

УДК 53.072: 504.5

С. П. Б а б е н к о, А. В. Б а д ь и н

ОЦЕНКА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ И В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Проведены расчеты масс урана и фтора, депонированных в коже и во внутренних органах человека, работающего на предприятиях атомной промышленности. Рассмотрены перкутанное и ингаляционное поступления токсичных веществ в организм человека в аварийной ситуации и в производственных условиях. Приведены выводы относительно природы и степени опасности, угрожающей человеку.

E-mail: babenkosp@mtu-net.ru; badyin@phys.msu.ru

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

В работе [1] приведена методика расчета загрязнения производственной среды гексафторидом урана (ГФУ, UF_6) и продуктами его гидролиза при разовом выбросе ГФУ (аварийная ситуация) и при производственных утечках в воздух рабочего помещения (производственные условия) на предприятиях атомной промышленности. В работах [1–3] разработаны модели, описывающие перкутанное (через кожу) и ингаляционное (через органы дыхания) поступления урана и фтора в организм человека в составе упомянутых веществ. Эти модели позволяют вычислить массы депонированных в организме урана и фтора в зависимости от концентрации $n_{UF_6,0}$, M^{-3} , молекул ГФУ в воздухе сразу после выброса (в аварийной ситуации) или от объемной активности $\rho_V = \frac{dA}{dV}$ урана в составе газов вдали от поверхностей оседания (в производственных условиях). Следует отметить, что объемная активность по своему физическому смыслу является не активностью, а объемной плотностью активности и измеряется не в беккерелях (Бк), а в беккерелях на кубический метр (Бк/ M^3). Оговорка, касающаяся поверхностей оседания, сделана потому, что около каждой такой поверхности формируется пограничный слой, в котором величина ρ_V быстро изменяется при изменении расстояния до поверхности оседания. Толщину пограничного слоя можно (грубо) оценить, используя выражение $\sqrt{D\tau}$, где D — эффективный коэффициент диффузии газообразных продуктов гидролиза UF_6 , а τ — эффективное время протекания процессов, приводящих к образованию аэрозольных частиц

(процессов гидролиза и нуклеации, начинающихся сразу после выброса ГФУ). Для рассматриваемых ситуаций $\sqrt{D\tau} \approx 10^{-2}$ м. Величины $n_{UF_6,0}$, ρ_V могут быть определены экспериментально.

В настоящей работе приведены результаты расчета масс урана и фтора, депонированных в коже и во внутренних органах, а также эквивалентной и эффективной доз, сформированных α -излучением депонированного урана, в экстремальных аварийной ситуации и производственных условиях.

Под экстремальной аварийной ситуацией понимается та, в которой концентрация молекул ГФУ в воздухе сразу после выброса близка к концентрации насыщенных паров UF_6 ($n = 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$).

Под экстремальными производственными условиями понимаются условия в наиболее загрязненных производственных помещениях, когда объемная активность урана в составе газов вдали от поверхностей оседания $\rho_V = 7,4 \text{ Бк/м}^3$. Такие помещения существуют на производствах, но они не предназначены для постоянной производственной деятельности, поскольку в них ρ_V превышает санитарные нормы ($\rho_V = 0,63 \text{ Бк/м}^3$).

В табл. 1 приведены расчетные данные по депонированной массе в аварийной ситуации при перкутанном и ингаляционном поступлениях урана и фтора. Расчет проводился в рамках интегральной модели [4], согласно которой процесс прохождения урана и фтора через организм человека в составе продуктов гидролиза ГФУ разделен на два — прохождение через барьерный орган (кожа или дыхательная система) и через все внутренние органы интегрально. В табл. 1 обозначено: $m_{п.к}$ — масса токсичного вещества, поступившего перкутанно с газами и находящегося в ткани кожи в момент времени t , $m_{п.о}$ — масса токсичного вещества, поступившего перкутанно с газами и находящегося в глубине организма в момент времени t , $m_{и.о}$ — масса токсичного вещества, поступившего ингаляционно с газами и аэрозолями и находящегося в глубине организма в момент времени t (принято $t = 10$ мин).

Таблица 1

Массы урана и фтора, депонированных в организме в экстремальной аварийной ситуации при перкутанном и ингаляционном поступлениях

Вещество	Перкутанное поступление		Ингаляционное поступление
	$m_{п.к}$, МГ	$m_{п.о}$, МГ	$m_{и.о}$, МГ
Уран	$6,77 \cdot 10^2$	6,77	$1,09 \cdot 10^5$
Фтор	—	$3,26 \cdot 10^3$	$4,25 \cdot 10^4$

В табл. 2 и 3 приведены расчетные данные о распределении депонированного урана по органам в экстремальной аварийной ситуации при перкутанном и ингаляционном поступлениях, полученные в

Максимальное значение массы урана, депонированного в разных органах в экстремальной аварийной ситуации при ингаляционном поступлении

Орган	t_{\max}	m_{\max} , кг	$\frac{m_{\max}}{m_{\text{орг}}}$, мкг/г
Плазма крови	9,94 мин	$9,9 \cdot 10^{-2}$	—
Красные кровяные тельца	9,34 ч	$9,87 \cdot 10^{-4}$	—
Почки	15,8 ч	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$4,26 \cdot 10^4$
Поверхность кортикальной кости	9,34 ч	$9,87 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^4$
Объем кортикальной кости	14,4 ч	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^3$
Поверхность трабекулярной кости	26 сут	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^5$
Объем трабекулярной кости	24,4 сут	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^3$
Печень	15,86 ч	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$9,24 \cdot 10^2$
Мягкие ткани	1,66 ч	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$4,29 \cdot 10^2$
Мочевой пузырь	200 сут	$1,09 \cdot 10^{-1}$	—

Примечание. t_{\max} — момент времени, в который масса урана, депонированного в органе, достигает максимального значения; m_{\max} — максимальное значение массы урана, депонированного в органе; $m_{\text{орг}}$ — масса органа.

рамках камерной модели [5], которая рассматривает процесс прохождения через барьерный орган аналогично интегральной модели, а прохождение через организм дифференцирует по отдельным органам. При этом длительность нахождения в аварийном помещении принята $t_0 = 10$ мин.

Рассчитанное распределение депонированного урана по органам позволило определить эффективную дозу, сформированную α -излучением урана в организме [5]. Эффективная доза — это величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет собой сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T H_T,$$

где W_T — взвешивающий коэффициент для органа или ткани, а H_T — эквивалентная доза в органе или ткани.

В табл. 4 приведено значение эффективной дозы, сформированной в организме человека, оказавшегося в экстремальной аварийной ситуации.

Динамика депонирования урана в разных органах в экстремальной аварийной ситуации при перкутанном поступлении

Время	Масса урана, мг, депонированного в момент времени t					
	в почках	в приповерхностном слое трабекулярной кости	в приповерхностном слое кортикальной кости	в печени	в мягких тканях	в плазме крови
0,29 мин	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	$8,91 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$6,67 \cdot 10^{-7}$	$6,73 \cdot 10^{-4}$
2,88 мин	$3,93 \cdot 10^{-5}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$
5,76 мин	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$7,33 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$
8,64 мин	$4,19 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$
11,5 мин	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$5,18 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$9,31 \cdot 10^{-5}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
14,4 мин	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$8,09 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	$7,82 \cdot 10^{-2}$
17,3 мин	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$6,73 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-2}$
20,2 мин	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-4}$	$8,98 \cdot 10^{-3}$	0,1
23,1 мин	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	0,12
25,9 мин	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$	$4,49 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	0,13
28,8 мин	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$5,45 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	0,14
6,38 ч	—	—	—	—	—	0,31*
3,08 ч	—	0,78*	—	—	—	—
3,68 сут	1,26*	0,77	0,67	0,155	0,88	$3,63 \cdot 10^{-2}$

Примечание. * — максимальное значение.

Таблица 4

Эффективная доза E , Зв, сформированная в организме за 50 лет α -излучением урана, поступившего за 10 мин пребывания в экстремальной аварийной ситуации

Перкутанное поступление	Ингаляционное поступление
$7,43 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^2$

Следует отметить, что временной промежуток, на котором рассматривается накопление эффективной дозы, выбран в соответствии с рекомендациями НРБ-99 [6, с. 9], однако мы не утверждаем, что человек сможет прожить 50 лет после 10 мин пребывания в экстремальной аварийной ситуации (см. выше определение экстремальной аварийной ситуации).

Для оценки меры опасности, которой подвергается человек, попадая в аварийную ситуацию, все приведенные расчетные данные сравнивались с литературными экспериментальными данными, приведен-

ными в табл. 75–77 работы [7] и в работах [8] и [9]. Эти литературные данные касаются поступлений радиоактивных и химически токсичных веществ, а также сформированных ими доз, сказывающихся на здоровье человека. Из них следует, что поступление в организм урана в количестве 300 мг не всегда кончается для человека благополучно. Поступление же фтора массой $m = 330$ мг всегда оказывается смертельным. Сравнение этих экспериментальных данных с расчетными (см. табл. 1–4) позволяет заключить, что перкутанное поступление урана не приводит к достижению критических уровней. Однако перкутанное поступление фтора и ингаляционное поступление урана и фтора обеспечивают значительное превышение этих уровней и приводят к летальному исходу.

Расчет распределения депонированного урана по органам позволяет оценить опасность для каждого из них со стороны инкорпорированного вещества. Известно [8], что почки наиболее чувствительны к токсическим свойствам урана: предел нефротоксичности — 3 мкг урана на 1 г ткани почек [9].

Из данных табл. 2 и 3 можно сделать выводы.

1. В аварийной ситуации перкутанное поступление приводит к достижению предела нефротоксичности. При этом достигается этот предел через 1,4 сут после выброса гексафторида урана. Через 3,68 сут после выброса, когда депонированная в почках масса максимальна, нагрузка на почки становится равной $\frac{m_{\max,U}}{m_{\text{почки}}} = 4,07$ мкг/г. Это означает, что до достижения указанных поступлений урана могут быть приняты медицинские меры по защите почек.

2. Ингаляционное поступление урана во внутренние органы приводит к превышению предела токсичности почек (3 мкг/г [8]) на несколько порядков.

Эти данные позволяют сделать вывод, что перкутанное поступление урана во внутренние органы при аварийном выбросе гексафторида урана не должно иметь серьезных последствий, вызывающих детерминированные эффекты внутри организма. Ингаляционное же поступление приводит к необратимому поражению почек.

Из сравнения данных о дозах, вызванных α -излучением депонированного урана (см. табл. 4), и экспериментальных данных, приведенных в указанной выше литературе, следует, что перкутанное поступление обеспечивает дозу, немного превышающую максимальную (40 мЗв), которая еще считается малой при разовом поступлении, а ингаляционное поступление может вызвать заметные стохастические эффекты, а также привести к летальному исходу из-за детерминированных эффектов, связанных с поражением легких.

Таким образом, серьезную радиационную опасность, даже в экстремальных аварийных ситуациях, представляет только ингаляционное поступление урана.

Из данных табл. 1–4 следует, что ингаляционное поступление урана и фтора в организм человека существенно больше, чем перкутанное. Однако защита органов дыхания реализуется проще, чем защита всей поверхности кожи, и давно широко используется на предприятиях атомной промышленности, чего нельзя сказать о защите кожного покрова. Поэтому может оказаться, что человек в аварийной ситуации пострадает только за счет перкутанного поступления. В связи с этим логично выделить особенности перкутанного поступления урана и фтора в организм человека.

Из данных табл. 1 видно, что при перкутанном поступлении масса депонированного в организме фтора быстрее достигает опасных (с точки зрения медицины) значений, чем масса депонированного в организме урана. Поэтому для выработки правил поведения в аварийной ситуации человека с защищенными органами дыхания проанализируем динамику перкутанного поступления фтора в организм человека.

Расчет проводился по методике, изложенной в работе [7]. Для различных моментов времени рассчитано количество фтора, осевшего на поверхность кожи, и количество фтора, находящегося в глубине организма. Расчеты показали, что через 1, 3 и 5 мин на кожу из газообразной среды оседает 72,5 %, 96,4 % и 99,5 % максимально возможного количества фтора. Увеличение времени пребывания в аварийном помещении от 3 мин до 10 ч приводит к увеличению поступления фтора на кожу всего в 1,04 раза. При начальной концентрации молекул ГФУ $n_{\text{UF}_6,0} = 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ даже трехминутный промежуток времени от выброса до выхода из аварийного помещения, приводит к поступлению в организм фтора в количестве $m = 1032 \text{ мг}$, что значительно превышает массу, приводящую к летальному исходу ($m = 330 \text{ мг}$ [7]). Поэтому промежуток времени $t = 0 \dots 3 \text{ мин}$ от момента выброса до выхода из аварийного помещения и немедленной дезактивации кожи человека является критическим в вопросе сохранения жизни человека, органы дыхания которого защищены.

Рассмотрим результаты расчета поступления в организм человека урана и фтора в производственных (стационарных) условиях. При этом гексафторид урана появляется в воздухе рабочего помещения из накопительных емкостей за счет слабого подтекания, в результате которого в каждой точке рабочего помещения устанавливается стационарная концентрация атомов урана и фтора в составе ГФУ и продуктов его гидролиза.

Вредное воздействие урана, поступающего в организм в производственных условиях, принято оценивать по количеству урана, депонированного в разных органах [8, 9]. В табл. 5 и 6 приведены значения массы урана, депонированного в организме человека в момент времени $t = 50$ лет, рассчитанные в рамках камерной модели для экстремальных производственных условий ($\rho_V = 7,4 \text{ Бк/м}^3$). Рассмотрены перкутанное и ингаляционное поступления. Следует отметить, что временной промежуток, на котором рассматривается производственная деятельность человека, выбран в соответствии с рекомендациями НРБ-99 [6, стр. 20], однако мы не утверждаем, что человек сможет проработать 50 лет в экстремальных производственных условиях (определение экстремальных производственных условий дано ранее).

Таблица 5

Масса урана, депонированного в различных органах в экстремальных производственных условиях при перкутанном поступлении

Органы	$m_{\text{нак}}$, КГ	$\frac{m_{\text{нак}}}{m_{\text{орг}}}$, МКГ/Г
Почки	$5,92 \cdot 10^{-8}$	0,19
Поверхность трабекулярной кости	$2,12 \cdot 10^{-8}$	0,88
Объем трабекулярной кости	$6,72 \cdot 10^{-7}$	0,67
Поверхность кортикальной кости	$2,12 \cdot 10^{-8}$	0,22
Объем кортикальной кости	$2,86 \cdot 10^{-6}$	0,715
Печень	$1,23 \cdot 10^{-7}$	0,07
Мягкие ткани	$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,02

П р и м е ч а н и е. $m_{\text{нак}}$ — масса урана, поступившего перкутанно с газами и находящегося в органе в момент времени $t = 50$ лет; $m_{\text{орг}}$ — масса органа.

Таблица 6

Масса урана, депонированного в различных органах в экстремальных производственных условиях при ингаляционном поступлении

Органы	$m_{\text{нак}}$, КГ	$\frac{m_{\text{нак}}}{m_{\text{орг}}}$, МКГ/Г
Почки	$5,2 \cdot 10^{-5}$	167,74
Поверхность трабекулярной кости	$1,87 \cdot 10^{-5}$	779
Объем трабекулярной кости	$5,92 \cdot 10^{-4}$	592
Поверхность кортикальной кости	$1,49 \cdot 10^{-5}$	155,2
Объем кортикальной кости	$2,62 \cdot 10^{-3}$	655
Печень	$1,09 \cdot 10^{-4}$	60,56
Мягкие ткани	$1,02 \cdot 10^{-3}$	15,45

П р и м е ч а н и е. Обозначения см. табл. 5.

Как уже отмечалось, уран наиболее токсичен по отношению к почкам. Поэтому выводы делали по поступлению урана в почки. Они сводятся к следующему: даже в экстремальных производственных условиях перкутанное поступление не приводит к достижению предела нефротоксичности (3 мкг на 1 г ткани почек). Однако ингаляционное поступление существенно превышает его, поэтому длительная работа в этих условиях недопустима без защиты органов дыхания.

Вредное воздействие фтора, поступающего в организм в производственных условиях, принято оценивать по его количеству, выделившемуся из организма естественным путем за 50 лет рабочего стажа [8]. В табл. 7 приведены данные о накоплении фтора в организме и выведении его естественным путем, полученные расчетом по интегральной модели для экстремальных производственных условий ($\rho_V = 7,4 \text{ Бк/м}^3$) за 50 лет.

В работе [8] показано, что в условиях производственной деятельности 50 г фтора — это то максимальное количество, которое при прохождении через организм в течение 50 лет еще не вызывает стохастических эффектов (под массой фтора, прошедшего через организм за период $[0, t]$ понимается сумма массы фтора, находящегося в организме в момент времени t , и выведенного из организма на временном промежутке $[0, t]$).

Видно, что в рассмотренном режиме одно перкутанное поступление приводит к прохождению через организм количества фтора, приближающегося к максимально допустимому. Ингаляционное же поступление приводит к превышению максимально допустимого значения в несколько раз даже при наличии воздухообмена.

Из сказанного следует, что в используемом на предприятиях режиме, в котором объемная активность урана в составе газов вдали

Таблица 7

Масса фтора, депонированного и выведенного из организма за 50 лет, в экстремальных производственных условиях при перкутанном и ингаляционном поступлениях

Коэффициент воздухообмена K , час ⁻¹	$m_{п}$, Г	$m_{п.выв}$, Г	$m_{и}$, Г	$m_{и.выв}$, Г
0	$2,28 \cdot 10^{-3}$	15,6	0,58	1988
3	$2,2 \cdot 10^{-3}$	15	$2,94 \cdot 10^{-2}$	376

П р и м е ч а н и е. $m_{п}$ — масса фтора, поступившего перкутанно с газами и накопленного в организме; $m_{п.выв}$ — масса фтора, поступившего перкутанно с газами и выведенного из организма; $m_{и}$ — масса фтора, поступившего ингаляционно с газами и аэрозолями и накопленного в организме; $m_{и.выв}$ — масса фтора, поступившего ингаляционно с газами и аэрозолями и выведенного из организма.

от поверхностей оседания составляет $\rho_V = \frac{dA}{dV} = 7,4 \text{ Бк/м}^3$, нельзя работать в течение длительного времени без защиты органов дыхания.

Из результатов проведенного анализа поступления урана и фтора в организм в экстремальной аварийной ситуации и сопоставления с предельно допустимыми значениями следует, что аварийный выброс гексафторида урана в воздух рабочего помещения может нанести серьезный вред человеку, вплоть до летального исхода. При этом наиболее опасно ингаляционное поступление, при котором поступление урана и фтора в организм могут оказаться смертельными. Однако защита органов дыхания еще не обеспечивает благополучного исхода, что связано с перкутанным поступлением фтора во внутренние органы в количестве, приводящем к летальному исходу.

Таким образом, необходимо проведение подготовительных мероприятий, обеспечивающих готовность к оказанию помощи людям, оказавшимся в аварийной ситуации, к числу которых следует отнести следующие.

1. Организация диспетчерской службы за пределами рабочего помещения, наблюдающей за концентрацией молекул ГФУ в этом помещении и (при необходимости) за временем пребывания человека в аварийном помещении.

2. Обеспечение наличия в медсанчасти данного предприятия и в диспетчерской расчетных данных по связи масс депонированных в организме урана и фтора с начальной концентрацией молекул UF_6 и со временем пребывания человека в аварийном помещении.

3. Организация дезактивации кожи пострадавшего через промежуток времени, в течение которого в организме не может накопиться масса токсичного вещества, приводящая к летальному исходу. Расчетные данные о времени накопления опасной массы токсичного вещества должны находиться в диспетчерской.

Все эти мероприятия позволят уменьшить поступление в организм урана и фтора и благодаря оперативному определению количества депонированного токсичного вещества помогут медицинскому персоналу сориентироваться относительно необходимых мер по оказанию помощи пострадавшим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Математическое описание процессов рождения и оседания продуктов гидролиза газообразного гексафторида урана UF_6 в полупространстве // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2005. – № 4. – С. 122–132.

2. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Математическая модель ингаляционного поступления в организм человека токсичных веществ в условиях аварийной ситуации на предприятиях атомной промышленности // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2006. – № 1. – С. 36–39.
3. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Математическая модель ингаляционного и перкутанного поступления в организм человека токсичных веществ в условиях повседневной производственной деятельности на предприятиях атомной промышленности // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18. № 3. – С. 13–22.
4. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Комплексная модель формирования вредного воздействия гексафторида урана на организм человека в условиях аварийной ситуации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2007. – № 3. – С. 89–100.
5. Б а б е н к о С. П. Определение, в рамках камерной модели депонирования, дозового коэффициента урана, поступающего в организм человека перкутанно и ингаляционно в составе гексафторида урана и продуктов его гидролиза // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2008. – № 2. – С. 115–124.
6. Н о р м ы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.
7. Б а б е н к о С. П. Прогнозирование радиационного и токсического воздействия выбросов гексафторида урана методами математического моделирования: Дисс. . . . д-ра техн. наук. – М., 2008. – 375 с.
8. Г а с т е в а Г. Н., Б а д ь и н В. И., М о л о к а н о в А. А., М о р д а ш е в а В. В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции // Радиационная медицина. – М.: ИздАт, 2001. – Т. 2. – С. 369–389.
9. F i s h e r D. R., H u i T. E., Y u r s o n i c M. [e. a.] Uranium hexafluoride public risk: letter report: report submitted August 1, 1994 / Health Protection Department Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352, PNL-10065.

Статья поступила в редакцию 3.07.2009

Светлана Петровна Бабенко родилась в 1937 г., окончила МГПИ им. В.И. Ленина в 1960 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 88 научных работ в области полупроводниковых приборов в СВЧ диапазоне, низкотемпературной плазмы, дозиметрии.

S.P. Babenko (b. 1937) graduated from the Lenin Moscow State Pedagogical Institute in 1960. D. Sc. (Eng.), professor of “Physics” department of the Bauman State Technical University. Author of 88 publications in the field of semiconductor instruments in microwave band, low-temperature plasma and monitoring of radiation dose.

Андрей Валентинович Бадьин родился в 1970 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1992 г. Канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры “Математика” физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор 23 научных работ в области дифференциальной геометрии “в целом”, нелинейных дифференциальных уравнений математической физики, применения методов математической физики в дозиметрии.

A.V. Badiin (b. 1970) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1992. Ph. D. (Phys.-Math.), senior researcher of department of mathematics of Physical faculty of the Lomonosov Moscow State University. Author of 23 publications in the field of differential geometry as a whole, nonlinear differential equations of mathematical physics, application of methods of mathematical physics in monitoring of radiation dose.