в составе аэрозольной частицы радиуса не больше r (в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t). Соответственно $g_1(r, \mathbf{x}, t)$ можно интерпретировать как плотность вероятности обнаружить молекулу интересующего нас вещества в составе аэрозольной

частицы радиуса r (в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t). Иными словами, функции $\{G_1(r, \mathbf{x}, t)\}_r$ и $\{g_1(r, \mathbf{x}, t)\}_r$ играют роль функций распределения (интегральной и дифференциальной) радиусов аэрозольных частиц в точке $\mathbf{x}$ в момент времени t .

В дальнейшем исходные уравнения подвергались различным упрощениям. Будем считать, что дрейф частиц происходит в вертикальном направлении, и будем рассматривать функции n_k, n' вдали от боковых стенок рабочего помещения. В этом случае можно пренебречь влиянием боковых стенок и считать, что область Q есть слой между двумя плоскостями: $z = z_*$, $z = z_* + h$ (здесь h — высота рабочего помещения). При этом если «входные данные» не зависят от x, y , то решение тоже не зависит от этих переменных, что позволяет сделать уравнения пространственно одномерными. Если рассматривать стационарное решение, то можно убрать производную по времени. Можно полностью пренебречь диффузией (снизив порядок уравнений), а можно (используя асимптотические методы) рассматривать приближение малой диффузии и учитывать наличие пограничных слоев около пола и потолка. Наконец, в грубом приближении можно считать, что гидролиз и нуклеация протекают бесконечно быстро, и пренебречь наличием газов, содержащих токсичные вещества.

Верификация комплексной модели основана на сравнении теоретических результатов с результатами эксперимента, моделирующего аварийную ситуацию на предприятии атомной промышленности [12, 13]. Эксперимент был проведен сотрудниками Института биофизики Министерства здравоохранения (ИБФ МЗ) и Электрохимического завода (ЭХЗ) г. Зеленогорска. В нулевой момент времени в воздух рабочего помещения было выброшено определенное количество гексафторида урана (объем рабочего помещения $V = 63 \text{ м}^3$; масса выброшенного ГФУ $m_{\text{ем}} = 37.36 \text{ г}$). Экспериментаторы некоторое время работали в «аварийном» помещении (в противогазах), а сразу после выхода из него провели дезактивацию кожи (в момент времени $t_d = 2 \text{ ч}$). Был использован уровень выброса, который не должен был оказать серьезное отрицательное воздействие на организмы экспериментаторов, но который мог позволить получить новые сведения о воздействии ГФУ на человека. Была проведена серия измерений, охарактеризовавших загрязнение воздуха, производственных поверхностей и человека соединениями урана. Наблюдалась динамика такого загрязнения и динамика вывода урана из организмов экспериментаторов.

Процесс выброса гексафторида урана протекал следующим образом. Вначале кусочек ГФУ был помещен в герметичный сосуд. Перед выбросом сосуд нагревался. Далее сосуд был разгерметизирован, что привело к выбросу паров UF_6 через узкое сопло узкими струями. Экспериментаторы визуально наблюдали последствия выброса. Наблюдения показали, что пары в течение нескольких секунд равномерно заполнили весь объем помещения в виде плотного тумана. Со временем плотность тумана уменьшилась, а вблизи потолка наметилась резкая граница, разделившая области наличия и отсутствия тумана. Эта граница медленно опускалась от потолка к полу и становилась менее резкой.

Схема эксперимента, в котором измерялась плотность активности урана в воздухе рабочего помещения, выглядит следующим образом. Пары UF_6 выбрасываются в воздух рабочего помещения на временном промежутке $[0, \Delta t_0]$ ($\Delta t_0 = 50 \text{ с}$). Далее на временных промежутках $[t_1, t_1 + \Delta t_1], \dots, [t_{12}, t_{12} + \Delta t_{12}]$ воздух помещения засасывался на высоте $z_0 = 1.5 \text{ м}$ и пропусклся через следующие приборы (включенные последовательно): импактор с пятью каскадами, фильтр I, фильтр II. Измерена активность $A_{j,i}$ урана, осажденного на j -м элементе измерительной системы на временном промежутке $[t_i, t_i + \Delta t_i]$ (здесь $j = \overline{1, 7}$, $i = \overline{1, 12}$). Известен объем V_i воздуха, прокачанного через измерительную систему на временном промежутке $[t_i, t_i + \Delta t_i]$.

Ниже перечислены и описаны остальные измерения, результаты которых использованы при построении комплексной модели.

1. Измерена величина N' , определяющая число α -частиц, испускаемых за единицу времени с единицы площади рассматриваемой поверхности. Исследовались поверхности измерительных стекол, фильтров Петрянова, одежды человека, различных участков кожного покрова человека. Стекла и фильтры Петрянова устанавливались на различных участках пола и стен рабочего помещения.

2. Измерены значения активности урана в коже человека непосредственно перед дезактивацией (A_d) и сразу после нее ($\tilde{A}_d$).

3. Наблюдалась динамика активности урана в коже человека. Проведены измерения активности урана $A_{1,1}, \dots, A_{1,m_1}$ в выбранные моменты времени $t_{1,1}, \dots, t_{1,m_1}$ ($t_d < t_{1,1} < \dots < t_{1,m_1}$, $t_{1,m_1} > 2 \text{ мес}$).

4. Наблюдалась динамика активности урана в суточной моче экспериментаторов. Проведены измерения активности урана в суточной моче $A_{2,1}, \dots, A_{2,m_2}$ в выбранные моменты времени $t_{2,1}, \dots, t_{2,m_2}$ ($t_d < t_{2,1} < \dots < t_{2,m_2}$, $t_{2,m_2} > 2 \text{ мес}$).

2. Нахождение функции распределения g_0

Рассмотрим следующую ситуацию: оседание частиц происходит в плоском слое; отсутствует постоянное подтекание гексафторида урана в воздух рабочего помещения (ГФУ попал в воздух за счет разового выброса); в воздухе рабочего помещения нет газов, но есть аэрозоли, содержащие интересующее нас вещество (гидролиз и нуклеация газов быстро закончились); нет диффузии аэрозолей (аэрозольные частицы движутся только под действием силы тяжести и силы сопротивления среды). В этом случае основную систему уравнений можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n' &= v(r) \frac{\partial}{\partial z} n', & z \in (0, h), \quad t \in (0, +\infty); \\ n'(r, z, 0) &= n_{\infty, 0} g_0(r), & z \in (0, h); \\ n'(r, h, t) &= 0, & t \in (0, +\infty). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $v(r)$ — модуль скорости дрейфа аэрозольных частиц радиуса r . Величина $v(r)$ вычисляется по правилу: $v(r) = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{m_1 g}{6\pi\eta r^3} r^2 = \gamma r^2$. Здесь m_1 — масса молекулы интересующего нас вещества; g — ускорение свободного падения; η — коэффициент вязкости

воздуха; r_1 — радиус молекулы интересующего нас вещества. Обозначим $R(z, t) = \sqrt{\frac{h-z}{\gamma t}}$. Тогда $z+v(r)t < h$ при $r < R(z, t)$; $z+v(r)t = h$ при $r = R(z, t)$; $z+v(r)t > h$ при $r > R(z, t)$. Иными словами, $R(z, t)$ — это радиус тех аэрозольных частиц, которые, начав оседание на высоте h в нулевой момент времени, окажутся на высоте z в момент времени t .

Решая систему уравнений (1) методом характеристик, получаем $n'(r, z, t) = n_{\infty,0}g_0(r)$ при $r \leq R(z, t)$; $n'(r, z, t) = 0$ при $r > R(z, t)$. Тогда $n(r, z, t) = n_{\infty,0}G_0(r)$ при $r \leq R(z, t)$; $n(r, z, t) = n_{\infty,0}G_0(R(z, t))$ при $r > R(z, t)$. Следовательно, $n_{\infty}(z, t) = n_{\infty,0}G_0(R(z, t))$. Тогда $G_0(R(z, t)) = \frac{n_{\infty}(z, t)}{n_{\infty,0}}$.

Будем рассматривать аэрозольные частицы, образованные молекулами UO_2F_2 . Используя данные модельного эксперимента по определению плотности активности урана в воздухе рабочего помещения, получаем

$$G_0(R(z_0, t_i)) = \frac{n_{\infty}(z_0, t_i)}{n_{\infty,0}} = \frac{A_{\text{sp}}m_*n_{\infty}(z_0, t_i)}{A_{\text{sp}}m_*n_{\infty,0}} = \frac{\sum_{j=1}^7 \frac{A_{j,i}}{V_i}}{\frac{m_{\text{em}}}{V}} = \frac{V \sum_{j=1}^7 A_{j,i}}{A_{\text{sp}}m_{\text{em}}V_i}.$$

Здесь $A_{\text{sp}} = 1.73 \cdot 10^9$ Бк/кг — удельная активность ГФУ; m_* — масса молекулы ГФУ. Обозначим $r_i = R(z_0, t_i)$, $G_{0,i} = \frac{V \cdot \sum_{j=1}^7 A_{j,i}}{A_{\text{sp}}m_{\text{em}}V_i}$. Тогда $G_0(r_i) = G_{0,i}$. Следовательно, точки $(r_i, G_{0,i})$ принадлежат графику функции G_0 .

Далее были рассмотрены четыре наиболее известных выражения [14] для функций распределения радиусов аэрозольных частиц (формула Роллера, формула Разина—Раммлера, распределение Гаусса на полуоси, логарифмически-нормальное распределение; каждое из этих выражений содержит два числовых параметра). Для каждого выражения набор значений параметров был подобран так, чтобы график функции распределения «наилучшим образом» проходил через точки $(r_i, G_{0,i})$. При этом делался переход к специальной системе координат, в которой (для каждого набора значений параметров) график функции распределения является прямой, и использовался метод наименьших квадратов. Окончательно было получено, что логарифмически-нормальное распределение с геометрическим средним $r_g = 2.744 \cdot 10^{-6}$ м и геометрическим стандартным отклонением $\beta_g = 2.18$ (безразмерная величина) наилучшим образом аппроксимирует экспериментальные точки.

Следует заметить, что обнаруженная возможность приемлемым образом аппроксимировать экспериментальные точки с помощью одного из стандартных выражений для функций распределения радиусов аэрозольных частиц сама по себе косвенно свидетельствует в пользу комплексной модели.

3. Перкутанное поступление

Рассмотрим перкутанное поступление урана в организм человека, находящегося в аварийной ситуации. Мы предполагаем, что на временном промежутке $[0, t_{\text{out}}]$ человек находился в помещении, в котором (на

этом временном промежутке) произошел аварийный выброс гексафторида урана. В момент времени t_{out} человек покинул аварийное помещение ($t_{\text{out}} > 0$), а в момент времени t_d он прошел дезактивацию кожи ($t_d > t_{\text{out}}$). Для удобства описания все атомы урана, поступившие в организм человека перкутанным путем, отнесем к одной из трех групп: атомы урана, находящиеся на поверхности кожи человека; атомы урана, находящиеся в глубине кожи человека; атомы урана, находящиеся во внутренних органах, тканях и жидкостях организма человека (условно будем говорить об атомах урана, находящихся в кровотоке). Атомы первой группы постепенно проникают в глубину кожи. При дезактивации атомы первой группы полностью смываются с поверхности кожи. Атомы второй группы частично проникают в кровоток. Большая часть атомов второй группы выводится из организма в процессе шелушивания верхнего слоя кожи. Дезактивация не влияет на атомы второй группы. Атомы третьей группы постепенно выводятся из организма с мочой. Таким образом, рассматриваемая модель (она называется интегральной моделью) делит прохождение урана через организм человека на два процесса — прохождение через барьерный орган (кожу) и прохождение интегрально через все внутренние органы. Введем обозначения: $j(t)$ — плотность потока атомов урана на поверхности кожи в момент времени t ; $N_1(t)$ — число атомов урана, осевших на кожу на временном промежутке $[0, t]$; $N_2(t)$ — число атомов урана, находящихся на поверхности кожи в момент времени t ; $N_3(t)$ — число атомов урана, находящихся в глубине кожи в момент времени t ; $\tilde{N}_3(t)$ — число атомов урана, находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_4(t)$ — число атомов урана, вышедших из организма с мочой на временном промежутке $[0, t]$ (здесь $t \in [0, +\infty)$).

Прежде чем пытаться построить модель распределенного во времени поступления урана в организм, имеет смысл изучить вырожденный случай разового поступления. Предположим, что в нулевой момент времени на кожу человека поступило $N_{1,0}$ атомов урана (фактически мы пренебрегаем длиной временного промежутка $[0, t_{\text{out}}]$). Тогда $N_1(t) = N_{1,0}$ при $t \in [0, +\infty)$. На основе литературных данных [15] мы предполагаем, что

$$\begin{aligned} N_2(t) &= N_{1,0}e^{-\lambda t}, & t \in [0, t_d]; \\ N_2(t) &= 0, & t \in (t_d, +\infty). \end{aligned}$$

Здесь $\lambda > 0$ (величину λ можно найти, используя величины t_d , A_d , $\tilde{A}_d$). Используя данные модельного эксперимента по измерению активности урана в коже человека, получаем

$$\begin{aligned} N_3(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t})(C_1e^{-\lambda_1 t} + C_2e^{-\lambda_2 t}), & t \in [0, t_d]; \\ N_3(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t_d})(C_1e^{-\lambda_1 t} + C_2e^{-\lambda_2 t}), & t \in (t_d, +\infty). \end{aligned}$$

Здесь $C_1, C_2 > 0$, $C_1 + C_2 = 1$, $0 < \lambda_2 < \lambda_1$ (величины $C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2$ можно найти, используя данные модельного эксперимента). Используя данные модельного эксперимента по измерению активности урана в суточной моче человека, получаем

$$\begin{aligned} \tilde{N}_3(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t})(\tilde{C}_1e^{-\tilde{\lambda}_1 t} + \tilde{C}_2e^{-\tilde{\lambda}_2 t}), \\ & t \in [0, t_d]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{N}_3(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t_d}) \left(\tilde{C}_1 e^{-\tilde{\lambda}_1 t} + \tilde{C}_2 e^{-\tilde{\lambda}_2 t} \right), \\ t &\in (t_d, +\infty); \\ N_4(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t}) \left(\tilde{C}_1 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_1 t}) + \tilde{C}_2 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2 t}) \right), \\ t &\in [0, t_d]; \\ N_4(t) &= N_{1,0}(1 - e^{-\lambda t_d}) \left(\tilde{C}_1 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_1 t}) + \tilde{C}_2 (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2 t}) \right), \\ t &\in (t_d, +\infty).\end{aligned}$$

Здесь $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2 > 0$, $\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2 < 1$ (величина $\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2$ имеет смысл той доли урана, прошедшего в глубину кожи, которая проходит в кровотока), $0 < \tilde{\lambda}_2 < \tilde{\lambda}_1$ (величины $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2$ можно найти, используя данные модельного эксперимента).

Теперь перейдем к изучению распределенного поступления. Предположим, что процессы прохождения через организм урана, осевшего на кожу на малом временном промежутке $[\tau, \tau + d\tau]$, описываются приведенными выше законами для разового поступления. Тогда

$$\begin{aligned}N_1(t) &= S \int_0^t d\tau j(\tau), \quad t \in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_1(t) &= S \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau j(\tau), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty); \\ N_2(t) &= S \int_0^t d\tau j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_2(t) &= S \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau j(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in (t_{\text{out}}, t_d]; \\ N_2(t) &= 0, \quad t \in (t_d, +\infty); \\ N_3(t) &= S \int_0^t d\tau j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ t &\in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_3(t) &= S \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ t &\in (t_{\text{out}}, t_d]; \\ N_3(t) &= S \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau j(\tau) (1 - e^{-\lambda(t_d-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ t &\in (t_d, +\infty).\end{aligned}$$

Здесь S — площадь поверхности кожи человека; выражения для $\tilde{N}_3(t)$ получаются из выражений для $N_3(t)$ заменой постоянных $C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2$ на постоянные $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2$; выражения для $N_4(t)$ получаются из выражений для $\tilde{N}_3(t)$ заменой выражений $e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)}, e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)}$ на выражения $(1 - e^{-\tilde{\lambda}_1(t-\tau)}), (1 - e^{-\tilde{\lambda}_2(t-\tau)})$.

Рассмотрим перкутанное поступление урана в организм человека, находящегося в повседневных производственных условиях. Введем обозначения: $t_0 = 0$ ч —

начало нулевого рабочего дня, $t_1 = 6$ ч — конец нулевого рабочего дня, $t_2 = 24$ ч — конец нулевых суток; $\alpha_n = t_0 + n(t_2 - t_0)$ — начало n -го рабочего дня, $\beta_n = t_1 + n(t_2 - t_0)$ — конец n -го рабочего дня, $\gamma_n = t_2 + n(t_2 - t_0)$ — конец n -х суток (здесь $n \in \mathbb{Z}$); $\bar{N}(t) = \left[\frac{t - t_0}{t_2 - t_0} \right]$ — номер суток, на которые приходится момент времени t (здесь $t \in \mathbb{R}$, $[u]$ — целая часть числа u при $u \in \mathbb{R}$). Очевидно, $\alpha_0 = t_0, \beta_0 = t_1, \gamma_0 = t_2$; $\alpha_n < \beta_n < \gamma_n, \alpha_{n+1} = \gamma_n$; $\alpha_{\bar{N}(t)} \leq t < \gamma_{\bar{N}(t)}$. Мы предполагаем, что в конце каждого рабочего дня человек проходит дезактивацию кожи. В повседневных производственных условиях j — постоянная величина. Введем обозначения: $N_1^n(t)$ — число атомов урана, осевших на кожу на пересечении временных промежутков $[\alpha_n, \beta_n], (-\infty, t]$; $N_3^n(t)$ — число атомов урана, осевших на кожу на пересечении временных промежутков $[\alpha_n, \beta_n], (-\infty, t]$ и находящихся в глубине кожи в момент времени t ; $\tilde{N}_3^n(t)$ — число атомов урана, осевших на кожу на пересечении временных промежутков $[\alpha_n, \beta_n], (-\infty, t]$ и находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_4^n(t)$ — число атомов урана, осевших на кожу на пересечении временных промежутков $[\alpha_n, \beta_n], (-\infty, t]$ и вышедших с мочой на временном промежутке $(-\infty, t]$ (здесь $n \in \mathbb{Z}, t \in \mathbb{R}$). Тогда

$$\begin{aligned}N_1^n(t) &= 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n); \\ N_1^n(t) &= jS \int_{\alpha_n}^t d\tau \cdot 1, \quad t \in [\alpha_n, \beta_n]; \\ N_1^n(t) &= jS \int_{\alpha_n}^{\beta_n} d\tau \cdot 1, \quad t \in (\beta_n, +\infty); \\ N_1(t) &= \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_1^n(t), \quad t \in [t_0, +\infty); \\ N_2(t) &= jS \int_{\alpha_{\bar{N}(t)}}^t d\tau e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad t \in [t_0, +\infty), \\ &\quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)}; \\ N_2(t) &= 0, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}; \\ N_3^n(t) &= 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n); \\ N_3^n(t) &= jS \int_{\alpha_n}^t d\tau (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ &\quad t \in [\alpha_n, \beta_n]; \\ N_3^n(t) &= jS \int_{\alpha_n}^{\beta_n} d\tau (1 - e^{-\lambda(\beta_n-\tau)}) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ &\quad t \in (\beta_n, +\infty); \\ N_3(t) &= \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_3^n(t), \quad t \in [t_0, +\infty).\end{aligned}$$

При изучении перкутанного поступления фтора в организм аналогично тому, как это было сделано для урана, вводятся величины $j(t), N_1(t), N_2(t), \tilde{N}_3(t), N_4(t)$. Мы предполагаем, что атомы фтора, проникшие в глубину кожи, не задерживаясь, поступают в кровотока. Со-

ответственно не имеет смысла вводить величину $N_3(t)$. Для величин $j(t)$, $N_1(t)$, $N_2(t)$, $\tilde{N}_3(t)$, $N_4(t)$, относящихся ко фтору, можно записать выражения, аналогичные выражениям, записанным для величин $j(t)$, $N_1(t)$, $N_2(t)$, $\tilde{N}_3(t)$, $N_4(t)$, относящихся к урану.

4. Ингаляционное поступление

Рассмотрим ингаляционное поступление токсичных веществ в организм человека, находящегося в аварийной ситуации. При ингаляционном поступлении токсичные вещества, вдохнутые с воздухом рабочего помещения, быстро проходят через барьерный орган (дыхательную систему), поступают в кровоток и постепенно выводятся из организма с мочой. Введем обозначения: $n(z, t)$ — концентрация атомов токсичного вещества на высоте z в момент времени t ; $N_1(t)$ — число атомов токсичного вещества, вдохнутых на временном промежутке $[0, t]$; $N_2(t)$ — число атомов токсичного вещества, находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_3(t)$ — число атомов токсичного вещества, вышедших из организма с мочой на временном промежутке $[0, t]$ (здесь $t \in [0, +\infty)$). Используя литературные данные [16], получаем

$$\begin{aligned} N_1(t) &= q \int_0^t d\tau n(z_0, \tau), \quad t \in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_1(t) &= q \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau n(z_0, \tau), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty); \\ N_2(t) &= \xi q \int_0^t d\tau n(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ &\quad t \in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_2(t) &= \xi q \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau n(z_0, \tau) (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \\ &\quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty); \\ N_3(t) &= \xi q \int_0^t d\tau n(z_0, \tau) (C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + \\ &\quad + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)})), \quad t \in [0, t_{\text{out}}]; \\ N_3(t) &= \xi q \int_0^{t_{\text{out}}} d\tau n(z_0, \tau) (C_1 (1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)}) + \\ &\quad + C_2 (1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)})), \quad t \in (t_{\text{out}}, +\infty). \end{aligned}$$

Здесь ξ — коэффициент прохождения в организм человека атомов токсичного вещества; q — объем воздуха, вдыхаемого человеком в единицу времени; z_0 — высота, на которой находится нос человека; $C_1, C_2 > 0$, $C_1 + C_2 = 1$, $0 < \lambda_2 < \lambda_1$.

Рассмотрим ингаляционное поступление токсичных веществ в организм человека, находящегося в повседневных производственных условиях. Обозначим через $\tilde{n}(z)$ концентрацию атомов токсичного вещества на высоте z . Тогда

$$N_1^n(t) = 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n);$$

$$N_1^n(t) = \tilde{n}(z_0) q \int_{\alpha_n}^t d\tau \cdot 1, \quad t \in [\alpha_n, \beta_n];$$

$$N_1^n(t) = \tilde{n}(z_0) q \int_{\alpha_n}^{\beta_n} d\tau \cdot 1, \quad t \in (\beta_n, +\infty);$$

$$N_1(t) = \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_1^n(t), \quad t \in [t_0, +\infty);$$

$$N_2^n(t) = 0, \quad t \in (-\infty, \alpha_n);$$

$$N_2^n(t) = \xi \tilde{n}(z_0) q \int_{\alpha_n}^t d\tau (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in [\alpha_n, \beta_n];$$

$$N_2^n(t) = \xi \tilde{n}(z_0) q \int_{\alpha_n}^{\beta_n} d\tau (C_1 e^{-\lambda_1(t-\tau)} + C_2 e^{-\lambda_2(t-\tau)}), \quad t \in (\beta_n, +\infty);$$

$$N_2(t) = \sum_{n=0}^{\bar{N}(t)} N_2^n(t), \quad t \in [0, +\infty).$$

Выражения для $N_3^n(t)$ получаются из выражений для $N_2^n(t)$ заменой выражений $e^{-\lambda_1(t-\tau)}$, $e^{-\lambda_2(t-\tau)}$ на выражения $(1 - e^{-\lambda_1(t-\tau)})$, $(1 - e^{-\lambda_2(t-\tau)})$.

5. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Ниже приводятся экспериментальные и теоретические результаты, относящиеся к одним и тем же физическим процессам. Сравнение этих результатов позволило сделать вывод, насколько удовлетворительно комплексная модель описывает реальные физические системы.

В модельном эксперименте определялись значения поверхностной плотности массы урана σ_U на фильтрах Петрянова, измерительных стеклах, одежде и коже человека в момент времени $t = 2$ ч. В рамках комплексной модели были получены значения величины σ_U на коже человека (в различные моменты времени), соответствующие поступлению урана в составе газов и в составе аэрозолей. На рис. 1 показана динамика теоретических значений величины σ_U .

Наблюдается довольно хорошее соответствие между экспериментальным значением σ_U на коже человека ($\sigma_U = 6.38 \cdot 10^{-6}$ кг/м²) и теоретическим значением σ_U на коже человека для урана в составе газов ($\sigma_U = 5.65 \cdot 10^{-6}$ кг/м²). То же самое можно сказать относительно экспериментального значения σ_U на фильтрах Петрянова ($\sigma_U = 5.41 \cdot 10^{-4}$ кг/м²) и теоретического значения σ_U на коже человека для урана в составе аэрозолей ($\sigma_U = 1.16 \cdot 10^{-3}$ кг/м²). Однако теоретические значения σ_U на коже человека для урана в составе газов и в составе аэрозолей сильно отличаются. Соответственно можно сделать следующие выводы.

1. На кожу уран попадает в основном в составе газов. Скорее всего, это связано с тем, что даже обычная одежда хорошо задерживает аэрозольные частицы.

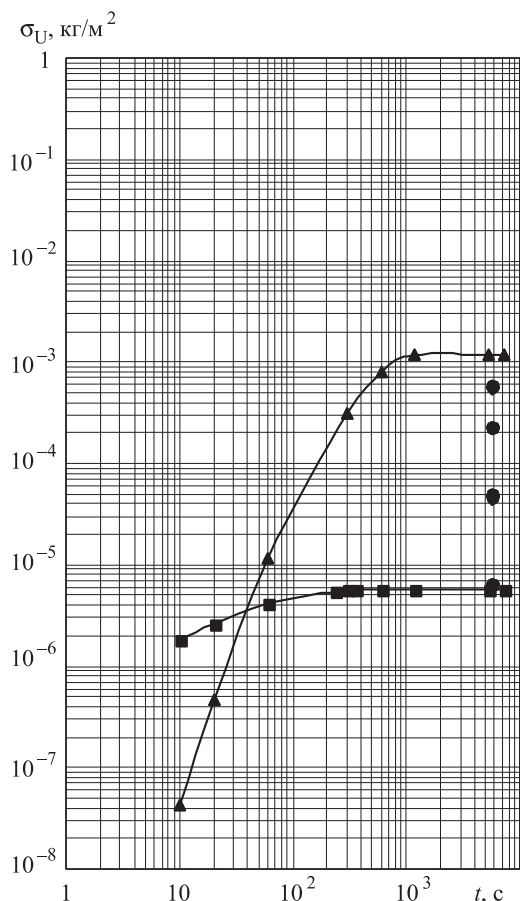


Рис. 1. Динамика поверхностной плотности массы урана

2. На измерительные стекла и одежду человека аэрозоли оседают, но значения σ_U при этом нестабильны из-за вторичного сдува и не строго вертикального оседания аэрозольных частиц. Эти эффекты меньше всего проявляются для фильтров Петрянова, приспособленных для удерживания попавших на них частиц.

Проводился расчет доз, полученных экспериментаторами за время модельного эксперимента (так как эксперимент проводился в противогазах, то речь идет о перкутанном поступлении). Рассчитывалась эффективная доза излучения урана, и рассчитывались массы депонированных токсичных веществ. Найденные величины сравнивались с известными из литературы экспериментальными пороговыми значениями, после превышения которых наступают необратимые изменения в организме человека. На основании этого сравнения прогнозировалось ожидаемое состояние экспериментаторов. Это состояние сравнивалось с реальным и делалось заключение относительно возможности использования комплексной модели для оценки воздействия гексафторида урана и продуктов его гидролиза на человека.

Расчет, проведенный для условий модельного эксперимента, показал следующее. За время пребывания в «аварийном» помещении поступление по активности в организмы экспериментаторов составило $A = 1.5 \cdot 10^4$ Бк, а эффективная доза, которую должен был получить человек в последующие годы от поступившего в организм урана, составила $E = 1.33 \cdot 10^{-2}$ мЗв. Согласно литературным экспери-

ментальным данным [17], предельно допустимая доза для разового поступления составляет $E = 0.3$ мЗв. Из сравнения экспериментальных и теоретических значений следует, что никаких заболеваний полученные дозы вызвать не должны были.

Относительно воздействия фтора на человека в модельном эксперименте можно сказать следующее. Согласно расчету, при реализованной в эксперименте начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ за 1.5 ч в организм должен был поступить фтор в количестве $m = 4.755$ мг. Согласно литературным данным [18], такое поступление фтора не должно приводить к серьезным изменениям в организме. Этот, полученный теоретическим путем, результат хорошо согласуется с тем фактом, что участники эксперимента не испытали негативного влияния фтора.

Следующая возможность сопоставления теоретических и экспериментальных результатов представилась при анализе данных, полученных патологоанатомами, исследовавшими трупы людей, погибших в результате аварии [18, 19]. Приведем результаты, полученные на примере одной из пострадавших (пострадавшая К), которая 15 мин пребывала в облаке UF_6 и продуктов его гидролиза. В состав ГФУ входил природный уран, удельная активность которого $A_{\text{sp}} = 2.52 \cdot 10^7$ Бк/кг, а энергия одной α -частицы $\overline{W}_\alpha = 4.26 \cdot 10^6$ эВ. Дезактивация кожи пострадавшей после выхода из аварийной обстановки не проводилась. Исход был летальный. Смерть наступила через 5 ч после выхода. Органы дыхания во время пребывания в аварийной ситуации были защищены. После смерти пострадавшей в ее организме (во всех органах) патологоанатомами был найден фтор в количестве $m = 1713$ мг.

Теоретическим путем показано, что поступление фтора в организм человека в таком количестве за 15 мин пребывания в аварийной обстановке (и за 5 ч жизни после аварии) соответствует начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_0 \approx 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Это число укладывается в рамки теоретически возможных значений концентрации молекул ГФУ, поскольку максимально возможное значение, соответствующее насыщенным парам гексафторида урана, равно $3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

В табл. 1 приведены рассчитанные при оцененной начальной концентрации молекул гексафторида урана $n_0 \approx 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ значения масс токсичных веществ, поступивших в организм человека за 15 мин пребывания в аварийной обстановке (и за 5 ч жизни после аварии).

Таблица 1

Поступления масс токсичных веществ в организм человека

$n_0 = 3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, ^{235}U — 0.731 % (для пострадавшей К)		
	m , мг; $t = 15$ мин	m , мг; $t = 5$ ч
Уран в кровотоке	0.93	14.81
Фтор	$4.36 \cdot 10^2$	$1.77 \cdot 10^3$

Видно, что к моменту смерти ($t = 5$ ч) в организм попало большое количество как урана, так и фтора (дезактивации не было). Однако скорость нарастания массы фтора в организме гораздо больше. Уже через 15 мин поступившее количество фтора (436 мг) способ-

но обеспечить летальный исход [18], в то время как уран, поступивший к этому моменту времени (94 мг), не способен нанести серьезный ущерб [20]. Поэтому можно с уверенностью заключить, что смерть людей наступала от воздействия фтора.

Сравнивались экспериментальные и теоретические значения концентрации атомов урана в воздухе рабочего помещения (модельный эксперимент). Соответствующие результаты приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что экспериментальные и теоретические значения концентрации атомов урана находятся в хорошем согласии. На рис. 2 изображена зависимость концентрации атомов урана в составе газов (вдали от стенок рабочего помещения) от времени.

Таблица 2
Динамика концентрации атомов урана

t	n_{th}, M^{-3}	n_{exp}, M^{-3}
1 мин	$3.231 \cdot 10^{20}$	$3.9 \cdot 10^{20}$
7 мин	$5.433 \cdot 10^{20}$	10^{21}
13 мин 30 с	$3.411 \cdot 10^{20}$	$8.6 \cdot 10^{20}$
27 мин	$1.8301 \cdot 10^{20}$	$7.6 \cdot 10^{20}$
45 мин	$1.057 \cdot 10^{20}$	$4.4 \cdot 10^{20}$
1 ч 10 мин	$6.144 \cdot 10^{19}$	$2.1 \cdot 10^{20}$
1 ч 20 мин	$5.149 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{20}$
2 ч 55 мин	$1.615 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$
6 ч	$4.571 \cdot 10^{18}$	10^{18}
12 ч	$1.133 \cdot 10^{18}$	$4.1 \cdot 10^{17}$
1 сут	$2.340 \cdot 10^{17}$	$7.3 \cdot 10^{16}$

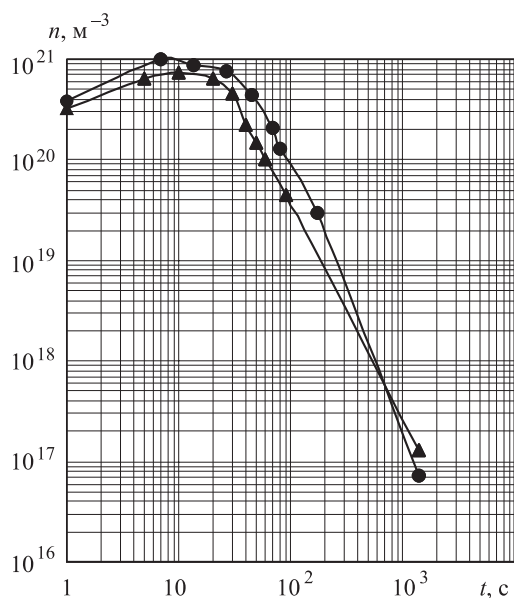


Рис. 2. Динамика концентрации атомов урана

Заключение

В заключение можно сказать, что во всех рассмотренных случаях рассчитанные в рамках комплексной модели значения величин и предсказанные теорией ситуации находятся в соответствии с реально наблю-

давшимися значениями и реально происходившими событиями.

Важнейшим параметром, позволяющим медикам ориентироваться в вопросе оказания помощи пострадавшим, является уровень депонированного в организме токсичного вещества. Расчетные методы позволяют определять эту величину в режиме реального времени по концентрации молекул гексафторида урана в момент аварийного выброса (автоматическое измерение которой в соответствующих помещениях должно быть налажено на каждом предприятии атомной промышленности). Экспериментальные же методы (наблюдение динамики активности урана в суточной моче) определяют эту величину минимум за сутки. Поэтому можно сказать, что расчетные методы являются хорошим дополнением к существовавшим ранее экспериментальным методам.

Список литературы

1. Григорьев Г.Ю., Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш. и др. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF_6 в HF-атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона. Препринт ИАЭ 6395/12. М., 2006.
2. Бадьин В.И. и др. Гидролиз газообразного гексафторида урана в воздухе // Отчет предприятия п/я М-5122 и п/я В-2343. ИК № М 34559. ЦНИИ Атоминформ, 1975.
3. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Бадьин В.И. // Изв. Акад. промыш. экологии. 2002. № 4. С. 70.
4. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Бадьин В.И. // Изв. Акад. промыш. экологии. 2003. № 2. С. 70.
5. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 1. С. 36.
6. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Матем. моделирование. 2006. 18, № 3. С. 13.
7. Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2007. № 3 (26). С. 89.
8. Бабенко С.П. // Атом. энергия. 2007. 103, № 2. С. 103.
9. Рекомендации МКРЗ. Публ. 30. Ч. 2. М., 1983.
10. Рекомендации МКРЗ. Публ. 30. Ч. 3. М., 1983.
11. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публ. 60. Ч. 2. Радиационная безопасность / Пер. с англ. М., 1994.
12. Мирхайдаров А.Х. Исследование закономерностей загрязнения воздушной среды и поверхностей в производстве разделения изотопов урана: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1978.
13. Мирхайдаров А.Х., Бабенко С.П., Бадьин А.В. // Изв. Акад. пром. экологии. 2002. № 1. С. 67.
14. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955.
15. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М., 1983.
16. Мордашева В.В. Содержание и распределение урана в организме человека при различных путях поступления: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИБФ МЗ.
17. Гусев Н.Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите / Под ред. У.Я. Маргулиса. М., 1956.
18. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А. и др. // Радиц. медицина. 2001. 2. С. 369.
19. Руководство по организации медицинского обслуживания лиц, подвергшихся действию ионизирующего излучения / Под ред. акад. АМН СССР Л.А. Ильина. М., 1986.
20. Гастева Г.Н., Мордашева В.В., Гуськова А.К. и др. Работа с соединениями урана: Руководство по организации медицинского обслуживания лиц, подвергшихся действию ионизирующего излучения / Под ред. акад. АМН СССР Л.А. Ильина. М., 1986.

Verification of a mathematical model that describes the action of uranium hexafluoride on the human body in facilities of the atomic industry**S. P. Babenko^{1,a}, A. V. Bad'in^{2,b}**¹*Department «Physics», Faculty of Fundamental Sciences, N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia.*²*Department of Mathematics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^a babenkosvetlana@mail.ru, ^b badyin@phys.msu.ru.*

A complex mathematical model that describes the action on the human body of uranium hexafluoride that enters the air of the work space in facilities of the atomic industry is considered. Partial models that describe the pollution of the work space and percutaneous and inhalation entries of toxic substances to the body are discussed. Initial equations are presented and basic experimental premises are considered. The choice of several important parameters of the complex model is discussed. The predictions of the model are compared with known experimental results.

Keywords: uranium hexafluoride, mathematical model, distribution function, percutaneous entry, inhalation entry, transmission coefficient.

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

Received 7 December 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2014).

Сведения об авторах

1. Бабенко Светлана Петровна — канд. физ.-мат. наук, 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.