

Бабенко С.П.¹, Бадьин А.В.²

О расчётном методе оценки воздействия на человека продуктов гидролиза гексафторида урана

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки», 105005, Москва, Российская Федерация;

²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Российская Федерация

Введение. В настоящей статье говорится о предлагаемом авторами расчётном методе исследования воздействия UF_6 (гексафторид урана – ГФУ) на организм человека. Предлагается обзор основных идей этого метода, а также особенностей подхода к решению рассматриваемой задачи на отдельных этапах перемещения ГФУ от выброса в воздух до проникновения в организм. Описываются возможности предлагаемого метода и его место в ряду известных исследований в этом направлении.

Материалы и методы. Материалом исследования является гексафторид урана. Он служит основным рабочим веществом в технологиях обогащения природного урана изотопом ^{235}U . ГФУ в силу различных обстоятельств появляется в производственном помещении в газообразном состоянии. Методом исследования воздействия гексафторида урана на человека является описание процессов распределения молекул ГФУ в объёме рабочего помещения, химических превращений гексафторида урана, физических превращений возникающих продуктов, то есть всех процессов, сопровождающихся рождением токсичных веществ и перемещением их от источника до человека и до выхода из организма естественным путём. Описание этих процессов осуществляется аналитически.

Результаты. Перечисляются результаты, которые могут быть получены расчётным путём.

Заключение. Сделан вывод относительно достоинств и недостатков рассматриваемого метода исследования воздействия ГФУ на человека и определения его места в ряду уже существующих методов.

Ключевые слова: гексафторид урана; продукты гидролиза гексафторида урана; уран; фтор; математическая модель; функция распределения радиусов аэрозольных частиц; ингаляционное поступление; перкутанное поступление

Для цитирования: Бабенко С.П., Бадьин А.В. О расчётном методе оценки воздействия на человека продуктов гидролиза гексафторида урана. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (1): 13–18. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-13-18>

Для корреспонденции: Бадьин Андрей Валентинович, канд. физ.-мат. наук, доц. МГУ, физический факультет, кафедра математики, 119991, Москва, Российская Федерация. E-mail: badyin@phys.msu.ru

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Благодарность. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов: Бабенко С.П. – концепция и дизайн исследования, написание текста; Бадьин А.В. – математические расчёты, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 10.12.2019 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликована 12.02.2021

Svetlana P. Babenko¹, Andrey V. Bad'in²

On the calculated method for assessing the impact of hydrolysis products from uranium hexafluoride on the human body

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

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Introduction. This article refers to the authors' calculation method for studying the effects UF_6 (uranium hexafluoride, UHF) on the human body. A review of this method's main ideas and the features of the approach to solving the problem at certain stages of the movement of UHF from being released into the air before entering the body is offered. The possibilities of the proposed method and its place in many well-known studies in this direction are described.

Material and methods. The research material is UHF. It serves as the primary working substance in technologies for enriching natural uranium with the ^{235}U isotope. UHF, due to various circumstances, appears in the production room in a gaseous state. A method for studying the effects of UHF on humans is to describe the distribution processes of UHF molecules in the volume of the working room, chemical transformations of UHF, physical transformations of the resulting products, i.e., all processes accompanied by the delivery of toxic substances and their transfer from the source to the person and before excretion from the body in a natural way. The description of these processes is carried out analytically.

Results. Lists the results that can be obtained by calculation.

Discussion. A discussion of the results is carried out in the following areas. The issue of the possibility of using the described calculation method to solve the problems of ensuring labor safety at work is considered. The question of trust in the calculated values characterizing the effect of UHF on the human body is being studied. To solve this problem, we compared the calculated results obtained for a particular process and the experimental ones implemented in a similar process.

Conclusion. A conclusion is made regarding the advantages and disadvantages of the method under investigation for studying the effects of UHF on humans and determining their place among existing methods.

Keywords: uranium hexafluoride; hydrolysis products of uranium hexafluoride; uranium; fluorine; mathematical model; distribution function of the radii of aerosol particles; inhalation; percutaneous entry

For citation: Babenko S.P., Bad'in A.V. On the calculated method for assessing the impact of hydrolysis products from uranium hexafluoride on the human body. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2021; 100 (1): 13–18. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-13-18> (In Russ.)

For correspondence: Andrey V. Bad'in, MD, Ph.D., Associate Professor Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Mathematics. E-mail: badyin@phys.msu.ru

Information about the authors: Babenko S.P., <https://orcid.org/0000-0002-4878-1438>; Bad'in A.V., <https://orcid.org/0000-0002-6753-2728>

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

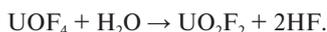
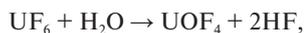
Acknowledgements. The study had no sponsorship.

Contribution of the authors: Babenko S.P. – research concept and design, text writing; Bad'in A.V. – mathematical calculations, editing. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Received: December 12, 2020 / Accepted: October 18, 2020 / Published: February 12, 2021

Введение

Известно, что UF_6 (гексафторид урана – ГФУ), попадая в воздух рабочего помещения, взаимодействует с парами воды [1–3]:



Далее некоторые молекулы образуют газы, а некоторые создают аэрозольные частицы [1]. Образующиеся молекулы содержат атомы урана и фтора. Попадая в организм человека, уран и фтор могут нанести значительный ущерб за счёт химического и радиационного воздействия. При этом особую опасность представляет атом фтора в составе HF (фтороводород). Опыт зарубежных и отечественных аварийных ситуаций показал, что интенсивность отрицательного воздействия продуктов гидролиза UF_6 может быть настолько велика, что приводит к летальным исходам [4].

Очевидно, что состояние человека зависит от массовой дозы токсичных веществ, полученной этим человеком. Поэтому оценка полученной дозы, проведённая сразу после выхода из чрезвычайной ситуации, очень важна.

До наших работ подробнее всего были описаны процессы ингаляционного поступления токсичных веществ [5], хотя они тоже не кончались нахождением массы токсичных веществ, попадающих в организм.

В литературе освещалось поступление различных веществ и через кожу [6]. Однако среди рассматриваемых веществ не было гексафторида урана, и не обсуждался вопрос о коэффициенте перехода из кожи в плазму крови.

Большую роль в решении вопросов о дозах, получаемых человеком, и о тактике медицинской помощи пострадавшим сыграли работы отечественных учёных, особенно работы сотрудников ФМБЦ имени А.И. Бурназяна (ранее Институт биофизики Министерства здравоохранения СССР) [4, 6, 7].

Нужно отметить, что исследование работников ФМБЦ сыграли важную роль и в разработке нашего расчётного метода определения доз, получаемых человеком при работе с гексафторидом урана. Речь идёт о результатах, полученных ими в эксперименте, моделирующем аварийную ситуацию по выбросу ГФУ в рабочее помещение [8].

Измерялись активность урана, осаждённого на измерительных приборах на временном промежутке $[t_i, t_i + \Delta t_i]$ эксперимента, поверхностная плотность активности урана на измерительных стёклах, по-разному расположенных фильтрах Петрянова, одежде экспериментаторов, различных участках кожных покровов экспериментаторов. После выхода экспериментаторов из аварийной ситуации проводилась дезактивация (промывание водой) их кожных покровов, велось длительное наблюдение за состоянием экспериментаторов.

Нами были разработаны расчётные методы определения массы токсичных веществ (урана и фтора), попадающих в организм человека в составе ГФУ и продуктов его гидролиза. Этой теме было посвящено несколько публикаций. В каждой из них решалась своя задача для этих методов. В некоторых подробно описаны математические подходы к решению задач при различных реальных условиях. В некоторых проведены математические описания определений конкретных величин, анализ полученных результатов и возможностей их применения. Примерами могут служить расчёт распределения UF_6 и продуктов его гидролиза по объёму рабочего помещения, расчёт поверхностной плотности массы урана и фтора на различных поверхностях помещения, нахождение массы токсичных веществ внутри организма при различных условиях, нахождение временной динамики этих процессов, определение времени выхода из аварийной ситуации, при котором ещё исключаются летальные исходы, и т. д. Такой разброс материала по различным статьям мешает восприятию расчётов отдельных этапов рассматриваемого процесса как единого метода, знакомству с его основными возмож-

ностями и, самое главное, использованию его в практической жизни. Поэтому в настоящей статье для привлечения к методу внимания людей, принимающих активное участие в оказании медицинской помощи пострадавшим, поставлена задача описать суть полного расчёта и его возможности в рамках одной статьи. Для такой статьи в разделе полученных результатов нереально привести конкретные расчёты. Поэтому здесь перечисляются важнейшие результаты, полученные в других статьях в соответствии с основными положениями метода, описанного в настоящей статье.

Материалы и методы

В настоящей работе описывается решение задач, диктуемых проблемами обеспечения безопасности труда на оборонительных предприятиях атомной промышленности и медицинской помощи людям, попавшим в нестандартные ситуации. На таких предприятиях UF_6 является основным рабочим веществом. При этом за основной вопрос в рассматриваемых задачах принят вопрос количественного определения поступления урана и фтора в различные участки организма при всех способах поступления. Для ответа на этот вопрос была использована комплексная модель, предназначенная для изучения различных процессов, следующих за выбросом ГФУ в рабочее помещение [9].

При описании этих процессов принято, что продукты гидролиза ГФУ выводятся из рабочего помещения за счёт воздухообмена, седиментации (дрейфа в пространстве), диффузионного осаждения на пол, потолок и стены.

В основе математических моделей загрязнения производственной среды лежат уравнения непрерывности, описывающие динамику частиц [10]. Для газов [10]:

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

Для аэрозолей [10]:

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

$$n'(r, \vec{x}, 0) = 0, \quad \vec{x} \in Q;$$

$$n'(r, \vec{x}, t) = 0, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (0, +\infty).$$

Проводились упрощения основных уравнений в зависимости от конкретных рассматриваемых условий (от выбора области Q , от предположений о характере дрейфа молекул интересующих нас веществ в пространстве, от предположений относительно плотностей мощности внешних источников молекул интересующих нас веществ и т. д.).

Для описания перкутанного поступления токсичных веществ в организм человека построены две модели – интегральная и дифференциальная [11]. В интегральной модели после выхода из кожи определяется поглощение урана и фтора во всём организме. Во второй модели определяется его поглощение во всех органах по отдельности.

При построении и интегральной и дифференциальной модели в расчётах принималось, что:

- в аварийной ситуации токсичные вещества попадали на кожные покровы малыми порциями; величина порций

уменьшалась со временем в соответствии с уменьшением концентрации токсичных веществ в воздухе, полученной при решении приведённых выше основных уравнений;

- в обычных рабочих условиях поступление представляет собой разрывную функцию времени, так как рабочий день продолжается не круглые сутки;
- в соответствии с литературными данными приняты [4], что попадающие на поверхность кожи вещества проникают в глубь кожи по закон $n(z) = n_0 \cdot e^{-kz}$.

Далее при построении дифференциальной модели ограничивались расчётом количества токсичных веществ на входе в кровоток, а в интегральной модели вычисляли ещё и количество веществ в кровотоке и на выходе из человека.

Для описания дифференциальной модели использовались модель МКРЗ [12, 13], построенная для случая, когда исследуемое вещество инъецируется извне в плазму крови, и построенная нами интегральная модель вместе с полученным на её основе аналитическим выражением для скорости ввода токсичного вещества из кожи человека в кровь [11].

При ингаляционном поступлении токсичных веществ барьерным органом является дыхательная система [10, 11]. Как и для перкутанного поступления, для описания прохождения через организм после барьерного органа построены интегральная и дифференциальная модели.

При создании модели прохождения воздуха, загрязнённого продуктами гидролиза ГФУ, через барьерный орган (дыхательную систему) использовались следующие источники.

1. Модель, рекомендованная МКРЗ [5], в которой введён коэффициент прохождения $\xi_a(r)$ в организм человека атомов токсичного вещества в составе аэрозольных частиц радиуса r . Если речь идёт об аэрозольных частицах с логарифмически нормальным распределением радиусов, то, согласно рекомендациям МКРЗ, среднее значение коэффициента ξ_a можно определить, зная активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) или массовый медианный аэродинамический диаметр (ММАД).

2. Рассчитанные нами функции распределения радиусов аэрозольных частиц [10]:

$$g_0(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln(\beta_g)} \frac{1}{r} \exp \left(- \left(\frac{\ln(r) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g) \cdot \sqrt{2}} \right)^2 \right),$$

$$G_0(r) = \int_0^r d\tilde{r} \cdot g_0(\tilde{r}) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{Erf} \left(\frac{\ln(r) - \ln(r_g)}{\ln(\beta_g) \cdot \sqrt{2}} \right) \right),$$

где $r_g = 2,744 \cdot 10^{-6}$ м – геометрическое среднее радиусов аэрозольных частиц; $\beta_g = 2,18$ (безразмерная величина) – геометрическое стандартное отклонение радиусов аэрозольных частиц.

При построении дифференциальной модели для описания ингаляционного поступления использовались:

- та же модель МКРЗ, что и при построении дифференциальной модели перкутанного поступления;
- построенная нами интегральная модель ингаляционного поступления, позволяющая получить аналитическое выражение для скорости ввода токсичного вещества из дыхательной системы человека в кровь.

Результаты

Целью предлагаемого расчётного метода описания воздействия ГФУ на организм человека было нахождение массы токсичных веществ, проникающих в организм в составе продуктов гидролиза ГФУ. Это связано со следующим. Во-первых, существуют экспериментальные методы оценки массы депонированных в организме токсичных веществ. Во-вторых, в литературе имеются статистические данные, связывающие упомянутые экспериментально найденные

массы с изменениями в состоянии здоровья человека, получившего эти поступления. Всё это позволяет прогнозировать состояние человека по рассчитанным значениям массы депонированных урана и фтора.

Результаты, полученные для перкутанного поступления урана и фтора в организм человека:

1. Найденны массы урана m_U и фтора m_F , которые оседают на поверхности кожи за время пребывания Δt сотрудника в обычной рабочей обстановке или в аварийной ситуации.
2. Найденны величины m_U и m_F , которые за время Δt накапливаются во всём организме за исключением кожи.
3. Найденны величины m_U и m_F , которые за время Δt выходят из организма за счёт биологических процессов.
4. Найденна величина m_U , которая за время Δt накапливается в каждом органе.

5. Величины, отмеченные в п.п. 1–4, удалось вычислить (при перкутанном поступлении) благодаря тому, что решение основных уравнений позволило найти аналитические выражения для плотностей потока урана и фтора в направлении пола рабочего помещения. Плотность потока токсичных веществ зависит от концентрации ГФУ в момент выброса в аварийной ситуации или от концентрации ГФУ вдали от стенок рабочего помещения в стационарном производственном режиме. Очевидно, что концентрация ГФУ в рабочем помещении (n_0) не может превысить концентрацию насыщенных паров ГФУ, которая равна $n_{UF_6} = 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ [14]. Поэтому при прочих равных условиях при изменении концентрации n_0 величина перкутанного поступления лежит в ограниченных пределах.

6. Согласно производственным данным, в стандартных рабочих режимах концентрация $n_0 \ll 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и плотность активности урана вдали от стенок $A_V \approx 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$. При этом массовые дозы, которые накапливаются в организме даже при длительных сроках работы на производстве, не приводят к профессиональным заболеваниям. К тому же результату приводит и расчёт поступлений урана и фтора в самых жёстких производственных условиях, когда плотность активности урана вдали от стенок $A_V \approx 7,4 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$.

7. Показано, что при определении величин, характеризующих воздействие ГФУ на организм человека, интегральная модель даёт примерно тот же результат, что и дифференциальная модель.

8. Вычислены дозовые коэффициенты [15] для каждого из рассмотренных органов.

Результаты, полученные для ингаляционного поступления урана и фтора в организм человека:

1. Как и для перкутанного поступления, найдены величины m_U и m_F , которые за время Δt накапливаются во всём организме, а также выходят из организма за счёт биологических процессов. Найденны величины m_U , которые накапливаются в каждом органе.

2. Эти величины удалось вычислить благодаря тому, что решение основных уравнений позволило найти зависимость концентрации токсичных веществ от времени $n(t)$ в рабочем помещении на уровне среднего роста человека.

3. Показано, что, как и при перкутанном поступлении, могут быть вычислены дозовые коэффициенты отдельных рассмотренных органов [15] и ещё то, что при анализе воздействия ГФУ на организм человека дифференциальная модель при ингаляционном поступлении даёт примерно тот же результат, что и интегральная модель.

Сравнение результатов воздействия на человека токсичных веществ при перкутанном и ингаляционном поступлении:

1. Главным расчётным результатом такого сравнения является тот факт, что в пределах одной и той же ситуации при любой модели расчёта ингаляционное поступление значительно больше, чем перкутанное. В разных ситуациях их отношения могут меняться от разов до нескольких порядков.

2. В производственных режимах перкутанное поступление не приводит к такому депонированию токсичных веществ, которое сопровождается необратимыми изменениями в организме. Однако этого нельзя сказать относительно

ингаляционного поступления, и потому у людей с большим производственным стажем работы необходимо серьёзно контролировать возможность возникновения профессиональных заболеваний (использовать защитные средства, менять рабочий режим и т. д.).

3. Показано, что процесс отравления внутренних органов ураном при перкутанном поступлении (в аварийной ситуации) не только менее интенсивный, чем при ингаляционном поступлении, но и гораздо более медленный. Знание этого факта в некоторых ситуациях имеет большое значение для возможности оказания эффективной помощи человеку.

Уровень опасности в экстремальных аварийных ситуациях, когда $n_0 = 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Расчёты показали следующее:

1. Через 10 мин перкутанного поступления под кожей окажется урана примерно в два раза больше предельной дозы $m = 330 \text{ мг}$ для разового поступления.

2. Фтора при этом будет в организме (даже только за счёт одного перкутанного поступления) примерно в шесть раз больше смертельной дозы.

3. Серьёзную радиационную опасность представляет только ингаляционное поступление урана.

Обсуждение

Предлагаемый расчётный метод решения задачи о воздействии гексафторида урана на организм человека позволил:

1. Рассчитать поверхностные плотности масс атомов урана и фтора, осевших на различных производственных поверхностях, на коже человека, массы этих веществ, депонированных во внутренних органах, прошедших через них и вышедших естественным путём.

2. Посчитать все эти величины в экстремальных условиях и в повседневных, при различных уровнях выброса и в различных производственных режимах.

3. Посчитать их при проникновении урана и фтора в организм через два вида барьерных органов – кожу и дыхательную систему.

4. Сравнить эти рассчитанные величины и сделать вывод относительно того, какие из возможных условий приводят к наибольшему депонированию токсичных веществ в организме человека.

5. Рассчитать временные изменения обсуждаемых величин.

Использовать полученные результаты расчёта для быстрой тактики и дальнейшей стратегии медицинского обслуживания людей возможно при выполнении двух условий:

1. Известна связь между массой рассматриваемого вещества депонированного в организме и вызванным ею изменением в организме.

2. Предлагаемая модель расчёта верифицирована.

Связь, отмеченная в п. 1, была предметом исследования всех нерасчётных методов изучения воздействия ГФУ на человека (биофизические анализы, СИЧ – счётчики излучения человека). Поэтому на сегодняшний день уже имеются серьёзные наработки в этом вопросе, и с ними можно познакомиться в литературе [4, 8, 16].

Верификация модели тоже была проведена. При просмотре данных литературы и результатов модельного эксперимента были выбраны такие экспериментальные данные, которые можно было сравнить с результатами расчётов. Приведём несколько примеров и сделаем соответствующие выводы.

1. Сравнялось (табл. 1) измеренное (через 2 ч после выброса ГФУ в модельном эксперименте) значение поверхностной плотности массы урана на коже человека (σ_{exper}) [8, 9] с рассчитанными значениями этой величины для случая оседания газов (σ_{theor}^g) и аэрозолей (σ_{theor}^a) [10]. Видно, что для газов $\sigma_{\text{exper}} \approx \sigma_{\text{theor}}^g$, но для аэрозолей $\sigma_{\text{exper}} = 10^{-2} \sigma_{\text{theor}}^a$. Из полученного результата сделано заключение, что рассчитанные и экспериментальные значения σ совпадают, если принять, что аэрозоли практически не проникают через одежду и потому не участвуют в перкутанном поступлении токсичных веществ в организм.

Таблица 1 / Table 1

Поверхностная плотность массы урана на коже человека The surface density of uranium mass on human skin

Газы, аэрозоли, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $t = 2 \text{ ч}$ Gases, aerosols, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $t = 2 \text{ h}$		
σ_{exper} , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ σ_{exper} , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	σ_{theor}^g , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ σ_{theor}^g , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	σ_{theor}^a , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ σ_{theor}^a , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
$6,38 \cdot 10^{-6}$	$5,651 \cdot 10^{-6}$	$1,155 \cdot 10^{-3}$

2. Сравнялись (табл. 2) величины и временная динамика расчётной (n_{theor} , [10]) и экспериментальной (n_{exper} , [8]) концентраций атомов урана в воздухе рабочего помещения в составе аэрозолей на высоте среднего роста человека. Из таблицы видно, что они находятся в достаточно хорошем соответствии.

3. Расчёт показал, что в условиях модельного эксперимента ($n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$) за время эксперимента ($\Delta t = 1,5 \text{ ч}$) масса проникшего в организм фтора $m_F = 4,8 \text{ мг}$. Это, согласно [4], не должно сказываться на здоровье человека, что и было зафиксировано при наблюдениях за экспериментаторами в течение двух лет после проведённого эксперимента. Таким образом, и в этом случае имело место совпадение теории и эксперимента.

4. В одной из аварийных ситуаций [4] пострадавшая погибла через 5 ч после выхода, пробыв в аварийных условиях 15 мин. Посмертно в организме обнаружены масса фтора $m_F = 1713 \text{ мг}$ и масса урана $m_U = 10,4 \text{ мг}$. Всё время нахождения в условиях аварии пострадавшая была в противогазе, то есть имело место только перкутанное поступление продуктов гидролиза гексафторида урана.

При проведении расчёта подбирались такое значение концентрации гексафторида урана в воздухе рабочего помещения в момент выброса, при котором рассчитанные величины масс урана и фтора внутри организма совпали с

Таблица 2 / Table 2

Динамика концентрации атомов урана Dynamics of the concentration of uranium atoms

		Аэрозоли, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ Aerosols, $n_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$	
t		n_{theor} , М^{-3} n_{theor} , m^{-3}	n_{exper} , М^{-3} n_{exper} , m^{-3}
1 мин	1 min	$3,231 \cdot 10^{20}$	$3,9 \cdot 10^{20}$
7 мин	7 min	$5,433 \cdot 10^{20}$	10^{21}
13 мин 30 с	13 min 30 s	$3,411 \cdot 10^{20}$	$8,6 \cdot 10^{20}$
27 мин	27 min	$1,8301 \cdot 10^{20}$	$7,6 \cdot 10^{20}$
45 мин	40 min	$1,057 \cdot 10^{20}$	$4,4 \cdot 10^{20}$
1 ч 10 мин	1 h 10 min	$6,144 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{20}$
1 ч 20 мин	1 h 20 min	$5,149 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{20}$
2 ч 55 мин	2 h 55 min	$1,615 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$
6 ч	6 h	$4,571 \cdot 10^{18}$	10^{18}
12 ч	12 h	$1,133 \cdot 10^{18}$	$4,1 \cdot 10^{17}$
1 сут	1 day	$2,3402 \cdot 10^{17}$	$7,3 \cdot 10^{16}$

Таблица 3 / Table 3

Массовые дозы урана и фтора в организме человека
Mass doses of uranium and fluorine in the human body

Время, <i>t</i> Time, <i>t</i>		масса в кровотоке, мг mass in blood flow, mg	
		m_U	m_F
15 мин	15 min	1.065	$4.7704 \cdot 10^2$
5 ч	5 h	$1.635 \cdot 10^1$	$1.731 \cdot 10^3$

экспериментальными (табл. 3). Оказалось, что полученное при этом условии значение $n_0 = 3,3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ находится в соответствии с тем обстоятельством, что реализованы в аварийной ситуации могут быть значения $n_0 \leq 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Известно [16, 17], что посчитанное поступление урана не должно привести к серьёзному заболеванию, а вот фтор уже в момент выхода из аварийного помещения способен привести к летальному исходу. Поэтому такое сопоставление приводит к выводу, что смерть людей наступает от действия фтора, что тоже находится в соответствии с уже имеющимися представлениями о токсическом воздействии на организм урана и фтора [4].

Расчёты показали, что в условиях модельного эксперимента за 1,5 ч пребывания в аварийном помещении в организм экспериментаторов поступило такое количество урана, для которого активность $A = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Бк}$, а ожидаемая от него в будущем эффективная доза α -излучения $E_{\text{эф}} = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв}$. Такая доза не должна была нанести серьёзный вред человеку, так как предельно допустимая доза разового поступления $E_{\text{эф}} = 0,3 \text{ мЗв}$ [18, 19]. Длительное наблюдение за экспериментаторами подтвердило этот расчётный результат, то есть опять имеет место совпадение теоретического и экспериментального результатов.

Проведено сравнение рассчитанного по описанной методике дозового коэффициента $\varepsilon = 9,73 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Бк}$, (АМАД = 13 мкм) с экспериментальными значениями $\varepsilon = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Бк}$, (АМАД = 5 мкм) и $\varepsilon = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Бк}$, (АМАД = 1 мкм), приведёнными в публикации NRPB-W56 [20]

и НРБ [15] соответственно. В скобках около ε отмечены размеры частиц, которым соответствуют приведённые значения ε . По приведённым ε и известной тенденции его изменения от величины АМАД [20] можно сказать, что расчёт ε подтверждается экспериментом.

Судя по приведённым примерам, расчётные параметры, характеризующие воздействие газообразного ГФУ на человека, находятся в соответствии с экспериментальными. В такой ситуации можно сказать, что расчётный метод изучения такого воздействия благодаря возможности его быстрой реализации, встав в ряд с известными классическими методами исследования, требующими изучения анализов пострадавших, может оказаться очень эффективным в оказании помощи людям и в спасении их жизней.

Чтобы применение расчётного метода стало реальным на каждом предприятии, необходимо, чтобы в медсанчасти при каждом предприятии находились в наличии: сведения о концентрации ГФУ в воздухе аварийного помещения в момент выброса (n_0), которые получают экспериментально на производствах; таблицы значений масс урана (m_U) и фтора (m_F), депонированных в конкретном органе при различных значениях n_0 через время t после выброса (или начала производственной деятельности) при поступлении через кожу или дыхательную систему в условиях аварийной ситуации (или производственной деятельности) [10]; литературные данные о связи между массой депонированного в организме токсичного вещества и нарушением состояния здоровья [4, 16].

Заключение

- Обозначена тема работы – сделать обзор ряда опубликованных ранее статей авторов настоящей работы, в которых расчётным путем последовательно решаются задачи, описывающие все этапы на пути воздействия ГФУ на человека.
- Последовательно коротко рассмотрены все модели, построенные для процессов, описывающих перемещение токсичных веществ от источника ГФУ до человека и процессы метаболизма.
- Приведены основные результаты, полученные с помощью построенных моделей.
- Приведён обзор публикаций, в которых подробно описаны все модели.
- Приведён обзор публикаций экспериментальных результатов, использующихся для верификации расчётных результатов.
- Сделан вывод относительно возможности практического использования созданной методики исследования.

Литература

(п.п. 2, 3, 5, 12, 20 см. References)

1. Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю., Вязов И.Е., Малюгин С.Л., Пономарёв Ю.Н. и соавт. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF₆ и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона. *Оптика атмосферы и океана*. 2005; 18(9): 785–94.
4. Гастева Г.Н., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Мордашёва 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: 369–88.
6. Осанов Д.П. *Дозиметрия и радиационная биофизика кожи*. М.: Энергоатомиздат; 1990.
7. Ильин Л.А., ред. *Техногенное облучение и безопасность человека*. М.: ИздАТ; 2006.
8. Мирхайдаров А.Х. Метод и средство измерения гексафторида урана в воздухе. В кн.: *Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Тезисы докладов Международной конференции*. СПб.: Гидрометеоиздат; 2000.
9. Бабенко С.П. *Прогнозирование радиационного и токсического воздействия выбросов гексафторида урана методами математического моделирования*. Дисс. ... д-ра техн. наук. М.; 2008.
10. Бабенко С.П., Бадьин А.В. Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2014; (2): 22–30.
11. Бабенко С.П., Бадьин А.В., Овчинников А.В. О возможности ускоренной медицинской помощи людям после однократного воздействия на них гексафторида урана. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(3): 213–9. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219>
13. Публикация 103 МКРЗ. Пер. с англ. М.: Алана; 2009.
14. Рябинин Г.А., ред. *Справочник физических величин*. СПб.: Лениздат, Союз; 2001.
15. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. М.; 2009.
16. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. *Радиационная гигиена: учебник для вузов*. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2010.
17. Ильин Л.А., Уйба В.В., Самойлов А.С., ред. *Сборник статей, посвящённых 70-летию Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» (1946–2016 гг.)*. М.; 2016.
18. Козлов В.Ф. *Справочник по радиационной безопасности*. М.: Энергоатомиздат; 1999.
19. *Справочник спасателя. Часть 7. Спасательные работы при ликвидации последствий радиоактивных загрязнений*. М.; 2006.

References

- Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., Grigor'ev G.Yu., Vyazov I.E., Malyugin S.L., Ponomarev Yu.N., et al. On rapid measurement of the enrichment degree of uranium hexafluoride and trace quantities of UF₆ and ¹³⁵I in the atmosphere based on near- and mid-IR diode lasers. *Optika atmosfery i okeana*. 2005; 18(9): 785–94. (in Russian)
- Hu S.W., Wang X.Y., Chu T.W., Liu X.Q. Theoretical mechanism study of UF₆ hydrolysis in the gas phase. *J. Phys. Chem. A*. 2008; 112(37): 8877–83. <https://doi.org/10.1021/jp804797a>
- Hu S.W., Lin H., Wang X.Y., Chu T.W. Effect of H₂O on the hydrolysis of UF₆ in the gas phase. *J. Mol. Struct.* 2014; 1062: 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.01.015>
- Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., Mordasheva V.V. Clinical toxicology of chemical compounds of uranium during chronic exposure. In: Il'in L.A., ed. *Radiation Medicine. Volume II. Radiation Damage to Humans [Radiatsionnaya meditsina. Tom II. Radiatsionnye porazheniya cheloveka]*. Moscow: Izdat; 2001: 369–88. (in Russian)
- ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). Available at: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2066>
- Osanov D.P. *Dosimetry and Radiation Biophysics of the Skin [Dozimetriya i radiatsionnaya biofizika kozhij]*. Moscow: Energoatomizdat; 1990. (in Russian)
- Il'in L.A., ed. *Technogenic Exposure and Human Safety [Tekhnogennoe obлучenie i bezopasnost' cheloveka]*. Moscow: Izdat; 2006. (in Russian)
- Mirkhaydarov A.Kh. Method and tool for measuring uranium hexafluoride in the air. In: *Radioactivity in Nuclear Explosions and Accidents. Abstracts of the International Conference [Radioaktivnost' pri yadernykh vzryvakh i avariyakh. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii]*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2000. (in Russian)
- Babenko S.P. *Prediction of the radiation and toxic effects of uranium hexafluoride emissions by mathematical modeling methods*: Diss. Moscow; 2008. (in Russian)
- Babenko S.P., Bad'in A.V. Verification of the mathematical model describing the effect on the human body of uranium hexafluoride in the nuclear industry. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2014; (2): 22–30. (in Russian)
- Babenko S.P., Bad'in A.V., Ovchinnikov A.V. On the possibility of the rapid assistance to people after a single exposure to uranium hexafluoride. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(3): 213–9. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219> (in Russian)
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3). Available at: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060>
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Available at: [https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37\(2-4\)-Free_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf)
- Ryabinin G.A., ed. *Handbook of Physical Quantities [Spravochnik fizicheskikh velichin]*. St. Petersburg: Lenizdat, Soyuz; 2001. (in Russian)
- SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Moscow; 2009. (in Russian)
- Il'in L.A., Kirillov V.F., Korenkov I.P. *Radiation Hygiene: A Textbook for High Schools [Radiatsionnaya gigiena: uchebnik dlya vuzov]*. Moscow: GEOTAR-Media; 2010. (in Russian)
- Il'in L.A., Uyba V.V., Samoylov A.S., eds. *Collection of articles dedicated to the 70th anniversary of the Federal State Budgetary Institution «Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency» (1946–2016) [Sbornik statey, posvyashchennykh 70-letiyu Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo uchrezhdeniya «Gosudarstvennyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy Federatsii – Federal'nyy meditsinskiy biofizicheskiy tsentr imeni A.I. Burnazyana» (1946–2016 gg.)]*. Moscow; 2016. (in Russian)
- Kozlov V.F. *Radiation Safety Handbook [Spravochnik po radiatsionnoy bezopasnosti]*. Moscow: Energoatomizdat; 1999. (in Russian)
- Il'in L.A., Uyba V.V., Samoylov A.S., eds. *Rescue Book. Part 7. Rescue Work in the Aftermath of the Effects of Radioactive Contamination [Spravochnik spasatelya. Chast' 7. Spasatel'nye raboty pri likvidatsii posledstviy radioaktivnykh zagryazneniy]*. Moscow; 2006. (in Russian)
- Phipps A.W., Fell T.P., Stradling G.N. Assessment of internal doses to workers potentially exposed to enriched uranyl fluoride and uranium tetrafluoride. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Health Effects of Incorporated Radionuclides Emphasis on Radium, Thorium, Uranium and their Daughter Products. HEIR 2004*. Neuerberg; 2004.