

С. П. Б а б е н к о

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА УРАНА, ПОСТУПАЮЩЕГО В ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Рассчитан дозовый коэффициент урана, определяющий меру риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиационной чувствительности для перкутанного и ингаляционного поступлений урана в организм человека в составе гексафторида урана и продуктов его гидролиза на предприятиях атомной промышленности. Рассмотрены условия аварийного и стационарного производственного поступлений.

Дозовый коэффициент ε — характеристика радиационного воздействия, поступающего вещества на организм человека, — определяется соотношением

$$\varepsilon = \frac{E}{\Pi_A},$$

где Π_A — поступление урана по активности (активность вещества, поступившего в организм; для перкутанного поступления — активность вещества, осевшего на кожу за рассмотренный промежуток времени); E — эффективная доза, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиационной чувствительности. В соответствии с работой [1]

$$E = \sum_T W_T H_{R,T} = \sum_T \frac{W_T W_R}{m_T} Q_{R,T},$$

где W_T — взвешивающий коэффициент для органа или ткани T ; m_T — масса этого органа; W_R — коэффициент для ионизирующего излучения R ; $Q_{R,T}$ — энергия излучения R , выделившаяся в рассматриваемом органе;

$H_{R,T} = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_{R,T}(t) dt$ — эквивалентная доза в органе или ткани T для излучения R , t_0 — момент поступления урана; $\dot{H}_{R,T}$ — мощность эквивалентной дозы в момент времени t в органе или ткани T .

При вычислении $H_{R,T}$ принимается [1], что для взрослого человека $\tau = 50$ лет, тогда

$$\varepsilon = \frac{E}{\Pi_A} = \frac{1}{\Pi_A} \sum_T \frac{W_T W_R}{m_T} Q_{R,T}.$$

В работе определяется дозовый коэффициент урана, поступающего в организм в составе продуктов гидролиза газообразного гексафторида урана в

режиме стационарной производственной деятельности и в условиях аварийного выброса. Рассматривается перкутанное и ингаляционное поступление урана.

Ранее [2] оценивался дозовый коэффициент при перкутанном поступлении урана в рамках интегральной модели депонирования, не учитывающей распределения урана по отдельным внутренним органам. В настоящей работе дозовый коэффициент определяется с учетом этого распределения.

Для расчета дозового коэффициента при перкутанном поступлении урана полагаем $\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_0$, где ε_k определяет вклад кожи в эффективную дозу, а ε_0 – вклад внутренних органов. Величина ε_k вычислена в рамках интегральной модели, по ней рассчитана энергия $Q_3(t)$ α -излучения урана, поглощенная в ткани кожи к моменту времени t , и число атомов урана $N_1(t)$, осевших за это время на поверхность кожи [3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k(t) &= \mu \frac{(W_k W_\alpha / m_k) Q_3(t)}{A_{\text{уд}} m_0 N_1(t)} = \\ &= \frac{(W_k W_\alpha / m_k) \bar{W}_\alpha A_{\text{уд}} m_0 j_0 S (C_1 \bar{\psi}_3(\lambda, \lambda_1 t) + C_2 \bar{\psi}_3(\lambda, \lambda_2 t))}{A_{\text{уд}} m_0 j_0 S \bar{\varphi}_1(t)} = \\ &= \mu \frac{W_k W_\alpha \bar{W}_\alpha}{m_k} \frac{C_1 \bar{\psi}_3(\lambda, \lambda_1, t) + C_2 \bar{\psi}_3(\lambda, \lambda_2, t)}{\bar{\varphi}_1(t)}. \end{aligned}$$

Здесь μ – коэффициент, определяющий часть энергии α -излучения, поглощаемого кожей, приходящуюся на наиболее чувствительный к воздействию излучения базальный слой; W_k – весовой коэффициент для кожи; W_α – весовой коэффициент для α -излучения; m_k – масса кожи; \bar{W}_α – энергия α -частицы урана; $A_{\text{уд}}$ – удельная активность урана; m_0 – масса атома урана; j_0 – плотность потока атомов урана на поверхности кожи человека, находящегося в производственном помещении (в рассматриваемой модели эта величина не зависит от времени); S – площадь поверхности кожи; λ , C_1 , C_2 , λ_1 , λ_2 – коэффициенты, описывающие процессы проникновения урана в глубь кожи и вывода урана из ткани кожи; $\bar{\varphi}_1$, $\bar{\psi}_3$ – вспомогательные функции, определяемые соотношениями

$$\bar{\varphi}_1(t) = (t_2 - t_1) \bar{N}(t) + t - \alpha_{\bar{N}(t)} \quad \text{при } t \in [t_1, +\infty), \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)};$$

$$\bar{\varphi}_1(t) = (t_2 - t_1) (\bar{N}(t) + 1) \quad \text{при } t \in [t_1, +\infty), \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)};$$

при $t \in [t_1, +\infty)$, $\alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)}$,

$$\begin{aligned} \bar{\psi}(\lambda, \lambda_1, t) &= \\ &= \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} \right) \left(-\frac{1}{\lambda + \lambda_1} + t_2 - t_1 + \frac{1}{\lambda + \lambda_1} e^{-(\lambda + \lambda_1)(t_2 - t_1)} \right) \bar{N}(t) - \\ &\quad - \frac{1}{\lambda_1} \left[\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} \right) e^{-\lambda_1(t - \beta_{\bar{N}(t)} - 1)} - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} e^{-\lambda(t_2 - t_1)} \right) e^{-\lambda_1(t - \alpha_{\bar{N}(t)} - 1)} \right] \frac{1 - e^{-\lambda_1(t_3 - t_1) \bar{N}(t)}}{1 - e^{-\lambda_1(t_3 - t_1)}} \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{(\lambda + \lambda_1)^2} + \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} \right) (t - \alpha_{\bar{N}(t)}) + \\ + \frac{1}{\lambda_1^2} e^{-\lambda_1(t - \alpha_{\bar{N}(t)})} - \frac{1}{(\lambda + \lambda_1)^2} e^{-(\lambda + \lambda_1)(t - \alpha_{\bar{N}(t)})};$$

при $t \in [t_1, +\infty)$, $\beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}$,

$$\bar{\psi}(\lambda, \lambda_1, t) = \\ = \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} \right) \left(-\frac{1}{\lambda + \lambda_1} + t_2 - t_1 + \frac{1}{\lambda + \lambda_1} e^{-(\lambda + \lambda_1)(t_2 - t_1)} \right) (\bar{N}(t) + 1) - \\ - \frac{1}{\lambda_1} \left[\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} \right) e^{-\lambda_1(t - \beta_{\bar{N}(t)})} - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda + \lambda_1} e^{-\lambda(t_2 - t_1)} \right) e^{-\lambda_1(t - \alpha_{\bar{N}(t)})} \right] \frac{1 - e^{-\lambda_1(t_3 - t_1)(\bar{N}(t) + 1)}}{1 - e^{-\lambda_1(t_3 - t_1)}};$$

$$\alpha_n = t_1 + n(t_3 - t_1); \beta_n = t_2 + n(t_3 - t_1); \gamma_n = t_3 + n(t_3 - t_1); \bar{N}(t) = \left[\frac{t - t_1}{t_3 - t_1} \right],$$

где t_1 — начало нулевого рабочего дня; t_2 — конец нулевого рабочего дня; t_3 — начало первого рабочего дня; α_n — начало рабочего дня с номером n ; β_n — конец рабочего дня с номером n ; $\gamma_n = \alpha_{n+1}$ — начало рабочего дня с номером $n + 1$; $\bar{N}(t)$ — номер рабочего дня, на который приходится момент наблюдения t .

Из приведенных соотношений видно, что величина $\varepsilon_k(t)$ не зависит от j_0 , а определяется только механизмами проникновения урана в кожу и вывода его из кожи. Следует отметить, что величина $\varepsilon_k(t)$ практически не зависит от степени обогащения урана изотопом U^{235} .

Величина ε_0 определяется в рамках камерной модели, представляющей собой комплекс трех составляющих:

— модели загрязнения воздушной среды производственного помещения [4];

— модели прохождения урана через барьерный орган (кожа для перкутанного и дыхательная система для ингаляционного поступления);

— камерной модели МКРЗ распределения вещества по органам [5], использованной в работе [8] для численного расчета распределения урана, инъецируемого в плазму крови в составе продуктов гидролиза гексафторида урана.

В рамках первых двух моделей скорость ввода массы урана в плазму крови описывается соотношениями

$$\frac{dm}{dt} = m_0 j_0 S C \left(1 - e^{-\lambda(t - \alpha_{\bar{N}(t)})} \right) \quad \text{при} \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)}; \\ \frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{при} \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}.$$

Эти соотношения были введены в программу МКРЗ [6, 8] для численного расчета депонирования в различных органах урана, вводимого в плазму крови. По программе рассчитывалось также число распадов N' атомов урана в каждом органе. По известным значениям чисел распадов N' и дополнительным сведениям о каждом органе [7] определялась эффективная доза,

формирующаяся в каждом органе, и величина ε_0 , определяющая вклад в дозовый коэффициент той части урана, которая прошла во внутренние органы.

При ингаляционном поступлении дозовый коэффициент рассчитывали аналогично тому, как при перкутанном поступлении рассчитывали составляющую дозового коэффициента ε_0 , определяемую вкладом урана, поступающего во внутренние органы. Выражение для скорости ингаляционного ввода массы урана $\frac{dm}{dt}$ в плазму крови получено в соответствии с моделью загрязнения производственной среды гексафторидом урана и продуктами его гидролиза [4], моделью поступления вещества, связанной с режимом производственной деятельности [7, 9] и моделью прохождения урана через дыхательную систему, рекомендованной МКРЗ [5, 10]:

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= m_0(n_{\text{газ}} + \xi n_a)q \quad \text{при} \quad \alpha_{\bar{N}(t)} \leq t \leq \beta_{\bar{N}(t)}; \\ \frac{dm}{dt} &= 0 \quad \text{при} \quad \beta_{\bar{N}(t)} < t < \gamma_{\bar{N}(t)}, \end{aligned}$$

где $n_{\text{газ}}$ — концентрация урана в газовой фазе в рабочем помещении; n_a — концентрация урана в аэрозольной фазе; ξ — коэффициент прохождения аэрозоля в кровь; q — объем воздуха, вдыхаемого человеком в единицу времени. Расчет величины ξ для аэрозолей UO_2F_2 , присутствующих в воздухе рабочих помещений обогатительных и сублиматных производств, приведен в работе [10].

Согласно модели загрязнения производственной среды [4] получено, что для стандартных производственных условий $n_{\text{газ}} = 4,03 \cdot 10^{15} \text{ л/м}^3$, $n_a = 4,79 \cdot 10^{16} \text{ л/м}^3$.

Для ингаляционного и перкутанного поступления рассчитаны значения следующих величин: масса урана, депонированного в различных внутренних органах; скорость накопления урана в мочевом пузыре; масса урана, выведенного из организма через мочевой пузырь; число распадов ядер урана, накопленных в различных органах.

В табл. 1, 2, 3 приведены данные по числу распадов в отдельных органах для стационарных производственных условий при перкутанном, ингаляционном и аварийном перкутанном поступлении урана соответственно.

Для разового поступления эффективная доза, по определению, совпадает с той, которая формируется в каждом органе по отдельности в течение 50 лет после поступления и далее суммируется по всем органам.

Для стационарного длительного производственного поступления эти две дозы не совпадают, так как при расчете эффективной дозы от каждого мгновенного поступления нужно учитывать распады, реализующиеся на протяжении 50 следующих лет после каждого такого поступления. Полная эффективная доза определяется суммированием этих вкладов и формирующаяся суммарная доза не зависит от длительности поступления, а определяется только величиной поступления урана в плазму крови. Это позволяет рассчитать эффективную дозу длительного поступления по значению эффективной дозы аварийной ситуации, умножая ее на отношение масс урана, введенного в плазму крови при этих двух видах поступлений, и отношение удельных активностей урана, использованного в эксперименте, моделирующем аварийную ситуацию, и в стационарных производственных условиях.

Распределение по органам доз, сформированных за 50 лет производственной деятельности, и дозовый коэффициент урана при перкутанном поступлении в стационарных производственных условиях

Орган	Число N' распадов, накопленных за 50 лет	Доза $\frac{W_T W_\alpha}{m_T} \bar{W}_\alpha N'_T$, Зв при $t = 50$ лет и $\tau = 0$	Доза $\sum_T \frac{W_T W_\alpha \bar{W}_\alpha N'_T}{m_T}$, Зв при $t = 50$ лет и $\tau = 0$ во всех внутренних органах	Эффективная доза E , Зв, при $t = 50$ лет и $\tau = 50$ лет во всех внутренних органах	Па, Бк	$\varepsilon_0 = \frac{E}{\text{Па}}$, Зв/Бк	$\varepsilon_k = \frac{E}{\text{Па}}$, Зв/Бк	ε , Зв/Бк
Почки	$1,08 \cdot 10^7$	$1,18 \cdot 10^{-5}$						
Поверхность трабекулярной кости	$4,13 \cdot 10^6$	$1,49 \cdot 10^{-5}$						
Объем трабекулярной кости	$1,18 \cdot 10^8$	$9,68 \cdot 10^{-6}$	$6,68 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^4$	$4,25 \cdot 10^{-9}$	$1,14 \cdot 10^{-9}$	$5,39 \cdot 10^{-9}$
Поверхность кортикалярной кости	$3,35 \cdot 10^6$	$9,53 \cdot 10^{-7}$						
Объем кортикалярной кости	$3,45 \cdot 10^8$	$3,93 \cdot 10^{-6}$						
Печень	$1,79 \cdot 10^7$	$6,75 \cdot 10^{-6}$						
Мягкие ткани	$1,14 \cdot 10^8$	$1,86 \cdot 10^{-5}$						

Примечание. $A_U = 10^{-15}$ кб · л⁻¹, Па — поступление по активности за 50 лет через кожу.

Распределение по органам доз, сформированных за 50 лет производственной деятельности, и дозовый коэффициент урана при ингаляционном поступлении в стационарных производственных условиях

Орган	Число N' распадов, накопленных за 50 лет	Доза $\frac{W_T W_\alpha \bar{W}_\alpha N'_T}{m_T}$, Зв при $t = 50$ лет и $\tau = 0$	Доза $\sum_T \frac{W'_T W_\alpha \bar{W}_\alpha N'_T}{m_T}$, Зв при $t = 50$ лет и $\tau = 0$ во всех внутренних органах	Эффективная доза $E, Зв$, при $t = 50$ лет и $\tau = 50$ лет во всех внутренних органах	Па, Бк	$\epsilon = \frac{E}{\text{Зв/Бк}}$, Па, Бк
Почки	$9,45 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^{-2}$				
Поверхность трабекулярной кости	$3,68 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3}$				
Объем трабекулярной кости	$1,02 \cdot 10^{11}$	$8,46 \cdot 10^{-3}$				
Поверхность кортикальной кости	$2,91 \cdot 10^9$	$8,25 \cdot 10^{-4}$				
Объем кортикальной кости	$3,02 \cdot 10^{11}$	$3,42 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$8,12 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-7}$
Печень	$1,57 \cdot 10^{10}$	$5,94 \cdot 10^{-3}$				
Мягкие ткани	$9,98 \cdot 10^{10}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$				

Примечание. $A_U = 10^{-15}$ кп · л⁻¹, Па — поступление по активности за 50 лет через дыхательную систему.

Распределение доз по органам через 50 лет после разового ввода урана согласно камерной и интегральной моделям

Орган	Число N' распадов, накопленных за 50 лет	Доза $\frac{W_T W_\alpha}{m_T} \bar{W}_\alpha N'_T, \text{Зв}$	Доза $\sum_T \frac{W_T W_\alpha}{m_T} \bar{W}_\alpha N'_T, \text{Зв}$ во всех внутренних органах	Па, Бк	$\varepsilon_0 = \frac{E}{\text{Зв/Бк}}$	$\varepsilon_k = \frac{E}{\text{Зв/Бк}}$	$\frac{E}{\text{Па}}$, $\varepsilon, \text{Зв/Бк}$
Почки	$3,6 \cdot 10^6$	$3,98 \cdot 10^{-6}$					
Поверхность трабекулярной кости	$1,3 \cdot 10^6$	$1,08 \cdot 10^{-6}$					
Объем трабекулярной кости	$4,05 \cdot 10^7$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$1,51 \cdot 10^{-9}$
Поверхность кортикальной кости	$1,04 \cdot 10^6$	$3,39 \cdot 10^{-6}$					
Объем кортикальной кости	$1,73 \cdot 10^8$	$2,98 \cdot 10^{-7}$					
Печень	$7,44 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^{-6}$					
Мягкие ткани	$6,48 \cdot 10^7$	$1,07 \cdot 10^{-5}$					
Кожа	$1,96 \cdot 10^8$	$1,74 \cdot 10^{-7}$					$4,06 \cdot 10^{-7}$

Пр и м е ч а н и е. Разовое поступление $m_0 = 1 \cdot 10^{21} \text{ 1/м}^3$; Па — поступление по активности на кожу за 50 лет.

В результате проведенных расчетов получено, что в рассмотренной аварийной ситуации поступление урана в плазму крови составляет $m = 4,05 \times 10^{-3}$ мг, а его накопление за 50 лет производственной деятельности в плазме крови $m = 1,54$ мг при перкутанном и $m = 1,36 \cdot 10^3$ мг при ингаляционном поступлении. Удельные активности урана для указанных случаев соотносятся как 1:70.

Полученные значения эффективной дозы и дозового коэффициента приведены в табл. 2 и 3.

Аналогичный расчет эффективной дозы и дозового коэффициента проведен для периода поступления в течение двух дней от начала производственной деятельности для перкутанного и ингаляционного поступлений. Получены следующие результаты:

— значение дозового коэффициента для перкутанного поступления урана примерно в 150 раз меньше, чем для ингаляционного;

— дозовый коэффициент практически не зависит от длительности и положения промежутка времени в течение периода производственной деятельности, для которого вычислялась эффективная доза, что соответствует теоретическим выводам;

— в аварийных ситуациях дозовый коэффициент в несколько раз меньше, чем в стационарных производственных условиях, что связано с различием в режимах дезактивации кожи. Это означает, что изменение времени, через которое после выброса гексафторида урана реализуется дезактивация кожи, приведет к изменению дозового коэффициента в аварийных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н о р м ы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России. – 1999. – 116 с.
2. Б а б е н к о С. П. О дозовом коэффициенте урана, поступающего перкутанно в организм человека с газообразными продуктами // Изв. Акад. промышл. экологии. – 2005. – № 1. – С. 72–77.
3. Б а б е н к о С. П. О расчете энергетических доз, получаемых человеком при перкутанном поступлении урана в повседневной деятельности на производствах, работающих с гексафторидом урана // Мед. радиол. и радиац. безопасность. – 2005. – 50, № 6.
4. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В., Б а д ь и н В. И. Математическое моделирование процесса оседания UF_6 и продуктов его гидролиза в присутствии силы тяжести // Изв. Акад. промышл. экологии. – 2003. – № 2. – С. 70–85.
5. I C R P Publication 66. Human respiratory tract model for radiological protection // Annals of the ICRP. – 1994. – 24, № 4.
6. Darrell R., Fisher T., Edmond Hui, Michael Yurconic, John R. Johnson. Uranium hexafluoride public risk / Letter report. Health Protection Department Pacific Northwest Laboratory; Richland, Washington 99352; PNL – 10065; report submitted August 1, 1994.
7. I C R P Publication 68. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. – Annals of the ICRP. – 1994. – 24, № 4.
8. Leggett R. W., Pellmar T. C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments // J. of Environmental Radioactivity, 64 (2003), 205–225. www.elsevier.com/locate/jenvrad; http://www.pdhealth.mil/downloads/The_biokinetics_of_uranium.pdf.

9. Б а б е н к о С. П. Математическая модель ингаляционного поступления токсичных веществ с продуктами гидролиза гексафторида урана в условиях повседневной производственной деятельности // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 5. – С. 76–77.
10. П р е д е л ы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Публикация 30 МКРЗ. Ч.1 / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 1982. – 136 с.
11. Б а б е н к о С. П., Б а д ь и н А. В. Методы определения функции распределения радиуса аэрозольных частиц уранилфторида // Атомная энергия. – 2005. – 99, № 5. – С. 353–358.

Статья поступила в редакцию 21.05.2007

Светлана Петровна Бабенко родилась в 1937 г., окончила в 1960 г. Московский государственный педагогический институт им. В.И. Ленина. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 65 научных работ.

S.P. Babenko (b. 1937) graduated from the Lenin Moscow State Pedagogical Institute in 1960. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 65 publications.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 548.5.01

В. И. К о ш к и н

УСКОРЕННАЯ МИГРАЦИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ПО ПОЛОСАМ АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА

Рассмотрены вопросы твердожидкофазного взаимодействия металлических веществ в условиях импульсного воздействия на зону их контакта. Показано, что при воздействии электрического и ударно-волнового импульса наблюдается ускоренная миграция легкоплавких элементов в объем твердых металлов на расстояния до нескольких миллиметров без нарушения сплошности металла матрицы. Сделано предположение о том, что наблюдаемая миграция жидких металлов происходит по полосам адиабатического сдвига, возникающим в результате действия энергетического импульса одновременно с расплавлением легкоплавких металлов.

Изучению полос адиабатического сдвига (далее ПАС) в последние десятилетия уделяется довольно большое внимание. Среди относительно новых фундаментальных работ можно назвать монографию [1], в которой наряду с детальным описанием феноменологии процесса образования и особенностей микроструктуры ПАС значительное внимание уделено математическому описанию этого явления.

Хорошо известно, что понимание природы процесса формирования ПАС очень важно для прогнозирования поведения различных материалов при высокоскоростном нагружении. В проведенных исследованиях это явление использовано для объяснения наблюдаемого в ряде экспериментов аномально быстрого (доли секунды) проникания тяжелых легкоплавких элементов