

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ПЕРКУТАННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

С.П. Бабенко¹, А.В. Бадьин²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: babenkosvetlana@mail.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
e-mail: badyin@phys.msu.ru

Описана методика вычисления параметров, характеризующих радиационное воздействие гексафторида урана UF₆ (единственного газообразного продукта урана) на организм человека. Гексафторид урана используется при обогащении природного урана изотопом U²³⁵. Рассмотрена ситуация перкутанного поступления этих продуктов в организм человека в процессе производственного режима. Решены некоторые задачи обеспечения безопасности труда на обогатительных заводах. Рассчитаны дозовый коэффициент и предельно допустимые значения годового поступления урана на кожу по активности и по массе, предельно допустимая объемная плотность активности в воздухе помещения, предельно допустимая поверхностная плотность активности урана на коже и производственных поверхностях, объемная плотность концентрации атомов урана в воздухе и плотность потока мощности источника F₀ атомов урана. В основе вычисления перечисленных параметров лежат расчетные методы описания перкутанного поступления урана в организм человека и предельно допустимые количества такого поступления урана, приведенные в нормах радиационной безопасности (НРБ–99).

Ключевые слова: гексафторид урана, уран, фтор, математическое моделирование, перкутанное поступление.

RECOMMENDATIONS FOR USING COMPUTATING METHODS OF PERCUTANEOUS HUMAN BODY'S ABSORPTION OF URANIUM HEXAFLUORIDE

S.P. Babenko¹, A.V. Bad'in²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: babenkosvetlana@mail.ru

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

The main purpose of this work is to present a technique for calculating the parameters characterizing the radiation effects of uranium hexafluoride UF₆ (the only gaseous product of uranium) on the human body. Uranium hexafluoride is used in enriching natural uranium with isotope U²³⁵. We examined the situation of percutaneous human body's absorption of these products during the production mode. We solved some problems to ensure labour safety at enrichment plants. Moreover, we calculated the following values: radiation dose and the maximum permissible activity and weight values of annual uranium skin absorption, as well as the maximum allowable volume

density of activity in the indoor air; the maximum allowable surface density of uranium activity on the skin and industrial surfaces; the volume density of uranium atoms concentration in the air; power flux density of the uranium atoms source F_0 . In calculating these parameters we based on computing methods of describing percutaneous penetration of uranium into the human body and maximum permissible dose of uranium given in the rules of radiation safety (NRB-99).

Keywords: uranium hexafluoride, uranium, fluoride, mathematical simulation, percutaneous injection.

Введение. На производстве гексафторид урана UF_6 хранится в специальных емкостях при температуре, близкой к его температуре плавления $56^\circ C$ [1]. При этом часть гексафторида урана находится в состоянии насыщенного пара. При указанной температуре давление насыщенного пара больше атмосферного [1]. Это способствует тому, что в обычном производственном режиме, даже при его строгом выполнении, воздух несколько загрязнен газообразным гексафторидом урана.

Известно, что гексафторид урана UF_6 быстро гидролизуется [2]. 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); UO_2F_2 (аэрозоль); HF (газ); HF (аэрозоль). Гексафторид урана и продукты его гидролиза представляют токсическую и радиологическую опасность для человека [4, 5]. Такое свойство гексафторида урана является серьезным осложнением в организации производственного процесса, так как создает проблему обеспечения безопасного труда.

Для оценки меры загрязнения среды и влияния загрязнения на живые организмы используют такие величины, как годовое поступление активности вредного вещества в организм, годовое поступление массы вредного вещества, объемная плотность активности вещества в воздушной среде (A/V), поверхностная плотность активности вещества на производственных поверхностях, дозовый коэффициент $\varepsilon = E/\Pi_A$, Зв/Бк (E — эффективная доза, полученная живым организмом; Π_A — поступление по активности, т.е. активность такого количества радиоактивного вещества, которое, попадая в организм, обеспечивает эффективную дозу E).

В нормах радиационной безопасности НРБ-99 приведены данные по дозовому коэффициенту и таким параметрам как предельное годовое поступление по массе ($\Pi_{ГП_m}$), предельное годовое поступление по активности ($\Pi_{ГП_A}$), допустимая объемная плотность активности воздушной среды (ДОВА), допустимая поверхностная плотность активности производственных поверхностей (A/S), которые характеризуют влияние на человека загрязнения среды гексафторидом урана при его **ингаляционном** (через вдыхание) поступлении вместе с его продуктами гидролиза [6].

В рассматриваемой ситуации кроме ингаляционного поступления возможно поступление через кожные покровы. Вопросы облучения кожи человека и установления доз при поступлении через нее привлекали внимание ученых с середины прошлого века и до настоящего времени [7]. Однако такой барьерный орган, как кожа изучен слабее, чем такой барьерный орган, как дыхательная система. Имеющиеся исследования не доведены до уровня расчета поступления токсичных веществ и радионуклидов из объема рабочего помещения в кожу, кровь и внутренние органы. Такой уровень исследования представлен в работах [8–10], посвященных решению задач, диктуемых проблемами безопасности труда на предприятиях, на которых вследствие технологических выходов и аварийных выбросов в воздухе рабочего помещения появляется гексафторид урана. Проведенные авторами настоящей работы исследования позволяют рассмотреть вопрос о возможности введения нормативных величин для перкутанного поступления урана с продуктами гидролиза гексафторида урана. В этой работе описана эта возможность.

Метод определения предельно допустимых дозовых характеристик. Модели выхода газообразного гексафторида урана из производственных емкостей, распределения его в объеме рабочего помещения, гидролиза, формирования аэрозолей из продуктов гидролиза и определения функции распределения их размеров, оседания их на производственные поверхности и на рабочий персонал описаны в работах [8, 9]. Эти модели позволяют описать оседание вредных для человека веществ на его кожу за определенный промежуток времени при определенном режиме работы.

Модель перкутанного поступления токсичных и радиоактивных элементов с поверхности кожи во внутрь кожи и организма, в кровь, а также модель депонирования вошедшего вещества в организме и выхода его естественным путем описаны в работах [8, 10]. Эти модели позволяют рассчитать массу урана и фтора, прошедших через организм, и депонированную массу этих веществ в организме сотрудника от начала трудовой деятельности до рассматриваемого момента и в любой промежуток времени за время работы. По расчетным и экспериментальным данным по воздействию проходящих через организм и депонированных в нем урана и фтора можно оценить вред, который может быть нанесен человеку, а также возможность профессиональных заболеваний [4].

В перечисленных работах по расчету воздействия газообразного гексафторида урана в воздухе рабочего помещения на рабочий персонал за контролируемый параметр принимается начальная концентрация гексафторида урана в воздухе рабочего помещения или соответ-

ствующая ей плотность потока мощности источника F_0 . Хотя наиболее эффективным методом контроля депонированного радионуклида в организме человека полагается метод определения радионуклида в суточной моче [11, 12], предлагаемый в указанных статьях расчетный метод, при определенных условиях, может быть более удобным и потому может быть хорошим дополнением к давно разработанному методу анализа мочи.

В основе предлагаемого авторами настоящей статьи метода нормирования перкутанного поступления радиоактивных продуктов гидролиза гексафторида урана лежат следующие положения.

1. Теоретически определяется дозовый коэффициент $\varepsilon = E/\Pi_A$.
2. Нормированная (НРБ–99) эквивалентная доза в коже для персонала принимается $H = 500$ МЗв/год.
3. Нормированная (НРБ–99) эффективная доза для персонала принимается $E = 5$ мЗв/год.
4. В рамках предлагаемой модели вычисляется значение активности урана, поступающего на кожу человека за 1 год производственной деятельности $\Pi_A, \text{Бк}$, и эффективная доза $E, \text{Зв}$, формирующаяся α -излучением урана, поступившего за то же время в организм. Далее рассчитывается дозовый коэффициент $\varepsilon = E/\Pi_A$.
5. По найденному значению коэффициента ε и принятым нормам (НРБ–99) эквивалентной дозы в коже $H_{\text{пред}} = 500$ МЗв/год и эффективной дозы $E_{\text{пред}} = 5$ мЗв/год оцениваются предельно допустимые значения физических величин, характеризующих загрязнение окружающей среды на производстве:
 - предельно допустимое поступление урана с газами по активности $\text{ППП}_{A_{\text{пред}}} = E_{\text{пред}}/(\varepsilon \cdot \text{год})$;
 - предельно допустимое поступление урана с газами по массе $\text{ППП}_{m_{\text{пред}}} = \text{ППП}_{A_{\text{пред}}}/A_{\text{уд}}$, где $A_{\text{пред}} = A/V$ – удельная активность урана в единице объема среды, $\text{ППП}_{m_{\text{пред}}} = \frac{E_{\text{пред}} V}{(\varepsilon A) \cdot \text{год}}$.

Согласно использованной в работе методике расчета, масса урана, осевшего на человека к моменту времени t с газами, пропорциональна концентрации урана в воздухе рабочего помещения в газовой фазе [8].

В связи с этим полученное выше значение $\text{ППП}_{m_{\text{пред}}} = \frac{E_{\text{пред}} V}{\text{год } \varepsilon A}$ однозначно определяет такие величины, как:

- 1) предельно допустимое значение концентрации урана в воздухе рабочего помещения в газовой фазе $n_{\text{пред}}$;
- 2) предельно допустимое значение объемной плотности активности $A_{V_{\text{пред}}}$ (ДООА);

- 3) предельно допустимое значение плотности потока мощности источника $F_{0\text{пред}}$ гексафторида урана в газовой фазе в воздухе рабочего помещения;
- 4) предельно допустимое значение поверхностной плотности активности урана $A_{S\text{пред}}$ на кожных покровах человека;
- 5) предельно допустимое значение поверхностной плотности активности урана $A_{S\text{пред}}$ на производственных поверхностях (при расчете этой величины учитывалось, что загрязнение производственных поверхностей определяется осаждением урана и в газовой, и в аэрозольной фазах [8]).

Результаты расчета предельно допустимых дозовых характеристик при перкутанном поступлении продуктов гидролиза гексафторида урана. Значения величин Π_A , E , ε , полученных по приведенным выше формулам, приведены в табл. 1. Значения величин рассчитывались в рамках метода, представленного в настоящей статье и подробно описанного в работах [8–10]. Расчет проводился для природного урана с соответствующей объемной плотностью активности $A/V = 1,07 \times 10^{-15}$ Ки/л. При расчете осаждаемого на кожу урана учитывались все газы, образующиеся в процессе гидролиза гексафторида урана. Получены значения эффективной дозы (и соответствующего дозового коэффициента), формирующейся как газами, связывающимися с кожей, так и с газами, проходящими через кожу и входящими в кровь [8, 10].

С учетом полученных значений дозового коэффициента для газов, связывающихся с кожей, получаем следующие значения:

$$\text{ППП}_{A\text{пред}} = \frac{0,005}{1,065 \cdot 10^{-6}} = 4,7 \cdot 10^3 \text{ Бк};$$

$$\text{ППП}_{m\text{пред}} = \frac{4,7 \cdot 10^3}{6,8 \cdot 10^{-7}} = \frac{4,7 \cdot 10^3}{6,8 \cdot 10^{-7} \cdot 3,7 \cdot 10^{10}} = 0,187 \text{ г} = 187 \text{ мг}.$$

Вычисленное значение $\text{ППП}_{m\text{пред}}$ не противоречит значению ППП_m , приведенному в НРБ–99 [6], согласно которым $\text{ППП}_m \leq 500$ мг, поэтому для природного урана $E_{\text{пред}} = 5$ мЗв, $\text{ППП}_{m\text{пред}} = 187$ мг, $\text{ППП}_{A\text{пред}} = 4,7 \cdot 10^3$ Бк; для обогащенного урана (5 % U^{235} , $A_{\text{уд}} = 2,8 \times 10^{-6}$ Ки/г) при тех же значениях $E_{\text{пред}} = 0,005$ Зв, $\text{ППП}_{A\text{пред}} = 4,7 \times 10^3$ Бк, $\text{ППП}_m = \frac{4,7 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3,7 \cdot 10^{10}} = 45,37$ мг. Следовательно, для обогащенного урана $\text{ППП}_m = 45,37$ мг.

Значения рассчитанных предельно допустимых физических величин для урана, накопившегося в коже и прошедшего в кровоток, при различных значениях годового дозового коэффициента, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Динамика значений величин Π_A , E , ϵ при перкутанном поступлении урана в процессе производственной деятельности при различных значениях коэффициента воздухообмена K

t	$K = 0$				$K = 3$				$K = 7$			
	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк
	Природный уран, сумма газов, $A/V = 1,07 \cdot 10^{-15}$ Ки/л при эффективной дозе, формирующейся газами, которые связываются с кожей											
1 ч	$3,89 \cdot 10^{-2}$	$3,84 \cdot 10^{-12}$	$9,87 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$	$9,87 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{-12}$	$9,87 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{-12}$	$9,87 \cdot 10^{-11}$
1 сут.	$2,34 \cdot 10^{-1}$	$7,19 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$6,63 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$6,63 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^{-9}$
1 год	$6,54 \cdot 10^1$	$6,97 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$6,31 \cdot 10^1$	$6,72 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^1$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^1$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$
50 лет	$3,27 \cdot 10^3$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^3$	$4,13 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^3$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^3$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
t	Природный уран, сумма газов, $A/V = 1,07 \cdot 10^{-15}$ Ки/л при эффективной дозе, формирующейся газами, которые проходят через кожу и поступают в кровь											
t	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк	Π_A , Бк	E , Зв	ϵ , Зв/Бк
1 ч	$3,89 \cdot 10^2$	$5,26 \cdot 10^{-15}$	$1,35 \cdot 10^{-13}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$5,08 \cdot 10^{-15}$	$1,35 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$4,86 \cdot 10^{-15}$	$1,35 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$4,86 \cdot 10^{-15}$	$1,35 \cdot 10^{-13}$
1 сут.	$2,34 \cdot 10^{-1}$	$9,67 \cdot 10^{-13}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$9,33 \cdot 10^{-13}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$8,92 \cdot 10^{-13}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$8,92 \cdot 10^{-13}$	$4,14 \cdot 10^{-12}$
1 год	$6,54 \cdot 10^1$	$2,06 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^1$	$1,98 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$	$6,03 \cdot 10^1$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$	$6,03 \cdot 10^1$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$
50 лет	$3,27 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$3,16 \cdot 10^3$	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$301 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$301 \cdot 10^3$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-9}$

Предельно допустимые значения физических величин при перкутанном поступлении урана, накапливающегося в коже

Вид урана U^{235}	ППД A , 10^{-3} , Бк/год	ППП m , 10^{-2} , мг/год	$E_{пред}$, МЗв/год	ДЮА, Бк/м ³	$(A/S)_{пред}$ для кожи*	$(A/S)_{пред}$ для производ- ственной поверх- ности*	$I_{пред}$, 10^{-17} , 1/м ³	F_0 пред, 10^{-15} , 1/м ³
Природный 0,72 % Обогащенный 0,5%	4,7	1,870	5	2,84	$1,77 \cdot 10^{-2}$	5,18	2,900	2,790
		0,454						
$\epsilon = 1,31 \cdot 10^{-6}$ Зв/Бк (при среднем за 50 лет поступлении урана в газовой фазе, накапливающегося в коже в течение 50 лет)								
Природный 0,71 % Обогащенный 5 %	3,82	1,520	5	2,36	$1,43 \cdot 10^{-2}$	4,21	2,360	1,410
		0,369						
$\epsilon = 6 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк (при среднем за 50 лет поступлении урана в газовой фазе в кровотоке)								
Природный 0,72 % Обогащенный 5 %	12,6	5	20	7,76	9,7	20,27	7,76	4,64

*Единица измерения $(\alpha - \text{ч})/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$.

Анализ расчетных данных. Согласно расчетным данным, приведенным в табл. 1:

1) дозовый коэффициент при перкутанном поступлении урана в процессе производственной деятельности возрастает со временем. Вначале скорость роста велика, затем она убывает, от одного года до 50 лет производственной деятельности коэффициент ε возрастает в 1,23 раза;

2) дозовый коэффициент для той части урана, которая накапливается в коже, в 200 раз больше, чем для части урана, которая попадает в кровоток;

3) дозовый коэффициент не зависит от коэффициента воздухообмена K в рабочем помещении [13];

4) с увеличением стажа работы на производстве предельно допустимые значения объемной плотности активности (ДОА), предельной поверхностной плотности активности ($(A/S)_{\text{пред}}$) на коже и производственных поверхностях, концентрации атомов урана в воздухе ($n_{\text{пред}}$) и $F_{0\text{пред}}$ уменьшаются;

5) предельные значения для урана, накапливающегося в коже, более жестки, в связи с этим они принимаются за предельные значения (см. выделенную строку в табл. 2), которые допускаются при перкутанном поступлении гексафторида урана и продуктов его гидролиза;

6) значение дозового коэффициента для урана, накапливающегося в коже, лежит между значениями ε ингаляционного поступления для хорошо и среднерастворимых аэрозольных соединений [6];

7) предел годового перкутанного поступления урана по активности несколько ниже, чем предел его ингаляционного поступления [6], что можно было ожидать, поскольку площадь поверхности кожи велика, а слой кожи, в котором депонируется уран, мал и потому перкутанное поступление урана может привести к серьезным последствиям;

8) рассчитанное значение ДОА практически одинаково со значением ДОА, приведенным в НРБ–99 [6] для ингаляционного поступления;

9) результаты, полученные и приведенные в пунктах 6–8, позволяют предполагать, что перкутанным поступлением в организм человека продуктов гидролиза гексафторида урана пренебрегать нельзя при оценке воздействия их на человека при различных способах проникновения в организм.

Заключение. Расчетным методом определена динамика поступления активности урана на кожу человека и эффективной дозы, формирующейся в организме при соответствующем поступлении урана.

По полученному результату и определению дозового коэффициента ε вычислена зависимость дозового коэффициента от времени нахождения сотрудника в производственном помещении. Проведено сравнение значений дозовых коэффициентов, определяющихся как ураном, депонирующимся в коже на длительный срок, так и ураном, поступающим в кровоток.

По найденному значению коэффициента ε и принятым нормам (НРБ–99) эквивалентной дозы в коже $H_{\text{пред}} = 500$ МЗв/год и эффективной дозы $E_{\text{пред}} = 5$ мЗв/год оценены предельно допустимое значение поступления урана с газами по активности ППП $_{\text{Апред}}$ и предельно допустимое поступление урана с газами по массе ППП $_{\text{тпред}}$ для природного и обогащенного урана.

По полученному значению ППП $_{\text{тпред}}$ и установленной расчетным методом связи между массой урана, осевшего на человеке к моменту времени t , и концентрацией атомов урана в воздухе рабочего помещения определены предельно допустимые значения концентрации урана в воздухе $n_{\text{пред}}$, объемной плотности активности $A_{V\text{пред}}$ (ДООА), плотности потока мощности источника $F_{0\text{пред}}$ гексафторида урана, поверхностной плотности активности урана $A_{S\text{пред}}$ на кожных покровах человека, поверхностной плотности активности урана $A_{S\text{пред}}$ на производственных поверхностях.

Были сделаны следующие выводы:

- в качестве найденных предельно допустимых параметров необходимо принять те значения, которые получены для урана, накапливающегося в коже за длительный период времени;
- полученные для перкутанного поступления газообразных продуктов гидролиза гексафторида урана предельные значения параметров близки аналогичным величинам при ингаляционном поступлении, приведенным в нормах НРБ–99. Это означает, что при оценке радиационного воздействия гексафторида урана на человека следует учитывать и ингаляционное, и перкутанное проникание урана UF_6 в организм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
2. *Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств UF_6 в HF атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона* / Г.Ю. Григорьев, А.И. Надеждинский, Ш.Ш. Набиев и др. М., 2006. Препринт ИАЭ 6395/12.
3. *Мирхайдаров А.Х.* Метод и средство измерения гексафторида урана в воздухе // Тезисы докладов на международной конференции “Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях”. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. С. 92.

4. *Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции* / Г.Н. Гастева, В.И. Бадьин, А.А. Молоканов и др. Радиационная медицина. Т. 2. М.: ИздАт, 2001. С. 369–389.
5. *Радиобиология инкорпорированных радионуклидов* / В.С. Калистратова, И.К. Беляев, Е.С. Жорова, П.Г. Нисимов, И.М. Парфенова, Г.С. Тищенко, М.М. Цапков; под ред. В.С. Калистратовой. М.: Изд-во ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2012. 464 с.
6. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)*. Гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с.
7. *Родионов Ю.А.* Основы дозиметрии и защиты от излучений. СПб.: ЯЭИ, Сосновый Бор, 142 с.
8. *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. Т. 18. № 3. С. 13–22.
9. *Бабенко С.П., Бадьин А.В.* Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранил-фторида // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 5. С. 353–358.
10. *Бабенко С.П., Бадьин А.В.* О перкутанном поступлении токсичных веществ в организм человека из атмосферы производственного помещения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/671133.html> DOI: 10.7463/0114.0671133
11. *Хохряков В.В., Востротин В.В., Хохряков В.Ф.* Повышение качества обработки результатов биофизических обследований с помощью метода максимального правдоподобия // Вопросы радиационной безопасности. 2010. № 1. С. 13–22.
12. *Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите*. Публикация 103 МКРЗ. Пер. с англ. М.: ООО ПКФ “Алана”, 2009. 344 с.
13. *Бабенко С.П.* Расчет распределения по высоте концентрации ураносодержащих веществ в воздухе рабочих помещений при различных коэффициентах воздухообмена // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2005. Т. 50. № 5. С. 16–21.

REFERENCES

- [1] Kikoin I.K., ed. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* [Tables of Physical Quantities. Reference Book]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
- [2] Grigor'ev G.Yu., Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh. et al. *Ekspress-metody izmereniya stepeni obogashcheniya geksaftorida urana i sledovykh kolichestv UF₆ v HF atmosfere na osnove diodnykh lazerov blizhnego i srednego IK-diapazona* [Express Methods of Measuring the Uranium Hexafluoride Enrichment Degree and Trace Amounts of UF₆ in the HF Atmosphere Based on Near and Mid-Infrared Diode Lasers]. Moscow, 2006. Preprint no. IAE 6395/12.
- [3] Mirkhaydarov A.Kh. *Method and Means for Measuring Uranium Hexafluoride in the Air. Tezisy докладов na mezhdunarodnoy konferentsii 'Radioaktivnost' pri yadernykh vzryvakh i avariyyakh* [Abstracts of the International Conference "Radioactivity in Nuclear Explosions and Accidents"]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2000, pp. 92 (in Russ.).
- [4] Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A. et al. *Klinicheskaya toksikologiya khimicheskikh soedineniy urana pri khronicheskoy ekspozitsii* [Clinical Toxicology of Chemical Uranium Compounds at Chronic Exposure]. *Radiatsionnaya meditsina. Vol. 2* [Radiation Medicine]. Moscow, IzdAt Publ., 2001, pp. 369–389.

- [5] Kalistratova V.S., Belyaev I.K., Zhorova E.S., Nisimov P.G., Parfenova I.M., Tishchenko G.S., Tsapkov M.M. Ed. by Kalistratova V.S. Radiobiologiya inkorporirovannykh radionuklidov [Radiobiology of Incorporated Radionuclides]. Moscow, FMBTs im. A.I. Burnazyana FMBA Rossii Publ., 2012. 464 p.
- [6] Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99). Gigienicheskie normativy [Radiation Safety Standards (NRB-99). Hygienic Regulations]. Moscow, Tsentr sanitarno-epidemiologicheskogo normirovaniya, gigienicheskoy sertifikatsii i ekspertizy Minzdrava Rossii [Sanitary-Epidemiological Rating, Hygienic Certification and Examination Center of Russian Public Health Ministry] Publ., 1999. 116 p.
- [7] Rodionov Yu.A. Osnovy dozimetrii i zashchity ot izlucheniya [Fundamentals of Dosimetry and Radiation Protection]. St. Petersburg, YaEI, Sosnovyy Bor Publ., 142 p.
- [8] 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* [Mathematical Models and Computer Simulations], 2006, vol. 18, no. 3, pp. 13–22 (in Russ.).
- [9] Babenko S.P., Bad'in A.V. Methods for Determining the Distribution Function for the Radius of Uranyl-fluoride Aerosol Particles. *Atomic Energy*, 2005, vol. 99, iss. 5, pp. 787–791. DOI: 10.1007/s10512-006-0017-4
- [10] Babenko S.P., Bad'in A.V. On percutaneous injection of toxic substances into the human organism from the workplace atmosphere. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of the Bauman MSTU. Electronic Journal], 2014, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/671133.html>
DOI: 10.7463/0114.0671133
- [11] Khokhryakov V.V., Vostrotin V.V., Khokhryakov V.F. Improving the Quality of Geophysical Study Processing Using Maximum Likelihood Method. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti* [Radiation Safety Problems], 2010, no. 1, pp. 13–22 (in Russ.).
- [12] ICRP, 1991b. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1–3).
- [13] Babenko S.P. Estimation of the Height Distribution of the Uranium-Contained Agent Concentrations in the Air of the Industrial Premises under Different Values of the Air Interchange Coefficient. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'* [Journal of Medical Radiology and Radiation Safety], 2005, vol. 50, no. 5, pp. 16–21 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.10.2015

Бабенко Светлана Петровна — канд. физ.-мат. наук, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Babenko S.P. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Бад'ин Андрей Валентинович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1).

Bad'in A.V. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Professor of Physics Faculty, Department of Mathematics, Lomonosov Moscow State University (ul. Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бабенко С.П., Бад'ин А.В. Рекомендации по использованию расчетных методов перкутанного поступления гексафторида урана в организм человека // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 114–125. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-114-125

Please cite this article in English as:

Babenko S.P., Bad'in A.V. Recommendations for using computating methods of percutaneous human body's absorption of uranium hexafluoride. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 114–125. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-114-125

**Внимание авторов журнала
“Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”**

Редакция журнала принимает к рассмотрению статьи, оформленные в соответствии с действующими правилами, по следующим темам.

Математика

- Вещественный, комплексный и функциональный анализ
- Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление
- Математическая физика
- Теория вероятностей и математическая статистика
- Математическая логика, алгебра и теория чисел
- Вычислительная математика
- Дискретная математика и математическая кибернетика

Механика

- Теоретическая механика
- Механика деформируемого твердого тела
- Механика жидкости, газа и плазмы
- Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
- Биомеханика

Физика

- Приборы и методы экспериментальной физики
- Теоретическая физика
- Радиофизика
- Оптика
- Акустика
- Физика конденсированного состояния
- Физика плазмы