

Метод определения энергии миграции вакансий в ГЦК-металлах

Б. М. Исаков

Показан простой метод вычисления энергии миграции вакансий в ГЦК-металлах с использованием параметров потенциала Морзе. Приведены результаты расчета энергии миграции вакансий в Ag, Al, Au, Cu, Ni, Pb и Pt. Вычисленные значения энергии миграции вакансий хорошо согласуются с экспериментальными данными кроме одного случая.

Ключевые слова: вакансия, энергия миграции, ГЦК-металлы, потенциал Морзе.

The vacancy migration energy in face-centered cubic metals calculation simple method is shown. Calculations of the vacancy migration energy have been performed for Ag, Al, Au, Cu, Ni, Pb and Pt. Where calculated values of the vacancy migration energy could be compared with experiment, all but one case showed good agreement.

Keywords: vacancy, migration energy, F.C.C. metals, morse potential function.

Введение

При исследовании кинетики накопления точечных дефектов в облученной меди [1] была показана сильная зависимость концентрации точечных дефектов от значения энергии миграции дефектов в металлах. Анализ работ, посвященных определению энергии миграции точечных дефектов в металлах, свидетельствует о большом разбросе значений энергии, найденных экспериментальными, теоретическими и расчетными методами. Так, например, экспериментальные значения энергии миграции вакансий в меди варьируются от 0,6 до 1,08 эВ

Таблица 1

Экспериментальные значения энергии миграции вакансий в Cu, эВ [2]

Метод самодиффузии	Метод дислокационных петель	Закалка	Закалка и облучение
0,77 – 0,88	0,60	0,71 – 1,08	0,67 – 0,72

Таблица 2

Расчетные значения энергии миграции вакансий в Cu, эВ [2]

Потенциал Морзе	Комбинированный потенциал	Потенциал Борна-Майера	Теория упругости
0,83 – 1,00	0,81	0,34	0,92

(табл. 1), а расчетные значения — от 0,34 до 1,0 эВ (табл. 2).

Из табл. 2 хорошо видно, что использование даже одного потенциала парного взаимодействия атомов (потенциала Морзе) приводит к значительному разбросу расчетных значений энергии миграции вакансий в меди, полученных разными авторами. Причиной столь выраженного расхождения расчетных значений энергии миграции вакансий является, возможно, некая методическая неточность, допускаемая в вычислениях. Или, вообще, использование потенциала Морзе не может обеспечить приемлемую точность расчетов. Поэтому в данной работе предпринята попытка достаточно строго подойти к определению постоянного потенциала Морзе для последующего вычисления энергии миграции вакансий в Cu и других ГЦК-металлах.

Методика определения параметров потенциала Морзе

Одной из первых работ, посвященных определению параметров потенциала Морзе для кубических кристаллов, была [3]. Методика определения констант, изложенная в этой работе, повторялась в той или иной мере в последующих исследованиях,

посвященных данной проблеме. Мы тоже придерживались этой методики, но попытались по возможности расширить ее. Расширение методики касалось, во-первых, вывода системы уравнений для определения параметров потенциала Морзе. И, во-вторых, были определены условия, при которых система уравнений может быть использована для расчета параметров.

При объединении атомов в решетку энергия взаимодействия является функцией координат всех атомов в кристалле

$$U = U(r_1, r_2, \dots, r_N).$$

Если для расчета энергии взаимодействия N атомов в кристалле использовать двухчастичные или парные взаимодействия, то полная энергия взаимодействия определяется формулой

$$U = \frac{1}{2} N \sum_i U_i, \quad (1)$$

где U_i — энергия парного взаимодействия атома, выбранного в качестве центрального, с i -м атомом. Суммирование производится по всем атомам один раз, а так как атомы одного металла идентичны, то полученную сумму умножают на число атомов N . Коэффициент $1/2$ появляется из-за того, что в качестве центрального может быть любой атом решетки и $U_{li} = U_{il}$.

Потенциал парного взаимодействия Морзе имеет вид [4]

$$U_i = U(r_i) = D \left\{ \exp[-2\alpha(r_i - r_0)] - \exp[-\alpha(r_i - r_0)] \right\}, \quad (2)$$

где $D = -U(r_0)$ показывает глубину потенциальной ямы взаимодействия между атомами с номером i и центральным; r_i — расстояние между этими атомами; r_0 — расстояние между атомами, на котором потенциал достигает минимума (не совпадает с расстоянием между ближайшими атомами, но имеет тот же порядок); α — параметр, имеющий размерность, м^{-1} .

Если ввести постоянную $\zeta = \exp(\alpha r_0)$, то выражение (2) можно представить в виде

$$U(r_i) = D\zeta^2 \exp(-2\alpha r_i) - 2D\zeta \exp(-\alpha r_i).$$

Для кубических кристаллов расстояния между атомами можно выразить, используя кристаллографические индексы и параметр решетки. Тогда

$$r_i = a \sqrt{m_i^2 + n_i^2 + l_i^2} = a M_i,$$

где a — длина ребра элементарной ячейки кубического кристалла (параметр решетки), m_i, n_i, l_i — кри-

сталлографические индексы положения i -го атома относительно центрального атома в решетке кристалла. С учетом этого соотношения потенциал Морзе можно представить удобной для расчетов формулой

$$U_i(a) = D\zeta^2 \exp(-2\alpha a M_i) - 2D\zeta \exp(-\alpha a M_i). \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим полную энергию кристалла, обусловленную парным взаимодействием атомов

$$U = \frac{1}{2} ND\zeta^2 \sum_i \exp(-2\alpha a M_i) - ND\zeta \sum_i \exp(-\alpha a M_i).$$

При $T = 0$ К параметр решетки должен быть a_0 и тогда полную энергию взаимодействия атомов в кристалле при температуре абсолютного нуля можно будет определить по формуле

$$U_0 = \frac{1}{2} ND\zeta^2 \sum_i \exp(-2\alpha a_0 M_i) - ND\zeta \sum_i \exp(-\alpha a_0 M_i).$$

Полная энергия взаимодействия атомов U_0 равна энергии связи или энергии сублимации кристалла E_s . Следовательно, одно из уравнений для определения констант потенциала Морзе будет иметь вид

$$E_s = \frac{1}{2} ND\zeta^2 \sum_i \exp(-2\alpha a_0 M_i) - ND\zeta \sum_i \exp(-\alpha a_0 M_i).$$

Для нахождения всех параметров потенциала Морзе необходимы еще два уравнения, поэтому используются первая и вторая производные от полной энергии кристалла как функции от расстояния между атомами

$$\begin{aligned} \frac{dU}{da} &= -\alpha ND\zeta^2 \sum_i M_i \exp(-2\alpha a M_i) + \\ &+ \alpha ND\zeta \sum_i M_i \exp(-\alpha a M_i), \\ \frac{d^2U}{da^2} &= 2\alpha^2 ND\zeta^2 \sum_i M_i^2 \exp(-2\alpha a M_i) - \\ &- \alpha^2 ND\zeta \sum_i M_i^2 \exp(-\alpha a M_i). \end{aligned} \quad (4)$$

По определению, полная энергия кристалла, атомы которого находятся на равновесных расстояниях друг от друга, будет минимальна. Поэтому уравнение (4) в случае $a = a_0$ примет следующий вид:

$$0 = -\zeta \sum_i^N M_i \exp(-2\alpha a_0 M_i) + \sum_i^N M_i \exp(-\alpha a_0 M_i).$$

Третье уравнение находим, связав вторую производную полной энергии от расстояния между атомами со сжатием кристалла. Известно, что

$$K = \frac{1}{k} = -V_0 \left(\frac{d^2 U}{dV^2} \right)_{V=V_0}, \text{ где } K \text{ — модуль объемной}$$

упругости, k — объемная сжимаемость, V — объем кристалла (в случае кубического кристалла $V = na^3$, n — число элементарных ячеек в кристалле). Если на одну элементарную ячейку приходится c атомов (в ОЦК-решетке 2 атома, а в ГЦК 4 атома), то общее число атомов в кристалле будет $N = cn$. Поэтому

$$V = \frac{Na^3}{c}, \quad V_0 = \frac{Na_0^3}{c}. \text{ Соответственно,}$$

$$\left(\frac{d^2 U}{da^2} \right)_{a=a_0} = \left(\frac{d^2 U}{dV^2} \right)_{V=V_0} \left(\frac{dV}{da} \right)_{a=a_0}^2.$$

Тогда

$$-\frac{9NKa_0}{c} = 2\alpha^2 DN \zeta^2 \sum_i^N M_i^2 \exp(-2\alpha a_0 M_i) - \alpha^2 DN \zeta \sum_i^N M_i^2 \exp(-\alpha a_0 M_i). \quad (5)$$

Итак, для определения α , D и r_0 имеется система из трех уравнений:

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{1}{2} D \zeta^2 \sum_i^N \exp(-2\alpha a_0 M_i) - \\ &- D \zeta \sum_i^N \exp(-\alpha a_0 M_i), \\ 0 &= -\zeta \sum_i^N M_i \exp(-2\alpha a_0 M_i) + \\ &+ \sum_i^N M_i \exp(-\alpha a_0 M_i), \end{aligned} \quad (6)$$

$$-\frac{9Ka_0}{c} = 2\alpha^2 D \zeta^2 \sum_i^N M_i^2 \exp(-2\alpha a_0 M_i) - \alpha^2 D \zeta \sum_i^N M_i^2 \exp(-\alpha a_0 M_i),$$

где ϵ_s — энергия сублимации, приходящаяся на один атом.

Система уравнений (6) может быть использована только тогда, когда $M_i = \text{const}$ для любых i или монотонно изменяется с увеличением i . Однако M_i изменяется скачком от одной группы атомов, окружающих центральный атом, к другой группе атомов. Так, для ГЦК-решетки первые 12 атомов, окружающих центральный атом, имеют одинаковый

$$M_i = M_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}. \text{ У следующих 6 атомов — } M_i = M_2 = 1$$

затем у 24 атомов $M_3 = \sqrt{\frac{3}{2}}$ и т.д. Поэтому суммы, входящие в уравнения (6), должны иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} \exp(-2\alpha a_0 M_i), \\ S_2 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} \exp(-\alpha a_0 M_i), \\ S_3 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} M_i \exp(-2\alpha a_0 M_i), \\ S_4 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} M_i \exp(-\alpha a_0 M_i), \\ S_5 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} M_i^2 \exp(-2\alpha a_0 M_i), \\ S_6 &= \sum_j^L \sum_{i=N_{j-1}+1}^{N_j} M_i^2 \exp(-\alpha a_0 M_i), \end{aligned}$$

где $L = 1, 2, \dots, z$; $N_0 = 0, N_1 = 12, N_2 = 18, N_3 = 42, \dots$ — общее количество атомов в одном, двух, трех, ..., z — слоях атомов, окружающих центральный атом. Здесь L — номер слоя атомов, находящихся на одинаковом расстоянии от центрального атома. С помощью j задается суммирование. При $j = 1$ суммирование осуществляется с 1-го по 12-й атом, окружающих

центральный атом, при $j = 2$ — с 13-го по 18-й атом, при $j = 3$ — с 19-го по 42-й атом и т.д. С учетом этих сумм уравнения (6) трансформируются в следующую систему:

$$D = \frac{2\epsilon_s S_3^2}{S_4(S_1 S_4 - 2S_2 S_3)}, \quad (7)$$

$$\alpha = 3 \sqrt{\frac{K a_0}{2c\epsilon_s}} \sqrt{\frac{S_1 S_4 - 2S_2 S_3}{S_3 S_6 - 2S_4 S_5}}, \quad (8)$$

$$r_0 = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{S_4}{S_3} \right). \quad (9)$$

Полученные уравнения просты и могут быть решены аналитическим путем, когда атом, взятый в качестве центрального, окружен 12 ближайшими атомами. Для большего числа атомов предпочтительнее численный расчет параметров потенциала Морзе. Причем число атомов должно быть таким, чтобы вычисляемые параметры перестали зависеть от последующего добавления атомов. Еще одним

важным условием уменьшения погрешности определения параметров является выбор надежных физических характеристик металлов таких, как параметр решетки, модуль объемной упругости и энергия сублимации. Поэтому для воспроизведения результатов вычисления параметров потенциала Морзе кроме приведения расчетных уравнений желательнее указывать число атомов, использованных для расчета, и значения физических характеристик металлов, для которых производилось определение параметров.

Значения параметров потенциала Морзе для ГЦК-металлов

В качестве примера в табл. 3 приведены значения α , D и r_0 для Au и Cu в зависимости от числа взаимодействующих атомов в решетке, полученные путем численного решения системы уравнений (7)–(9).

Из табл. 3 видно, как от выбора количества взаимодействующих атомов зависит точность вычисле-

Таблица 3

Параметры потенциала Морзе Au и Cu

Число атомов, окружающих центральный атом	Параметры потенциала Морзе					
	$\alpha, \text{Å}^{-1}$	$D, \text{эВ}$	$r_0, \text{Å}$	$\alpha, \text{Å}^{-1}$	$D, \text{эВ}$	$r_0, \text{Å}$
	Au			Cu		
12	1,792350	-0,630000	2,884288	1,413711	-0,583333	2,556191
18	1,775435	-0,566132	2,951248	1,382995	-0,484107	2,694032
42	1,765256	-0,518487	3,010194	1,345940	-0,377267	2,913676
54	1,765053	-0,512651	3,016901	1,341263	-0,358200	2,960251
78	1,765894	-0,509243	3,019725	1,342476	-0,342839	2,993858
86	1,766118	-0,508871	3,019862	1,343737	-0,340618	2,997267
134	1,766941	-0,508063	3,019693	1,351339	-0,334397	3,000435
140	1,766999	-0,508024	3,019658	1,352087	-0,334034	3,000112
176	1,767197	-0,507927	3,019490	1,355484	-0,332902	2,997245
200	1,767266	-0,507900	3,019426	1,357115	-0,332507	2,995451
224	1,767303	-0,507888	3,019389	1,358282	-0,332291	2,993968
248	1,767326	-0,507882	3,019361	1,359114	-0,332169	2,992811
320	1,767359	-0,507877	3,019324	1,360883	-0,331959	2,990200
368	1,767362	-0,507877	3,019322	1,361488	-0,331911	2,989225
380	1,767363	-0,507877	3,019321	1,361597	-0,331903	2,989045
428	1,767362	-0,507877	3,019324	1,361911	-0,331884	2,988511
458	1,767365	-0,507877	3,019319	1,362049	-0,331877	2,988276
530	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362290	-0,331865	2,987856
554	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362352	-0,331863	2,987745
602	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362436	-0,331860	2,987597
626	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362470	-0,331858	2,987536
674	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362524	-0,331857	2,987432
682	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362529	-0,331857	2,987423
766	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362577	-0,331855	2,987332
790	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362589	-0,331854	2,987310
886	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362605	-0,331857	2,987285
934	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362619	-0,331857	2,987258
958	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362621	-0,331858	2,987255
1054	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362641	-0,331858	2,987211
1060	1,767371	-0,507877	3,019308	1,362642	-0,331858	2,987209

Параметры потенциала Морзе ГЦК-металлов

Металл	Параметры, вычисленные по предлагаемой методике			Параметры, вычисленные другими авторами			Литература
	$\alpha, \text{\AA}^{-1}$	$D, \text{эВ}$	$r_0, \text{\AA}$	$\alpha, \text{\AA}^{-1}$	$D, \text{эВ}$	$r_0, \text{\AA}$	
Ag	1,6605	-0,2705	3,058	1,3690	-0,3323	3,115	[3]
Al	1,0842	-0,2705	3,552	1,1646	-0,2703	3,253	[3]
Au	1,7674	-0,5079	3,019	1,5384	-0,4793	3,035	[5]
Cu	1,3626	-0,3319	2,987	1,3588	-0,3429	2,866	[3]
Ni	1,2831	-0,3750	3,039	1,4199	-0,4205	2,780	[3]
Pb	1,2231	-0,2410	3,801	1,1836	0,2348	3,733	[5]
Pt	1,4263	-0,64078	3,086	1,5687	-0,7032	2,936	[5]

ния параметров. Если для Au достаточно 530 атомов для получения значений параметров, не изменяющихся даже в шестом знаке после запятой (обычно ограничиваются четвертым знаком после запятой), то для Cu необходимо использовать не менее 934 атомов, чтобы значения параметров не изменялись в четвертом знаке после запятой при последующем увеличении числа атомов в решетке.

В табл. 4 даны значения параметров потенциала Морзе, полученные другими авторами, и нами по предлагаемой методике для кубического кристалла из 1061 атома.

Из табл. 4 следует, что параметры потенциала Морзе, полученные в [3] и [5], заметно отличаются от значений параметров, вычисленных нами. В этих работах, возможно, было использовано недостаточное число атомов в модельной решетке или не было учтено, что параметр M_i квантован, так как определяется выражением $M_i = \sqrt{m_i^2 + n_i^2 + l_i^2}$.

Предлагаемая методика позволяет достаточно легко вычислить параметры потенциала Морзе для ГЦК-металлов, содержащих вакансии в любой из конфигурационных сфер, окружающих атом, выбран-

ный в качестве центрального, что, в свою очередь, предопределяет простой способ расчета энергии миграции вакансий в металлах.

Энергия взаимодействия атомов ГЦК-металлов с вакансиями

В ГЦК-металлах ближайшие 12 атомов, окружающие центральный атом и находящиеся на наименьшем расстоянии от него, образуют первую конфигурационную сферу, следующие 6 атомов — вторую конфигурационную сферу, затем 24 атома — третью, и так далее. На рис. 1 показаны зависимости энергии взаимодействия атомов от номера конфигурационной сферы, содержащей вакансию, в модельной ГЦК решетке, состоящей из 1061 атома.

Из рис. 1 видно, что образование вакансии в первой конфигурационной сфере энергетически выгоднее, поэтому более вероятным является переход атома из одного узла в другой узел первой конфигурационной сферы. Так как в качестве центрального атома может быть выбран любой атом кристалла, и, соответственно, первая конфигурационная сфера также является произвольной, то выявленная закономерность может быть использована для расчета энергии миграции вакансии в ГЦК-решетке.

Расчет энергии миграции вакансий

Расчет энергии миграции вакансии производился по следующей схеме:

- 1) определение параметров потенциала Морзе ГЦК-решетки, содержащей одну вакансию в первой конфигурационной сфере;
- 2) определение E_1 — энергии взаимодействия атома, взятого в качестве центрального, со всеми атомами, релаксированными вокруг вакансии в первой конфигурационной сфере;
- 3) определение параметров потенциала Морзе ГЦК-решетки, содержащей две вакансии в первой

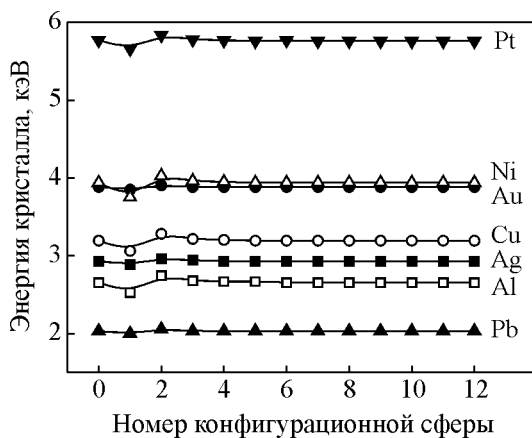


Рис. 1. Зависимость энергии кристалла от нахождения вакансии в одной из 12 конфигурационных сфер ГЦК-решетки металлов.

Сравнение рассчитанных значений E_m^v с известными литературными данными

Металл	Расчетные значения, полученные по предлагаемой схеме, E_m^v , эВ	Расчетные значения, E_m^v , эВ [Литература]	Экспериментальные значения, E_m^v , эВ [2]		
			Метод самодиффузии	Закалка	Закалка и облучение
Ag	0,65	0,88; 0,90 [2]; 1,03 [5]	—	0,66	0,67
Al	1,17	0,66 [5]; 0,775; 0,96 [2]	0,62	0,62 – 0,66	0,58 – 0,62
Au	0,59	0,965; 1,13 [2]; 1,71 [5]	0,85	0,83	0,77 – 0,85
Cu	1,19	0,77 – 1,00 [2]	0,77 – 0,88	0,71 – 1,08	0,67 – 0,72
Ni	1,07	1,04 – 1,25 [2]	—	1,27	—
Pb	0,41	0,44 – 0,61 [2]; 0,76 [5]	0,60	—	0,54
Pt	1,35	1,48; 2,25 [2]; 2,45 [5]	—	1,43	1,36 – 1,46

координационной сфере и атом из этой сферы, смещенный в междоузлье, в которой все атомы срелаксировали вокруг смещенного атома и двух вакансий (вторая вакансия образуется на месте атома, смещенного в междоузлье, и, когда атом, двигаясь далее, занимает вакантный узел, то эта вакансия перемещается на первоначальное место атома);

4) определение E_2 — энергии взаимодействия атома, взятого в качестве центрального, со всеми атомами, релаксированными вокруг смещенного атома и двух вакансий;

5) нахождение энергии миграции вакансии E_m^v как разности энергий E_2 и E_1 :

$$E_m^v = E_2 - E_1.$$

При определении E_2 учитывалось то, что при движении атома из узла первой конфигурационной сферы к вакантному узлу этой сферы и в момент прохождения атомом седловой точки в наличии будут не одна, а две вакансии и один междоузельный атом. Значения энергии миграции вакансии в кристаллической решетке ГЦК-металлов, вычисленные по вышеприведенной схеме, даны в табл. 5. Здесь же показаны результаты, полученные другими авторами.

Из табл. 5 видно, что хорошее согласие вычисленных значений E_m^v с экспериментальными данными наблюдается для всех ГЦК-металлов (используемых в данной работе), кроме Al. Особенно хорошее согласие с экспериментом, по сравнению с результатами других авторов, наблюдается для Ag, Au и Pt. Поэтому есть основание утверждать, что схема вычисления энергии миграции вакансии в ГЦК-металлах, предложенная нами, является достаточно эффективной и очень простой. Что касается Al, то здесь, возможно, есть ограничения на применение потенциала Морзе из-за того, что алюминий может менять валентность.

Здесь есть ряд моментов, на которые следует акцентировать внимание как при вычислениях

параметров потенциала Морзе, так и при нахождении энергии миграции вакансий с помощью этих параметров. Прежде всего, необходимо обязательно указывать число атомов в модельной решетке, использованное при вычислениях, а также физические характеристики металла. Очень трудно установить причину расхождения рассчитанных значений E_m^v , полученных разными авторами, без знания числа атомов и физических свойств металлов, которые были использованы при вычислениях. Еще одной причиной большого расхождения E_m^v , вычисленных разными авторами, может быть то, что при расчетах параметров потенциала Морзе и энергии взаимодействия атомов суммирование по всем атомам не разбивалось на суммирование по конфигурационным сферам. На наш взгляд, такое разбиение намного упрощает использование потенциала Морзе для вычисления E_m^v и повышает точность расчетов.

Заключение

Более строгое и последовательное использование потенциала Морзе позволило рассчитать значения E_m^v в ГЦК-металлах, хорошо согласующиеся с экспериментальными значениями, что дает основание для применения предложенного метода при расчете значений E_m^v металлов, у которых отсутствуют E_m^v , определенные экспериментальным путем.

Расчитанные значения E_m^v в ГЦК-металлах позволяют осуществить выбор экспериментальных значений энергии миграции вакансий, когда эти значения достаточно сильно различаются. К примеру, для Cu предпочтительнее выбрать значение $E_m^v = 1,08$ эВ, чем 0,67 эВ, а в случае Au предпочтительнее значение $E_m^v = 0,77$ эВ.

Литература

- Искаков Б.М., Сулейменова Ж.К., Шамбулов Н.Б. О концентрационных максимумах неравновесных то-

- чечных дефектов в облученной меди с примесью золота. ФММ, 2007, т. 103, № 6, с. 588 – 593.
2. Орлов А.Н., Трушин Ю.В. Энергии точечных дефектов в металлах. М.: Энергоатомиздат, 1983, 80 с.
 3. Girifalco L.A., Weizer V.G. Application of Morse potential function to cubic metals. Phys. Rev., 1959, v. 114, p. 687 – 690.
 4. Morse P. Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels. Phys. Rev., 1929, v. 34, p. 57 – 64.
 5. Wynblatt P. Calculation of the vacancy migration energy in cubic crystals. J. Phys. Chem. Solids., 1968, v. 29, p. 215 – 224.

Искаков Бисембай Мамаевич — Казахский национальный технический университет имени К.И.Сатпаева (Алматы, Казахстан), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области радиационной физики твердого тела. E-mail: iskakovbisen@mail.ru.