

7. Гурович Б.А., Приходько К.Е. Исследование аморфизации графита под действием электронного облучения при температуре 20 °С и –198 °С. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1997, вып. 1(65), с. 156—164.
8. Николаенко В.А., Карпунин В.И. Радиационный отжиг электронами и γ -квантами облученного нейтронами

алмаза. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 3, с. 194—197.

9. Николаенко В.А., Красиков Е.А., Николаев Ю.А. и др. Влияние плотности потока нейтронов на радиационное охрупчивание металлов корпусов ВВЭР-440/213. — Там же, 2004, т. 97, вып. 3, с. 177—182.

Поступила в Редакцию 28.05.2013

УДК 621.039.31

ПОТЕНЦИАЛЫ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ

Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)

В настоящее время нет единой трактовки потенциала разделения. Есть множество подходов и работ, посвященных его определению. Основополагающими являются работы П. Дирака и К. Козна, которые ввели потенциал для бинарной смеси изотопов исходя из аксиоматического подхода и рассмотрения идеального каскада [1]. При распространении аксиоматического подхода на многокомпонентное разделение возникают противоречия между исходными посылками и получаемыми результатами [2]. Для их преодоления многими исследователями была предложена новая трактовка аксиом. В результате в теорию были введены потенциалы, основанные на разных положениях и заметно различающиеся.

В настоящей работе предложен общий принцип введения многокомпонентных потенциалов на основе суммирования разделительной способности элементов, делящих парциальные потоки бинарных смесей, которые составлены из пар изотопов или их совокупностей. При разных предположениях о характере разделения таким способом определяются наиболее известные потенциалы и их новые виды. С помощью вычислительного эксперимента установлены потенциалы, наилучшим образом соответствующие разделительным процессам в R -каскадах и каскадах, оптимизированных по критерию минимума суммарного потока при заданной внешней концентрации целевого изотопа.

Особенности определения потенциалов разделения. Ценность изотопной смеси определяется функцией U , которую можно представить в виде произведения количества смеси на потенциал разделения $V(C_1, C_2, \dots, C_m)$, зависимый

от концентрации изотопов C_i ($i = \overline{1, m}$) и характеризующий качество смеси. Величина m — число компонентов смеси, которые будем нумеровать в порядке возрастания молекулярной массы. В соответствии с этим изменение функции ценности в разделительном устройстве (элементе, ступени, каскаде) сопоставляется с полезной работой разделения. Если рассматривать скорость изменения функции ценности, то ее значение определяет разделительную способность устройства.

Разделительная способность (мощность) трехпоточных элементов, используемых на практике, вычисляется по формуле

$$\delta U = L'V(C'_1, C'_2, \dots, C'_m) + L''V(C''_1, C''_2, \dots, C''_m) - LV(C_1, C_2, \dots, C_m), \quad (1)$$

где L', L'', L — поток отбора, отвала, питания соответственно; C'_i, C''_i, C_i — соответствующая концентрация изотопов, $i = \overline{1, m}$. Под отбором понимается фракция, обогащенная легким изотопом, отвал означает обедненную фракцию. Аналогично рассчитывается разделительная способность для ступеней ΔU_c и каскадов ΔU_k .

Поскольку покомпонентная сумма концентрации изотопов равна единице, для бинарной смеси изотопов вводятся обозначения: $C_1 = C$, $C_2 = 1 - C$. Процесс характеризуется полным коэффициентом разделения, определяемым в виде $q = C'(1 - C'') / [(1 - C')C'']$. При малом обогащении ($q \sim 1$) потенциал разделения находится согласно аксиомам П. Дирака. Первая из них говорит о том, что потенциал является функцией только концентрации C , вторая уста-

навливают независимость разделительной способности элемента от концентрации. В результате решения функционального уравнения $\delta U = \text{const}$ получаем [1]

$$V(C) = (2C - 1) \ln \frac{C}{1 - C}. \quad (2)$$

Аналогичное выражение для потенциала выводится при симметричном произвольном обогащении, описываемом равенством коэффициентов разделения по отбору α и отвалу β — $\alpha = C'(1 - C) / [(1 - C')C]$, $\beta = C(1 - C'') / [(1 - C)C'']$. Для несимметричного случая $\alpha \neq \beta$ удовлетворить обоим аксиомам не удастся. Поэтому введено понятие разделительной способности δU_1 и δU_2 , рассчитываемой для частичного потока компонентов [3]:

$$\delta U_k = L'_k V_k(C'_k) + L''_k V_k(C''_k) - L_k V_k(C_k) = L_k f_k(\alpha, \beta), \quad k = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

где $f_1(\alpha, \beta) = f_2(\beta, \alpha) = [\alpha(\beta - 1) \ln \alpha - (\alpha - 1) \times \ln \beta] / (q - 1)$; L'_k, L''_k, L_k — поток; V_k — потенциал разделения соответствующих компонентов. Эти величины равны

$$L'_k = LC'_k; \quad L''_k = L''C''_k; \quad L_k = LC_k; \\ V_1(C_1) = \ln[C / (1 - C)]; \quad V_2(C_2) = \ln[(1 - C) / C].$$

Стремясь обеспечить независимость от концентрации, величину δU представили в виде линейной комбинации [3]

$$\delta U = f(\alpha, \beta) [\delta U_1 / f_1(\alpha, \beta) + \delta U_2 / f_2(\alpha, \beta)] = f(\alpha, \beta) (L_1 + L_2) = f(\alpha, \beta) L, \quad (4)$$

где $f(\alpha, \beta)$ — произвольная функция, в качестве которой удобно выбрать $f_1(\alpha, \beta)$ или $f_2(\alpha, \beta)$. Отсюда был определен потенциал разделения

$$V(C) = f(\alpha, \beta) [C / f_1(\alpha, \beta) - (1 - C) / f_2(\alpha, \beta)] \ln [C / (1 - C)],$$

который идентичен функции [4] и может использоваться при оптимизации каскадов по критерию максимума разделительной способности элементов [5].

Принцип суммирования разделительной способности может быть распространен на многокомпонентные смеси. В наиболее общем виде

разделительную способность элемента, аналогично и других устройств, можно представить как

$$\delta U = \sum_{i,j} \delta U_{ij} p_{ij}, \quad (5)$$

где индексы суммирования i и j определяют пару выбранных изотопов или их совокупностей; δU_{ij} — разделительная способность для парциальных потоков i, j -й пары; p_{ij} — коэффициент, определяемый в зависимости от предположений о характере разделения.

Потенциалы разделения, зависящие только от концентрации изотопов. Многокомпонентное разделение можно представить как сумму $m(m - 1) / 2$ независимых параллельно осуществляемых циклов разделения, в каждом из которых разделяется пара изотопов. На практике реализовать такое разбиение на циклы невозможно. Поэтому это представление является математическим приемом.

Определим потенциал разделения исходя из общей формулы (5) при одинаковых коэффициентах $p_{ij} = 1$ для разделительной способности, соответствующей циклам. Будем считать, что в каждом цикле разделения участвует только смесь рассматриваемой пары изотопов. Для пары изотопов с индексами i и j (пусть $i < j$) поток питания элемента, разделяющего эту смесь, равен $L_{ij} = L(C_i + C_j)$. Аналогично определяются потоки отбора L'_{ij} и отвала L''_{ij} . Введем относительную концентрацию $\bar{C}_i = C_i / (C_i + C_j)$. Тогда согласно формуле (2) потенциал указанной пары компонентов

$$V_{ij}(\bar{C}_i) = (2\bar{C}_i - 1) \ln \frac{\bar{C}_i}{1 - \bar{C}_i} = \frac{C_i - C_j}{C_i + C_j} \ln \frac{C_i}{C_j}.$$

Подставляя данную функцию и потоки в выражение для разделительной способности, определяемой для i, j -й пары изотопов, находим

$$\delta U_{ij} = L'(C'_i - C'_j) \ln(C'_i / C'_j) + L''(C''_i - C''_j) \ln(C''_i / C''_j) - L(C_i - C_j) \ln(C_i / C_j).$$

Суммирование разделительной способности $\delta U = \sum_{i,j=1}^m \delta U_{ij}$ при $i < j$ в соответствии с формулой (1) приводит к потенциалу разделения

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^m (C_i - C_j) \ln(C_i/C_j). \quad (6)$$

Это выражение для потенциала приведено в работе [2] исходя из сложных аксиоматических построений.

В качестве альтернативы будем считать, что в каждом цикле участвует полная смесь всех изотопов, хотя разделяются только рассматриваемые пары компонентов. Тогда вместо $L'_{ij}, L''_{ij}, L_{ij}$ в выражение для δU_{ij} необходимо подставить соответственно L', L'', L . В результате при коэффициенте $p_{ij} \neq 1$

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^m p_{ij} (C_i - C_j) / (C_i + C_j) \ln(C_i/C_j). \quad (7)$$

Аналогичная формула (отличается множителем $m(m-1)/2$, на который делится правая часть) была предложена [6] на основе представлений, близких к использованным при выводе потенциала (6). При этом каждое слагаемое правой части потенциала (6) было разделено на $C_i + C_j$ для уменьшения зависимости δU от концентрации и введены произвольные константы p_{ij} .

В другой упрощенной схеме предположим, что многокомпонентное разделение проводится в m независимых этапов. Пусть на каждом этапе происходит бинарное разделение одного из изотопов от остальных компонентов. Если учитывать разделительную способность δU_i для парциального потока i -го изотопа, определяемую по формуле (3) для $k = 1$, то

$$\delta U_i = L'_i \ln[C'_i/(1 - C'_i)] + L''_i \ln[C''_i/(1 - C''_i)] - L_i \ln[C_i/(1 - C_i)].$$

Отсюда, суммируя $\delta U = \sum_{i=1}^m \delta U_i$, получим, что соответствие с выражением (1) достигается при потенциале разделения

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{i=1}^m C_i \ln[C_i/(1 - C_i)]. \quad (8)$$

Потенциал разделения (8) был введен на основании интуитивных соображений исходя из сравнения экспериментальных данных о затра-

тах на разделение и теоретических оценок по изменению энтропии [7].

Обратный вариант аналогичной упрощенной схемы связан с суммированием разделительной способности, соответствующей $k = 2$ с заменой концентрации C_2 на $1 - C_1$. В этом случае

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{i=1}^m (1 - C_i) \ln[(1 - C_i)/C_i] = \sum_{i=1}^m (C_i - 1) \ln[C_i/(1 - C_i)]. \quad (9)$$

Потенциалы (6)–(9) не являются единственно возможными, зависящими только от концентрации. Можно выбрать другие модели суммирования бинарных разделительных способностей и получить новые потенциалы.

Потенциалы, зависящие от концентрации и характеристик разделения. Произвольные константы p_{ij} в формуле (5) могут задаваться функциями от коэффициентов разделения элементов по аналогии с выражением (4). Это позволяет определить разделительную способность элементов δU , которая не зависит от концентрации. Введение такой функции основано на следующих положениях.

Бинарная разделительная способность элемента, отнесенная к потоку i -го изотопа, вычисляется по соотношениям, соответствующим (3) [8]:

$$\delta U_{ij} = L'_i V_i(R'_{ij}) + L''_i V_i(R''_{ij}) - L_i V_i(R_{ij}) = L_i f_{ij}, \quad (10)$$

где введены относительная концентрация $R'_{ij} = C'_i/C'_j$; $R''_{ij} = C''_i/C''_j$; $R_{ij} = C_i/C_j$; потенциал $V_i(R_{ij}) = \ln(C_i/C_j)$; коэффициенты разделения $\alpha_{ij} = R'_{ij}/R_{ij}$; $\beta_{ij} = R_{ij}/R''_{ij}$. Удельная разделительная способность f_{ij} (на единицу потока) рассчитывается по формуле

$$f_{ij} = f_{ij}(\alpha_{ij}, \beta_{ij}) = [\alpha_{ij}(\beta_{ij} - 1) \ln \alpha_{ij} - (\alpha_{ij} - 1) \ln \beta_{ij}] / (q_{ij} - 1),$$

где $q_{ij} = \alpha_{ij}\beta_{ij}$. Аналогичная удельная разделительная способность f_{ji} , отнесенная к потоку j -го изотопа, $f_{ji} = f_{ji}(\alpha_{ji}, \beta_{ji}) = [\beta_{ji}(\alpha_{ji} - 1) \ln \beta_{ji} - (\beta_{ji} - 1) \ln \alpha_{ji}] / (q_{ij} - 1)$.

При определении δU можно взять общий множитель f_{1m} и суммировать разделительную способность δU_{ij} с коэффициентами, обратно пропорциональными f_{ij} . Из соотношения (10) следует, что если принять $p_{ij} = f_{1m} b_{ij}/f_{ij}$, то при выполнении условия $\sum_{j=1}^m b_{ij} = 1$ при $i \neq j$ разделительная способность δU не будет зависеть от концентрации. При этом коэффициенты b_{ij} могут выбираться с учетом конкретных особенностей рассматриваемого процесса разделения.

Суммируя

$$\delta U = f_{1m} \sum_{i,j=1}^m [L' C'_i \ln(C'_i/C'_j) + L'' C''_i \ln(C''_i/C''_j) - L C_i \ln(C_i/C_j)] b_{ij}/f_{ij},$$

согласно соотношению (1) находим

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = f_{1m} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^m (b_{ij} C_i/f_{ij} - b_{ji} C_j/f_{ji}) \ln(C_i/C_j). \quad (11)$$

Потенциал разделения (11) переходит в формулу [7]

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^m \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{ji}} \right)^2 (b_{ij} C_i - b_{ji} C_j) \ln(C_i/C_j) \quad (12)$$

при условии малого обогащения путем разложения в ряд удельной разделительной способности и использования зависимостей $q_{ij} = q_0^{\Delta M_{ji}}$, где q_0 — полный коэффициент разделения на единицу разности массы; $\Delta M_{ji} = M_j - M_i$. Другим частным видом является потенциал разделения [8]. Для этого необходимо положить $b_{im} = 1$, $b_{ij} = b_{ji} = 0$ при $i, j \neq m$. Тогда

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = f_{1m} \sum_{i=1}^{m-1} (C_i/f_{im} - b_{mi} C_m/f_{mi}) \ln(C_i/C_m). \quad (13)$$

С учетом формулы (11) можно также выразить потенциал разделения, соответствующий R-каскаду. Пусть такой каскад строится при условии $\alpha_{rs} = \beta_{rs}$, где r, s — индексы ключевых

компонентов. Тогда, принимая $b_{rs} = b_{sr} = 1$, $b_{kr} = -f_{kr}/(f_{ks} - f_{kr})$, $b_{ks} = f_{ks}/(f_{ks} - f_{kr})$ при $k \neq r, s$ (остальные коэффициенты равны нулю), находим

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = f_{1m} [C_r/f_{rs} - C_s/f_{sr} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r,s}}^m C_k/(f_{ks} - f_{kr})] \ln(C_r/C_s). \quad (14)$$

Формула (14) предполагает $M_k \neq (M_r + M_s)/2$. В случае малого обогащения она переходит в выражение для потенциала [9]

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = (\Delta M_{m1})^2 \sum_{i=1}^m (1/a_k) C_k \ln(C_r/C_s), \quad (15)$$

где $a_k = \Delta M_{sr}(M_r + M_s - 2M_k) \neq 0$. Этот потенциал с точностью до множителя $(\Delta M_{m1})^2$ совпадает с потенциалом разделения, введенным на основании рассмотрения суммарного потока R-каскада [10]. Ранее для трехкомпонентной смеси урана предложено аналогичное выражение [11]. Следует отметить, что если в формуле (15) $M_k = (M_r + M_s)/2$ для одного из изотопов, то необходимо заменить это слагаемое на $C_k \ln^2(C_r/C_s)/[2(\Delta M_{rs})^2]$ под знаком суммы.

При малом обогащении на основании соотношения (12) для одинаковых коэффициентов $b_{ij} = b_{ji} = 1/(m-1)$ находим потенциал

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^m \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{ij}} \right)^2 (C_i - C_j) \ln \left(\frac{C_i}{C_j} \right), \quad (16)$$

который с включением дополнительных членов, не меняющих разделительную способность, обоснован в работе [12] (в правой части нет множителя $(\Delta M_{m1})^2$).

Наконец, еще один вид потенциала, являющийся наилучшим при оптимизации каскадов по критерию максимума разделительной способности [5], получается на основании формулы (12) при $b_{rs} = b_{sr} = b_{kr} = 1$ и $k \neq r, s$ (остальные коэффициенты равны нулю):

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{rs}} \right)^2 (C_r - C_s) \ln \frac{C_r}{C_s} + \sum_{k=1, k \neq r, s}^m \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{rk}} \right)^2 C_k \ln \frac{C_k}{C_r}. \quad (17)$$

Здесь r, s — индексы основных изотопов. При этом целевым считается изотоп с индексом r . Более общий вид потенциала такого типа находится по формуле (11) при тех же коэффициентах $b_{rs} = b_{sr} = b_{kr} = 1$.

Расчет показателей эффективности каскадов с помощью потенциалов. Для проверки рассмотренных потенциалов были проведены расчеты каскадов для разных изотопных смесей. Во всех случаях с помощью потенциалов рассчитывали разделительную способность ступеней ΔU_c и каскада ΔU_k , коэффициент полезного действия каскада η и его коэффициент использования разделительной мощности μ . Эффективность потенциалов оценивали по степени близости коэффициента полезного действия η и коэффициента использования разделительной мощности μ к единице. Коэффициент полезного действия η определяли по отношению ΔU_k к сумме $\sum \Delta U_c$, взятой по всем ступеням, коэффициент использования разделительной мощности μ — по отношению ΔU_k к максимально возможной разделительной способности каскада ΔU_m , которую находили умножением суммарного потока ступеней $\sum G$ на максимальную удельную разделительную способность ступени $\Delta U_c/G$ (G — поток питания ступени), определенную в расчете каскада.

Расчеты показали, что потенциалы (14), (15) наиболее соответствуют R -каскадам. Вычисленные с их помощью коэффициент полезного

действия $\eta = 1$, показатель μ близок к 1. При этом потенциал (15) выгодно отличается от (14) простотой расчетов. Для каскадов, оптимизированных по критерию минимума суммарного потока при заданной внешней концентрации целевого изотопа, наибольшую эффективность имеет потенциал разделения (17). Соответствующий ему потенциал более общего типа (11), как и соотношение (13), трудно использовать, так как не совсем ясно, как задавать коэффициенты разделения.

В табл. 1 для примера приведены данные о разделении изотопов кремния ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si в R -каскаде, рассчитанном при числе ступеней $n = 81$, номере ступени подачи питания $f = 21$, коэффициенте разделения $q_0 = 1,732$, ключевых компонентах $r = 1$, $s = 3$. Концентрация ^{28}Si и ^{29}Si в питании принималась равной 92,21 и 4,71%, поток отбора — 1 г/с. В результате расчетов концентрация этих изотопов составила в отборе 98,71 и 1,29%, в отвале — $1,37 \cdot 10^{-2}$ и 53,08%. Суммарный поток получился равным 291,77 г/с. Показатели эффективности каскада оказались наибольшими для потенциала (15): $\eta = 1$ и $\mu = 0,985$. Потенциал (7) ($p_{ij} = 1$) характеризуется $\eta = 0,943$, $\mu = 0,807$. Остальные потенциалы имеют невысокие значения. При этом для потенциала (11) ($b_{12} = b_{21} = b_{31} = 1$) и (13) ($b_{31} = b_{32} = 0,5$) удельная разделительная способность ступени $\Delta U_c/G$ не зависит от концентрации. Низкие значения коэффициента полезного действия η и коэффициента использования разделительной мощности μ для потенциала (17) при $r = 1$, $s = 2$ и потенциала (11) объясняются тем, что рассмотренный R -каскад по суммарному потоку $\sum G$ далек от оптимального, определяемого концентрацией ^{28}Si .

Таблица 1. Показатели эффективности R -каскада для изотопов кремния

Потенциал разделения	$\Delta U_c/G$	η	μ	Потенциал разделения	$\Delta U_c/G$	η	μ
(2)	0,036—0,074	0,239	0,122	(11)	0,147	0,173	0,173
(6)	0,090—0,182	0,766	0,671	(13)	0,147	0,812	0,812
(7)	0,102—0,290	0,943	0,807	(15)	0,147—0,150	1,000	0,985
(8)	0,008—0,040	0,196	0,172	(16)	0,147—0,149	0,491	0,481
(9)	0,081—0,181	0,789	0,669	(17)	0,145—0,149	0,173	0,170

Таблица 2. Показатели эффективности оптимального каскада для изотопов кремния

Потенциал разделения	$\Delta U_c/G$	η	μ	Потенциал разделения	$\Delta U_c/G$	η	μ
(2)	0,041—0,073	0,973	0,703	(9)	0,087—0,182	0,778	0,653
(6)	0,097—0,183	0,773	0,679	(15)	0,146—0,154	0,774	0,744
(7)	0,116—0,311	0,717	0,605	(16)	0,145—0,149	0,782	0,771
(8)	0,016—0,056	0,867	0,722	(17)	0,148—0,150	0,986	0,982

В табл. 2 приведены расчеты каскада с наименьшим суммарным потоком 51,17 г/с при концентрации ^{28}Si такой же, как в предыдущем примере. Одинаковыми являются концентрация питания изотопов и поток отбора. Вычисления проводили по методике [13]. Следует отметить, что при одинаковом потоке элементов L минимизация суммарного потока $\sum G$ эквивалентна оптимизации каскада по критерию минимума числа разделительных элементов. В результате оптимизации были определены наилучшие число ступеней $n = 42$ и номер ступени подачи питания $f = 38$. Концентрация ^{29}Si в отборе составляет 1,24%, в отвале — 53,77%. Для потенциала (17) коэффициент полезного действия $\eta = 0,986$, коэффициент использования разделительной мощности $\mu = 0,982$. Достаточно высокий показатель $\eta = 0,973$ имеет потенциал (2), но коэффициент использования разделительной мощности $\mu = 0,703$. Остальные потенциалы, в том числе потенциал (15) ($r = 1$ и $s = 3$) имеют низкие показатели.

Заключение. Таким образом, исследованиями установлены потенциалы (15), (17), наилучшим образом соответствующие разделительным процессам в R -каскадах и оптимальных каскадах с минимальным суммарным потоком и заданной концентрацией целевого изотопа. Эти же потенциалы являются наиболее эффективными с точки зрения оптимизации каскадов на максимум разделительной способности элементов [5], что позволяет их рекомендовать для расчета эффективности многокомпонентного разделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cohen K.** The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U . NY: McGraw-Hill, 1951.
2. **Сазыкин А.А.** Термодинамический подход к разделению изотопов. — В кн.: Изотопы: свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000, с. 72—108.
3. **Yamamoto I., Kanagawa A.** Resolution of inconsistencies of separative power for asymmetric process. — J. Nucl. Sci. Technol., 1977, v. 14, № 8, p. 565—571.
4. **Lehrer-Ilamed Y.** On the value function for multicomponent isotope separation. — J. Nucl. Energy, 1969, v. 23, p. 559—567.
5. **Палкин В.А.** Эффективность использования потенциалов разделения при оптимизации каскадов. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 4, с. 211—216.
6. **Kai T.** Theoretical analysis of ternary UF_6 gas isotope separation by centrifuge. — J. Nucl. Sci. Technol., 1983, v. 20, p. 491—502.
7. **Палкин В.А.** Обобщение решения Смородинского для потенциала разделения многокомпонентной смеси изотопов. — Атомная энергия, 2003, т. 95, вып. 5, с. 373—382.
8. **Yamamoto I., Kanagawa A.** Synthesis of value function for multicomponent isotope separation. — J. Nucl. Sci. Technol., 1979, v. 16, № 1, p. 43—48.
9. **Palkin V.A.** On the value function for multi-isotope mixtures separation. — Ars Separatoria Acta, 2004, № 3, p. 51—61.
10. **Borisevich V., Sulaberidze G., Wood H.** The theory of isotope separation in cascades: problems and solutions. — Ibid., 2003, № 2, p. 107—124.
11. **De La Garza A., Garrett G., Murphy J.** Multicomponent isotope separation in cascades. — Chem. Engng Sci., 1961, v. 15, p. 188—209.
12. **Колокольцов Н.А., Николаев Б.И., Сулаберидзе Г.А., Третьяк С.А.** О функции ценности в каскадах для разделения многокомпонентной смеси. — Атомная энергия, 1970, т. 29, вып. 2, с. 128—130.
13. **Палкин В.А., Сбитнев Н.А., Фролов Е.С.** Расчет оптимальных параметров каскада для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Там же, 2002, т. 92, вып. 2, с. 130—133.

Поступила в Редакцию 15.01.13