

Бабенко С.П.¹, Бадьин А.В.²

О РАСЧЁТЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ЭФФЕКТА ПРОТЕИНУРИИ У СОТРУДНИКОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки», кафедра «Физика» (ФН-4), 105005, Москва;

²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра математики, 119991, Москва

Введение. В работе рассматривается воздействие на организм человека газообразного гексафторида урана, применяющегося на обогатительных заводах атомной промышленности. Появление в воздухе рабочего помещения гексафторида урана сопровождается его гидролизом и образованием веществ, которые могут попасть в организм человека и принести с собой атомы урана и фтора.

Материал и методы. В статье описан метод нахождения условий работы, не допускающих развития профессиональных заболеваний у сотрудников. Метод основан на расчёте количества токсичных веществ, попадающих в организм человека в повседневных производственных условиях, и сравнении этого количества с пороговыми значениями для различных детерминированных эффектов. В качестве рассматриваемого детерминированного эффекта выбрана протеинурия (обнаружение белка в анализе мочи). Использовались имеющиеся в литературе статистические данные по пороговому значению суточного выхода из организма человека токсичных веществ, длительно поступающих в организм в малых дозах, при котором возникают урологические заболевания. Расчёт проведён в рамках комплексной модели, описывающей загрязнение воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза гексафторида урана, поступление токсичных веществ в организм человека, а также прохождение урана и фтора через организм. Эта модель построена авторами настоящей статьи и изложена в предыдущих публикациях. Для уверенности в том, что теоретические методы дают те же результаты, что и экспериментальные, проводилось сравнение результатов, полученных стандартным методом для сотрудников одного из предприятий атомной промышленности, и теоретическим методом при тех же производственных условиях.

Результаты. Рассмотренный теоретический метод может дополнить и обогатить уже имеющиеся экспериментальные методы выявления начала профессиональных заболеваний, основанные на сборе различных биоматериалов у сотрудников предприятия.

Ключевые слова: уран; фтор; гексафторид урана; математическая модель; функция распределения; ингаляционное поступление; перкутанное поступление; детерминированные эффекты.

Для цитирования: Бабенко С.П., Бадьин А.В. О расчёте детерминированного эффекта протеинурии у сотрудников обогатительных заводов атомной промышленности. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(4): 315-321. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-4-315-321>

Для корреспонденции: Бадьин Андрей Валентинович, канд. физ.-мат. наук, доц. МГУ, физический факультет, кафедра математики. E-mail: badyin@phys.msu.ru

Babenko S.P.¹, Badin A.V.²

ABOUT CALCULATION OF THE DETERMINISTIC EFFECT OF PROTEINURIA IN EMPLOYEES OF ENRICHMENT PLANTS OF NUCLEAR INDUSTRY

¹N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation;

²Department of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

In this paper, we consider the impacts of gaseous uranium hexafluoride used at concentrating plants of the nuclear industry on the human body. The appearance of uranium hexafluoride in the air of the working premises is accompanied by hydrolysis and the formation of substances that can enter the human body and bring atoms of uranium and fluorine. The article describes the method of the determination of the working conditions preventing the development of occupational diseases in employees. The method is based both on the calculation of the number of toxic substances entering the human body in routine working conditions and comparison of this number with the threshold values for different deterministic effects. The proteinuria (protein content in urine) is selected as the considered deterministic effect. We used the published statistics on the threshold of the daily release from the human body toxic substances, long-entering the body in small doses and seem to be responsible for the occurrence of urologic diseases. The calculation was performed in the framework of a complex model describing the air pollution with products of hydrolysis of uranium hexafluoride entering of toxic substances in the human body, in working premises, as well as the passing of uranium and fluorine through the body. This model constructed by the authors of this article was described in previous publications. To ensure that the theoretical methods give the same results as the experimental, the results obtained by the standard method for employees of one of the enterprises of nuclear industry were compared with the data obtained using the theoretical method under the same working conditions. The considered theoretical method can complement and enrich the existing experimental methods for

the identification of the onset of occupational diseases based on the sampling of different biomaterials from the employees working at enterprises.

Key words: *uranium; fluorine; uranium hexafluoride; mathematical model; inhalation; percutaneous entry; deterministic effects.*

For citation: Babenko S.P., Badin A.V. About calculation of the deterministic effect of proteinuria in employees of enrichment plants of nuclear industry. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2018; 97(4): 315-321. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-4-315-321>

For correspondence: *Andrey V. Badin, MD, Ph.D., Associate professor of the Department of Mathematics of the Physical Faculty of the M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: badyin@phys.msu.ru*

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study had no sponsorship.

Received: 03 March 2017

Accepted: 18 October 2017

Введение

Известно, что при обогащении природного урана изотопом ^{235}U используется газообразный UF_6 (гексафторид урана, ГФУ). На производстве гексафторид урана хранится в специальных ёмкостях под давлением, превышающем давление тройной точки, и при температуре, превышающей температуру плавления. При этом большая часть ГФУ находится в твёрдом или в жидком агрегатном состоянии, а меньшая – в газообразном. Характеристики тройной точки гексафторида урана: $p = 1134$ мм рт. ст., $t = 64,052$ °C [1]. Так как давление тройной точки ГФУ больше атмосферного, то понятно, что даже при строгом соблюдении производственного режима можно ожидать некоторого загрязнения воздуха производственного помещения газообразным гексафторидом урана.

Известно [2], что, попадая в воздух рабочего помещения, газообразный UF_6 взаимодействует с парами воды (участвует в процессе гидролиза). В результате в воздухе появляются 3 новых газа: UOF_4 , UO_2F_2 (уранилфторид), HF (фтороводород). Молекулы двух из них склонны к образованию сложных комплексных частиц (склонны к нуклеации). В результате за короткое время ($\Delta t \approx 50$ с) [3] в воздухе рабочего помещения появляются следующие вещества: UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль). Все эти вещества представляют опасность для человека [4, 5], поскольку являются носителями атомов урана и фтора. Попадая в организм, уран оказывает на человека негативное воздействие как химическое, так и радиационное (уран α -активен). Атомы фтора представляют особую опасность в составе фтороводорода. Далее мы будем называть «активными» те атомы фтора, которые в процессе гидролиза войдут в состав фтороводорода.

Вышесказанное означает, что при промышленном использовании гексафторида урана достаточно остро стоит проблема обеспечения безопасности труда. В плане решения этой проблемы проделана большая работа как зарубежными, так и отечественными специалистами. Многие исследования зарубежных авторов нашли своё отражение в публикациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ, International Commission on Radiological Protection, ICRP) [6, 7]. Следует заметить, что обычно рассматриваются отдельные звенья длинной цепи событий: попадание гексафторида урана в воздух рабочего помещения, гидролиз, нуклеация, попадание продуктов гидролиза в организм человека, прохождение через так называемые барьерные органы, прохождение через организм, воздействие на организм. Однако на сегодняшний день имеется серия работ авторов настоящей статьи, в которой сделана попытка построения комплексной модели, описывающей (с разумной точностью) воздействие

гексафторида урана на организм человека [8–11]. В настоящей работе описана возможность использования комплексной модели воздействия гексафторида урана на организм человека в целях организации наилучших условий труда и предохранения людей от профессиональных заболеваний. Применение методов математического моделирования делает статью оригинальной, т. к. обычно с этой целью используются экспериментальные биофизические исследования различных выделений организма человека.

Материал и методы

В основе комплексной модели, описывающей воздействие гексафторида урана на организм человека, лежат следующие частные модели: модель, описывающая загрязнение воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ [8–11], модель, описывающая прохождение токсичных веществ (урана и фтора) через организм человека при перкутанном (через кожу) поступлении [11], модель, описывающая прохождение токсичных веществ через организм человека при ингаляционном (через дыхательную систему) поступлении [6, 11].

При построении модели загрязнения воздуха рабочего помещения сделаны следующие предположения:

- в воздухе рабочего помещения находятся вещества: UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль) и пары воды;
- вещества UF_6 (газ), UOF_4 (газ), UO_2F_2 (газ), HF (газ), UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль) оседают на пол, потолок и стены рабочего помещения за счёт диффузии (здесь коэффициенты диффузии интересующих нас веществ в составе аэрозолей много меньше коэффициентов диффузии интересующих нас веществ в составе газов);
- вещества UO_2F_2 (аэрозоль), HF (аэрозоль) оседают на пол рабочего помещения под действием силы тяжести и силы сопротивления среды;
- вещества UF_6 (газ) и UOF_4 (газ) взаимодействуют с парами воды (участвуют в процессе гидролиза);
- молекулы веществ UO_2F_2 (газ) и HF (газ) образуют аэрозольные частицы различных радиусов (участвуют в процессе нуклеации);
- интересующие нас вещества выводятся из рабочего помещения за счёт воздухообмена (в грубом приближении принималось, что частицы интересующих нас веществ исчезают в каждой точке рабочего помещения);
- молекулы вещества UF_6 (газ) возникают в каждой точке рабочего помещения (предполагается, что плотность мощности внешних источников этих молекул известна).

В основе модели загрязнения воздуха рабочего помещения лежат начально-краевые задачи, поставленные для уравнений непрерывности, записанных для concentra-

Некоторые значения функции \bar{F}_i

A_r (Ки · л ⁻¹)	A_r (Бк · м ⁻³)	$\bar{F}_i(K, A_r)$ (м ⁻³ · с ⁻¹) $K = 0$ ч ⁻¹	$\bar{F}_i(K, A_r)$ (м ⁻³ · с ⁻¹) $K = 3$ ч ⁻¹
$1,0 \cdot 10^{-15}$	$3,700 \cdot 10^{-2}$	$3,633 \cdot 10^{13}$	$3,880 \cdot 10^{13}$
$2,5 \cdot 10^{-14}$	$9,250 \cdot 10^{-1}$	$9,083 \cdot 10^{14}$	$9,699 \cdot 10^{14}$
$5,0 \cdot 10^{-14}$	1,850	$1,817 \cdot 10^{15}$	$1,940 \cdot 10^{15}$
$7,5 \cdot 10^{-14}$	2,775	$2,725 \cdot 10^{15}$	$2,910 \cdot 10^{15}$
$1,0 \cdot 10^{-13}$	3,700	$3,633 \cdot 10^{15}$	$3,880 \cdot 10^{15}$
$2,0 \cdot 10^{-13}$	7,400	$7,266 \cdot 10^{15}$	$7,759 \cdot 10^{15}$
$5,0 \cdot 10^{-13}$	$1,850 \cdot 10^1$	$1,817 \cdot 10^{16}$	$1,940 \cdot 10^{16}$

ций молекул интересующих нас веществ в составе газов и для удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей (мы отдельно рассматриваем урансодержащее вещество UO_2F_2 и фторсодержащее вещество HF). В то уравнение непрерывности, которое записано для удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей, входит дифференциальная функция распределения g_0 радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации (здесь $g_0(r)$ – плотность вероятности того, что в процессе нуклеации молекула интересующего нас вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса r). С помощью модели загрязнения воздуха рабочего помещения получены аналитические выражения для следующих величин: $n_g(z, t)$ ($n_a(z, t)$) – концентрация атомов токсичного вещества в составе газов (аэрозолей) на высоте z в момент времени t ; $j_g(t)$ – плотность потока числа атомов токсичного вещества в составе газов на поверхности кожи в момент времени t (согласно ранее проведенному исследованию [12], токсичные вещества в составе аэрозолей перкутанно в организм человека не поступают).

Описанная модель является наиболее оригинальной частью комплексной модели и лежит в основе возможности описания прохождения токсичных веществ через организм. Это связано с тем, что результаты, полученные в рамках первой модели, можно рассматривать как входные данные для второй и третьей моделей. Соответственно, пользуясь сначала первой, а затем второй (при изучении перкутанного поступления) и третьей (при изучении ингаляционного поступления) моделями, можно провести расчёт доз токсичных веществ, получаемых человеком в процессе производственной деятельности на обогатительных заводах.

В модели прохождения токсичных веществ через организм человека при перкутанном поступлении найдены (с использованием аналитического выражения для величины $j_g(t)$): $N_1(t)$ – 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 ; $N_4(t)$ – число атомов урана, находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_5(t)$ – число атомов урана, вышедших из организма с мочой на временном промежутке $[0, t]$. Атомы фтора, проникшие в глубину кожи, не задерживаясь, поступают в кровоток, поэтому для фтора величина $N_3(t)$ не вводится.

В модели прохождения токсичных веществ через организм человека при ингаляционном поступлении найдены (с использованием аналитических выражений для величин $n_g(z, t)$, ($n_a(z, t)$): $N_1(t)$ – число атомов токсичного вещества, попавших в организм при вдохе, на временном промежутке $[0, t]$; $N_4(t)$ – число атомов токсичного вещества, находящихся в кровотоке в момент времени t ; $N_5(t)$ – число атомов токсичного вещества, вышедших из организма с мочой на временном промежутке $[0, t]$.

При построении комплексной модели воздействия UF_6 на организм человека большую роль сыграл эксперимент, моделирующий аварийную ситуацию на предприятии атомной промышленности. Этот эксперимент позволил определить функцию g_0 для UO_2F_2 , а также ряд постоянных, описывающих прохождение урана через организм человека. Эксперимент проведен сотрудниками Института биофизики Министерства здравоохранения СССР (ИБФ МЗ СССР, Москва) и Электрохимического завода (ЭХЗ, бывший п/я М-5122, Зеленогорск). Обработка результатов эксперимента позволила сделать вывод [11], что

функция g_0 описывается логарифмически нормальным законом с геометрическим средним $r_g = 2,744 \cdot 10^{-6}$ м и геометрическим стандартным отклонением $\beta_g = 2,18$ (безразмерная величина).

В настоящей работе рассматривается поступление токсичных веществ в организм человека в повседневных производственных условиях. В этом случае величины $n_g(z, t)$, $n_a(z, t)$, $j_g(t)$ не зависят от переменной t , что позволяет использовать обозначения: $n_g(z)$, $n_a(z)$, $j_g(t)$. Для нахождения величин $N_1(t)$ – $N_5(t)$ сначала вычисляются вклады в каждую из этих величин от каждого рабочего дня на временном промежутке $[0, +\infty)$, а затем производится суммирование по всем рабочим дням. При этом мы предполагаем, что в конце каждого рабочего дня сотрудник проходит дезактивацию кожи.

Результаты

Прежде чем использовать теоретические данные по прохождению токсичных веществ через организм человека, необходимо сравнить эти данные с экспериментальными и сделать вывод относительно возможности их использования. В настоящей работе проводилось сравнение теоретической и экспериментальной массы фтора в суточной моче сотрудников обогатительного завода.

Сравнение проводилось для фтора по следующей причине. Первые случаи отравления газообразным гексафторидом урана происходили при авариях на объектах Манхэттенского проекта [13]. Долгое время авторы публикаций, посвящённых вопросам радиационной безопасности, полагали, что основной причиной отравления людей был уран [14, 15]. Однако в 70–80-х годах XX века в нашей стране произошло несколько аварий на предприятиях атомной промышленности. Работа с пострадавшими в этих аварийных ситуациях позволила рассмотреть вопросы о сравнительной значимости токсичных веществ – урана и фтора. Подробные исследования показали, что более токсичным элементом в составе продуктов гидролиза ГФУ является именно фтор.

Наблюдения за людьми с профессиональными заболеваниями и пострадавшими в аварийных ситуациях показали [5], что одним из первых последствий контакта с гексафторидом урана является протеинурия (обнаружение белка в анализе мочи). Поэтому на соответствующих предприятиях всегда организуют регулярные диспансеризации сотрудников, при которых особое внимание уделяется выявлению урологических заболеваний. Медицинские санитарные части этих предприятий функционируют в тесном контакте с научными организациями, в которых медики, химики и физики совместно работают над проблемой установления связи между воздействием на человека химически токсичных и радиоактивных веществ и от-

Экспериментальные данные, $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; масса фтора в суточной моче (мг)

Цех	Год						Итог (среднее)
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
Химический	1,4/15,5	1,9/12	2,6/14,4	3,2/11,9	3/11,6	2/9	2,4/12,4
Электролизный	1,6/4,1	1,2/5,1	2,3/6,4	2,6/6,6	2,2/8,99	2,1/15,7	2/7,8
Контрольная группа	1,2/2,7	1,2/2,6	1,4/2,3	1,5/2,2	1,3/2,3	1,4/2,4	1,3/2,4
Химический (разность)	0,2/12,8	0,7/9,4	1,2/12,1	1,7/9,7	1,7/9,3	0,6/6,6	1,1/10
Электролизный (разность)	0,4/1,4	0/2,5	0,9/4,1	1,1/4,4	0,9/6,69	0,7/13,3	0,7/5,4

кликом организма на это воздействие [5, 16–18]. Большую роль в решении этих вопросов сыграли исследования на животных, а также лечение людей с профессиональными заболеваниями и пострадавших в аварийных ситуациях, которые случались и за рубежом, и в нашей стране [5, 13].

Установлено [5], что серьёзный шанс получить заболевание почек имеют сотрудники, у которых суточный выход фтора с мочой составляет $m \approx 10$ мг. Подобные ситуации отслеживаются с помощью широкомасштабных мероприятий по сбору суточной мочи и исследованию её на предмет содержания фтора. Такой метод контроля сопряжён с практическими трудностями и большой потерей времени на диагностические мероприятия. Поэтому появление теоретического метода определения суточного выхода фтора с мочой может существенно упростить фиксирование начала заболевания и предотвращение его развития.

В настоящей работе приведены результаты расчёта поступления токсичных веществ в организм человека в повседневных производственных условиях. С помощью моделей, описанных выше, были получены зависимости массы фтора в суточной моче сотрудника обогатительного завода от следующих параметров:

- от кратности воздухообмена (K) в рабочем помещении;
- от производственного режима в рабочем помещении;
- от расположения рассматриваемых суток относительно момента начала трудовой деятельности;
- от способа поступления фтора в организм (перкутанное поступление с газами, ингаляционное поступление с газами, ингаляционное поступление с аэрозолями).

Величина K определяет, сколько раз в единицу времени воздух в рабочем помещении обновляется системами очищения. В нашей комплексной модели введена величина $F_1(\vec{x})$, означающая плотность мощности внешних источников молекул ГФУ в точке \vec{x} (величина $F_1(\vec{x})$

определяет число молекул ГФУ, появляющихся в единице объёма в единицу времени). Производственный режим в рабочем помещении определяется указанием величины $F_1(\vec{x})$ для каждой точки \vec{x} (в настоящей работе мы предполагаем, что величина $F_1(\vec{x})$ не зависит от переменной \vec{x} , что позволяет использовать обозначение F_1). Зная величины K, F_1 , и решая основные начально-краевые задачи, можно найти концентрацию атомов урана в составе газов вдали от стенок рабочего помещения (n_U). Зная n_U , нетрудно найти плотность активности урана в составе газов вдали от стенок рабочего помещения ($A_U = A_{sp} m_0 n_U$, здесь: $A_{sp} = 2,467 \cdot 10^7 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ – удельная активность урана, $m_0 = 238 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – масса атома урана). Наконец, зная K, A_U , можно найти F_1 (в силу линейности основных начально-краевых задач, величина F_1 прямо пропорциональна величине A_U , при этом коэффициент пропорциональности нелинейно зависит от K). Следует заметить, что величины K, A_U могут быть измерены непосредственно. Величина F_1 соответствующая величинам K, A_U , обозначена через $\bar{F}_1(K, A_U)$. В табл. 1 приведены некоторые значения функции \bar{F}_1 , соответствующие реальным значениям K, A_U на производстве.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные, полученные на одном из предприятий атомной промышленности. Данные относятся к трём группам людей: к группе сотрудников химического цеха, к группе сотрудников электролизного цеха и к контрольной группе людей, живущих недалеко от предприятия, но не являющихся его сотрудниками. В рассматриваемых цехах работы проводились при следующих производственных условиях: $K = 3 \text{ ч}^{-1}, F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ($K = 3 \text{ ч}^{-1}, A_U = 9,250 \cdot 10^{-1} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$). Во 2–7-м столбцах таблицы (строки 2–4) приведены среднее по выборке людей (числитель) и максимальное по выборке людей (знаменатель) значения массы фтора в суточной моче. Результаты усреднены по рассматриваемому году. В восьмом столбце таблицы (строки 2–4) приведены аналогичные результаты, усреднённые по всем годам. В пятой и шестой строках таблицы приведены разности результатов для рассматриваемой и контрольной групп, т. е. дополнительные поступления за счёт работы на предприятии.

На основании этих экспериментальных данных (см. табл. 2) можно сказать следующее. Хотя, как отмечают авторы экспериментального исследования, условия работы сотрудников двух цехов были одинаковыми, средний суточный выход фтора отличается примерно в полтора раза (для одного года), а различие между максимальными суточными выходами фтора достигает 11,4 мг (для одного года). Следует заметить, что различие между максимальными суточными выходами фтора (для разных лет) у людей контрольной группы практически отсутствует. Эти результаты можно объяснить лишь в том случае, если учесть, что человек может не только работать в од-

Таблица 3

Теоретические данные, $K = 0 \text{ ч}^{-1}, F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

Наблюдаемая величина	Способ поступления токсичного вещества в организм человека			
	перкутанное (газ)	ингаляционное (газ)	ингаляционное (аэрозоль)	перкутанное (газ) + ингаляционное (газ + аэрозоль)
m_1 (мг)	$3,985 \cdot 10^{-2}$	$4,417 \cdot 10^{-2}$	3,171	3,255
m_2 (мг)	$7,362 \cdot 10^{-2}$	$7,601 \cdot 10^{-2}$	5,456	5,606
m_3 (мг)	$9,311 \cdot 10^{-2}$	$8,722 \cdot 10^{-2}$	6,261	6,441
m_4 (мг)	$1,067 \cdot 10^{-1}$	$9,321 \cdot 10^{-2}$	6,691	6,891
m_5 (мг)	$1,068 \cdot 10^{-1}$	$9,327 \cdot 10^{-2}$	6,695	6,895
m_6 (мг)	$1,068 \cdot 10^{-1}$	$9,327 \cdot 10^{-2}$	6,695	6,895

Таблица 4

Теоретические данные, $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$

Наблюдаемая величина	Способ поступления токсичного вещества в организм человека			
	перкутанное (газ)	ингаляционное (газ)	ингаляционное (аэрозоль)	перкутанное (газ) + ингаляционное (газ + аэрозоль)
m_1 (мг)	$3,836 \cdot 10^{-2}$	$4,149 \cdot 10^{-2}$	$1,609 \cdot 10^{-1}$	$2,407 \cdot 10^{-1}$
m_2 (мг)	$7,086 \cdot 10^{-2}$	$7,139 \cdot 10^{-2}$	$2,768 \cdot 10^{-1}$	$4,190 \cdot 10^{-1}$
m_3 (мг)	$8,962 \cdot 10^{-2}$	$8,192 \cdot 10^{-2}$	$3,176 \cdot 10^{-1}$	$4,891 \cdot 10^{-1}$
m_4 (мг)	$1,027 \cdot 10^{-1}$	$8,755 \cdot 10^{-2}$	$3,394 \cdot 10^{-1}$	$5,296 \cdot 10^{-1}$
m_5 (мг)	$1,028 \cdot 10^{-1}$	$8,761 \cdot 10^{-2}$	$3,396 \cdot 10^{-1}$	$5,301 \cdot 10^{-1}$
m_6 (мг)	$1,028 \cdot 10^{-1}$	$8,761 \cdot 10^{-2}$	$3,396 \cdot 10^{-1}$	$5,301 \cdot 10^{-1}$

ном цеху, но и переходить при необходимости из одного цеха в другой с различными условиями работы.

В табл. 3, табл. 4 приведены следующие величины: m_1 – масса фтора в суточной моче за первые рабочие сутки, m_2 – масса фтора в суточной моче за третьи рабочие сутки, m_3 – масса фтора в суточной моче за последние сутки недели работы, m_4 – масса фтора в суточной моче за последние сутки месяца работы, m_5 – масса фтора в суточной моче за последние сутки двух месяцев работы, m_6 – масса фтора в суточной моче за последние сутки года работы. При этом рассматриваются следующие способы поступления фтора в организм человека: перкутанное поступление в составе газов, ингаляционное поступление в составе газов, ингаляционное поступление в составе аэрозолей и следующие условия работы: $K = 0 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Функциональную зависимость массы фтора в суточной моче от номера рассматриваемых суток можно представить как линейную комбинацию (с вещественными положительными коэффициентами) вспомогательных функций следующего вида: $\varphi(n) = C_0 - C_1 e^{-\lambda_1(n-1)}$ при $n \in \mathbb{N}$ (здесь: $C_0, C_1, \lambda_1 > 0$, $C_1 < C_0$ – некоторые коэффициенты). Используя эту информацию и результаты численных расчётов (часть этих результатов приведена в табл. 3, 4), динамику суточного выхода фтора с мочой можно описать следующим образом. Масса фтора в суточной моче строго возрастает. В первую неделю рост достаточно заметен (приблизительно в 2 раза). Однако уже через месяц работы суточный выход фтора с мочой практически перестаёт изменяться со временем. Так как диспансеризация сотрудников в первые дни работы не проводится, то сравнивать с экспериментальными данными будем только значения величины m_6 . Видно, что экспериментальные данные и теоретические данные при $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, находятся в разумном соответствии (особенно, если учесть сильный разброс экспериментальных данных). Это позволяет использовать теоретические данные для оценки суточного выхода фтора с мочой из организма сотрудника предприятия, на котором используется газообразный ГФУ. Следует заметить, что наибольший вклад в прохождение фтора через организм человека вносит ингаляционное поступление в составе аэрозолей. Перкутанное поступление в составе газов и ингаляционное поступление в составе газов обеспечивают заметно меньший (и приблизительно одинаковый) транзит фтора через организм человека. Обращает внимание и то, что воздухообмен практически не влияет на перкутанное поступление в составе газов и на ингаляционное поступление в составе газов, однако

Таблица 5

Теоретические данные, m_6 (мг), перкутанное (газ) + ингаляционное (газ + аэрозоль)

$F_1 (\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1})$	$K = 0 \text{ ч}^{-1}$	$K = 3 \text{ ч}^{-1}$
$3,880 \cdot 10^{13}$	$2,758 \cdot 10^{-1}$	$2,120 \cdot 10^{-2}$
$9,699 \cdot 10^{14}$	6,895	$5,301 \cdot 10^{-1}$
$1,940 \cdot 10^{15}$	$1,379 \cdot 10^1$	1,060
$2,910 \cdot 10^{15}$	$2,069 \cdot 10^1$	1,590
$3,880 \cdot 10^{15}$	$2,758 \cdot 10^1$	2,120
$7,759 \cdot 10^{15}$	$5,516 \cdot 10^1$	4,240
$1,940 \cdot 10^{16}$	$1,379 \cdot 10^2$	$1,060 \cdot 10^1$

оказывает сильное воздействие на ингаляционное поступление в составе аэрозолей. При переходе от $K = 0 \text{ ч}^{-1}$ к $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ масса фтора в суточной моче за счёт ингаляционного поступления в составе аэрозолей уменьшается приблизительно в 20 раз.

В табл. 5 приведены теоретические значения массы фтора в суточной моче для двух значений кратности воздухообмена и для набора значений плотности мощности внешних источников молекул ГФУ.

Значение $F_1 = 3,880 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ соответствует стандартному производственному режиму в большинстве рабочих помещений. Значение $F_1 = 7,759 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ соответствует самому жёсткому производственному режиму на предприятиях рассматриваемого типа. Из данных табл. 5 следует, что:

- при отсутствии воздухообмена длительно работать можно только в производственных помещениях, где $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, т. к. только в них нет серьёзной опасности получить нефрологические заболевания;
- в присутствии воздухообмена кратности $K = 3 \text{ ч}^{-1}$ можно работать даже в производственных помещениях, где $F_1 = 1,940 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, но не каждодневно, т. к. при этом в суточной моче содержится такое количество фтора, которое немного превосходит барьер заболевания почек.

Для того чтобы по приведённым в таблицах теоретическим данным можно было определить массу фтора в суточной моче конкретного человека, нужно иметь информацию:

- о кратности воздухообмена в интересующем нас рабочем помещении на интересующем нас временном промежутке;
- о производственном режиме в интересующем нас рабочем помещении на интересующем нас временном промежутке;
- об использовании человеком средств защиты от перкутанного и ингаляционного поступлений продуктов гидролиза ГФУ.

Кратность воздухообмена K и плотность активности урана в составе газов вдали от стенок A_V в каждом рабочем помещении измеряется постоянно. Зная эти величины, можно вычислить $\bar{F}_1(K, A_V)$. Если в рассматриваемом производственном помещении на рассматриваемом временном промежутке условия работы изменялись, или если на рассматриваемом временном промежутке сотрудник переходил из одного производственного помещения в другое с разными условиями работы, то при расчёте массы фтора в суточной моче нужно взять наиболее жёсткое сочетание условий работы на рассматриваемом временном промежутке. Если человек работал в противогазе или в респираторе, то из теоретических данных нужно исключить ингаляционное поступление. У людей, для которых

расчёты покажут массу фтора в суточной моче близкую к барьерному значению для протеинурии (и только у них, а не у всех сотрудников), необходимо взять проверочный анализ мочи.

Заключение

В статье оценивается возможность использования предлагаемого авторами теоретического метода определения накопления токсичных веществ в организмах людей, работающих с гексафторидом урана. Прделана следующая работа:

охарактеризована комплексная модель, построенная ранее авторами настоящей статьи, описывающая появление в рабочем помещении урана и фтора и прохождение этих токсичных веществ через организм человека. В основе этой комплексной модели лежат частные модели: модель, описывающая загрязнение воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ [8–11], модель, описывающая прохождение токсичных веществ через организм человека при перкутанном поступлении [11] и модель, описывающая прохождение токсичных веществ через организм человека при ингаляционном поступлении [6, 11]. Перечислены физические и математические предположения, сделанные при построении каждой из упомянутых моделей. Перечислены результаты, полученные в рамках каждой из частных моделей, которые могут быть использованы для расчёта поступления урана и фтора в организм человека и прохождения их через организм.

Для оценки условий работы на предмет исключения профессиональных заболеваний рассмотрен детерминированный эффект протеинурии, порогом возникновения которого, согласно литературным данным, является наличие в суточной моче сотрудника $m \approx 10$ мг фтора.

Приведены экспериментальные данные по суточному выводу фтора с мочой у сотрудников конкретного предприятия атомной промышленности, работающих при следующих производственных условиях: $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $F_1 = 9,699 \cdot 10^{14} \text{ М}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ($K = 3 \text{ ч}^{-1}$, $A_V = 9,250 \cdot 10^{-1} \text{ Бк} \cdot \text{М}^{-3}$).

Приведены результаты расчёта, в рамках построенной модели, суточного выхода фтора из организма сотрудников с различным стажем работы для производственных условий, при которых получены экспериментальные результаты.

Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов, полученных в рамках построенной модели. Сделано заключение, что описанный теоретический метод нахождения суточного выхода фтора с мочой может быть использован для определения, с хорошей точностью, условий работы, при которых достигается порог детерминированных урологических эффектов. Этот более быстро реализуемый метод сможет и заменить и дополнить широко использующийся экспериментальный метод биофизического исследования.

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов по суточному выводу фтора с мочой из организма человека после некоторого времени производственной деятельности позволяет думать, что расчёт может быть использован и для оценки динамики депонирования фтора в организме человека, а значит открывает возможность фиксирования профессиональных заболеваний.

Чтобы использовать комплексную модель в практическом здравоохранении, нужно:

– организовать в медсанчасти рассматриваемого предприятия наличие расчётных таблиц для динамики поступления в организм, депонирования в организме и выхода из него фтора для различных видов поступления (перку-

танного или ингаляционного) при различных производственных условиях [8, 10];

– организовать таблицу экспериментальных данных по предельным поступлениям фтора, вызывающим различные детерминированные эффекты [5];

– иметь данные о стаже работы сотрудников предприятия;

– иметь сведения о производственных условиях (кратность воздухообмена K , плотность мощности внешних источников молекул ГФУ F_1) для каждого производственного помещения.

Совокупность этих данных позволит судить о состоянии здоровья каждого сотрудника и вовремя принимать меры для его защиты от профессиональных заболеваний.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Кац Дж., Рабинович Е.М. *Химия урана*. Пер. с англ. М.: ИЛ; 1954.
2. Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю., Вязов И.Е., Малюгин С.Л., Пономарев Ю.Н. и др. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF_6 и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона. *Оптика атмосферы и океана*. 2005; 18(9): 785–794.
3. Мирхайдаров А.Х. Метод и средство измерения гексафторида урана в воздухе. В кн.: *Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Тезисы докладов Международной конференции*. СПб.: Гидрометеоздат; 2000.
4. West C.M., Scott L.M. Uranium cases showing long chest burden retention of uranium. In: *USAEC Report HASL-58*. 1959; 212–213.
5. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Мордашева В.В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции. В кн.: Ильин Л.А., ред. *Радиационная медицина. Том II. Радиационные поражения человека*. М.: ИздАТ; 2001; 369–388.
6. ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
7. Публикация 103 МКРЗ / Пер. с англ. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана»; 2009. 344 с.
8. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Бадьин В.И. Математическое моделирование процесса оседания UF_6 и продуктов его гидролиза в присутствии силы тяжести. *Известия Академии Промышленной Экологии*. 2003(2): 70–85.
9. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Математическая модель ингаляционного поступления в организм человека токсичных веществ в условиях аварийной ситуации на предприятиях атомной промышленности. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия*. 2006(1): 36–39.
10. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Ингаляционное и перкутанное поступление в организм человека токсичных веществ в условиях повседневной производственной деятельности на предприятиях атомной промышленности. *Математическое моделирование*. 2006; 18(3): 13–22.
11. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия*. 2014(2): 22–30.
12. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Определение агрегатного состояния продуктов гидролиза гексафторида урана, оседающих на кожу человека при аварийном выбросе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки»*. 2012; 46(3): 115–125.
13. Howland J.W. Pharmacology and toxicology of uranium com-

- pounds. In: Voegtlin C., Hodge H.C., ed. *Studies on human exposures to uranium compounds*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1949: 993—1017.
14. Богданов Н.А., Гембицкий Е.В. *Производственный флюороз*. Л.: Медицина; 1975.
 15. Андреева О.С., Бад'ин В.И., Корнилов А.Н. *Природный и обогащенный уран. Радиационно-гигиенические аспекты*. М.: Атомиздат; 1979.
 16. Orcutt J.A. et al. The toxicology of compounds of uranium following application to the skin. In: *Pharmacology and toxicology of uranium compounds*. Oak Ridge, Tenn.: U. S. Atomic Energy Commission; 1946.
 17. Галибин Г.П. Распределение урана в организме крыс при ингаляционном введении диураната аммония. *Гигиена и санитария*. 1967(12): 40—43.
 18. Галибин Г.П., Новиков Ю.В. *Токсикология промышленных соединений урана*. М.: Атомиздат; 1976.
- Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2—4).
8. Babenko S.P., Bad'in A.V., Bad'in V.I. Mathematical modeling of sedimentation UF₆ and its hydrolysis products in the presence of gravity. *Izvestiya Akademii Promyshlennoy Ekologii*. 2003(2): 70—85. (in Russian)
 9. Babenko S.P., Bad'in A.V. Mathematical model of inhalation of toxic substances in the human body under emergency conditions of nuclear industry. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 3. Fizika. Astronomiya*. 2006(1): 36—39. (in Russian)
 10. Babenko S.P., Bad'in A.V. Inhaler injection and injection through skin of toxic substances in a human organism under regular industry conditions at factories of nuclear industry. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2006; 18(3): 13—22. (in Russian)
 11. Babenko S.P., Bad'in A.V. Verification of a mathematical model that describes the action of uranium hexafluoride on the human body in facilities of the atomic industry. *Moscow University Physics Bulletin*. 2014; 69(2): 124—133. DOI: 10.3103/S0027134914020040.
 12. Babenko S.P., Bad'in A.V. Determination of the state of aggregation of hydrolysis of uranium hexafluoride products deposited on the skin of a person with the accidental release. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Estestvennye nauki»*. 2012; 46(3): 115—125. (in Russian)
 13. Howland J.W. Pharmacology and toxicology of uranium compounds. In: Voegtlin C., Hodge H.C., ed. *Studies on human exposures to uranium compounds*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1949: 993—1017.
 14. Bogdanov N.A., Gembitskiy E.V. *Production fluorosis*. L.: Meditsina; 1975. (in Russian)
 15. Andreeva O.S., Bad'in V.I., Kornilov A.N. *The natural and enriched uranium. Radiation-hygienic aspects*. М.: Atomizdat; 1979. (in Russian)
 16. Orcutt J.A. et al. The toxicology of compounds of uranium following application to the skin. In: *Pharmacology and toxicology of uranium compounds*. Oak Ridge, Tenn.: U. S. Atomic Energy Commission; 1946.
 17. Galibin G.P. Distribution of uranium in rats when inhaled ammonium diuranate. *Gigiena i sanitariya*. 1967(12): 40—43. (in Russian)
 18. Galibin G.P., Novikov Yu.V. *Toxicology of industrial uranium compounds*. М.: Atomizdat; 1976. (in Russian)

References

1. Katz J.J., Rabinowitch E. *The Chemistry of Uranium*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1951.
2. Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., Grigor'ev G.Yu., Vyazov I.E., Malyugin S.L., Ponomarev Yu.N. et al. Rapid methods for measuring the degree of enrichment of uranium hexafluoride and trace amounts of UF₆ and HF in the atmosphere based on diode lasers near and mid-infrared. *Optika atmosfery i okeana*. 2005; 18(9): 785—794. (in Russian)
3. Mirkhaydarov A.Kh. Method and means for measuring uranium hexafluoride in the air. In: *The radioactivity in nuclear explosions and accidents. Abstracts of the International Conference*. SPb.: Gidrometeoizdat; 2000. (in Russian)
4. West C.M., Scott L.M. Uranium cases showing long chest burden retention of uranium. In: *USAEC Report HASL-58*. 1959; 212—213.
5. Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., Mordasheva V.V. Clinical Toxicology of chemical compounds of uranium at chronic exposure. In: Il'in L.A., ed. *Nuclear medicine. Volume II. Radiation injury man*. М.: IzdAT; 2001; 369—388. (in Russian)
6. ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
7. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International

Поступила 03.03.2017
Принята к печати 18.10.2017