Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 538.971

Краткое сообщение

ОЦЕНКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ И ДИСПЕРСИОННОЙ ПОПРАВКИ К ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ГРАНЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

И.Г. Шебзухова¹, Л.П. Арефьева²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

344000, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Irina.Shebzukhova@mail.ru, Ludmilochka529@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.319

Аннотация: На базе электронно-статистического метода получены выражения и рассчитаны дисперсионная и поляризационная поправки к поверхностной энергии граней кристаллов IА металлов на границе с вакуумом. Обе поправки сильно анизотропны. Дисперсионная поправка увеличивает величину поверхностной энергии граней (от 3 до 23%), поляризационная – снижает менее, чем на 1%. Учет данных взаимодействий улучшает согласие результатов расчета поверхностной энергии с экспериментальными данными расплавов.

Ключевые слова: поверхностная энергия, дисперсионное взаимодействие, поляризация ионов, щелочные металлы, электронно-статистический метод.

Исторический аспект развития теории флуктуационных молекулярных сил и их роль во взаимодействии конденсированных сред показаны в [1].

В настоящей работе в рамках электронно-статистической теории поверхностной энергии металлов [2-7] ставилась цель получить выражения поправок к поверхностной энергии (ПЭ) граней металлического кристалла на поляризацию ионов переходного слоя в поле полубесконечного металла и на дисперсионное взаимодействие s –сфер в поверхностном слое. Поправку к ПЭ на поляризацию ионов поверхностного слоя под влиянием электрического поля полубесконечного металла можно оценить через деформационную энергию поляризации ионов в j слое

$$f_{\omega}^p(hkl) = \sum_{j=0}^{\infty} \Delta E_j^p n_j(hkl), \quad (1)$$

где $n_j(hkl)$ – концентрация частиц на грани (hkl) в j слое. Избыточную деформационную энергию поляризации ионов в расчете на элементарный шар (s –сферу) в j слое можно определить как в [8]

$$\Delta E_j^p = -\frac{1}{2}(P_j E_j), \quad (2)$$

где P_j – средний дипольный момент иона на j плоскости переходного слоя, E_j – напряженность поля в этой плоскости. Имея в виду, что $P_j = \alpha E_j$ и подставляя (2) в (1), поправку можно представить в виде:

$$f_{\omega}^p(hkl) = -\frac{\alpha}{2} \sum_{j=0}^{\infty} E_j^2 n(hkl), \quad (3)$$

где α – поляризуемость ионов металла.

Напряженность поля в j плоскости $E_j(x) = E(x_j)$ можно определить как градиент потенциала и записать через безразмерные координату $\beta = x/s^*$ и потенциал $\chi(\beta) = V(x)/V_F$

$$E(x_j) = -\frac{dV(x)}{dx} \Big|_{x=x_j} = \frac{V_F}{s^*} \frac{d\chi_i(\beta)}{d\beta} \Big|_{\beta=\beta_j}, \quad (4)$$

где V_F – потенциал Ферми, $s^* = vs$, s – линейный параметр, приводящий уравнение Томаса-Ферми к безразмерному виду, v – вариационный параметр, минимизирующий ПЭ металла при учете обменной поправки.

Функция $\chi_i(\beta)$ является решением уравнения Томаса-Ферми и определяет ход потенциала и электронной плотности на границе металл-вакуум [2] во внутренней области металла

$$\chi_i(\beta_j) = 1 - \frac{1 - \chi(0)}{(1 - \beta_j/b)^6}. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (3) выражение (4), имея в виду (5) и полагая, что число частиц на единице площади грани (hkl) в j плоскости такое же, как и в плоскости $j=0$ ($n_j(hkl) = n(hkl)$), окончательно выражение поправки к ПЭ грани металлического кристалла на поляризацию поверхностных ионов будет:

$$f_{\omega}^p(hkl) = -0,698 \frac{\alpha V_F^2 (1 - \chi(0))^2}{s^2 v^2} n(hkl) \sum_{j=0}^{\infty} \left(1 - \frac{\beta_j}{b}\right)^{-14}, \quad (6)$$

где $\chi(0)$ – безразмерный потенциал на физической поверхности раздела, $b = 2(125/3)^{1/4}$, $|\beta_j| = \frac{1}{s^*} (j\delta(hkl) + r + x_{\Gamma})$, $\delta(hkl)$ – межплоскостное расстояние, r – радиус иона, x_{Γ} – координата гиббсовой поверхности раздела.

Для расчета влияния дисперсионных сил на ПЭ граней металлического кристалла нами используется метод Е.М. Лифшица [9, 10]. Теория Лифшица позволяет рассчитать молекулярное притяжение конденсированных фаз на основе коллективной модели флуктуаций поля излучения и выразить силу и энергию взаимодействия через макроскопические константы вещества.

Согласно [9, 10], энергия дисперсионного взаимодействия двух однородных бесконечно-протяженных параллельных стенок (в расчете на единицу площади), находящихся на расстоянии H друг от друга (когда $H \leq \lambda_0$, где λ_0 – длина волны наиболее интенсивной линии в их

абсорбционном спектре) выражается формулой

$$W(H) \approx \frac{\hbar}{16\pi^2 H^2} \int_0^\infty \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right)^2 d\varepsilon, \quad (7)$$

где $\varepsilon(i\xi) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon'(\omega)$ – дисперсия диэлектрической проницаемости, $\varepsilon''(\omega)$ – дисперсия диэлектрических потерь.

По соотношению Крамерса-Кронига имеем

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega \varepsilon''(\omega)}{\omega^2 + \xi^2} d\omega. \quad (8)$$

Точный расчет $W(H)$ при $H \ll \lambda$ возможен, если известен абсорбционный спектр вещества. Но для приближенной оценки дисперсионной части адгезии между металлами достаточно воспользоваться классической металлооптикой Друде-Зинера-Кронига, полагая

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{4\pi\eta(\omega)}{\omega} = \frac{4\pi e^2 \rho(\infty)}{m^* \omega} \frac{\alpha_1}{\omega^2 + \alpha_1^2} = \frac{\beta_1}{\omega(\omega^2 + \alpha_1^2)}, \quad (9)$$

где $\rho(\infty)$ – электронная плотность, e и m^* – заряд и эффективная масса электрона, $\alpha_1 = \frac{e^2 \rho(\infty)}{m^* \eta(0)}$, $\beta_1 = 4\pi e^2 \alpha_1 \rho(\infty) / m^*$, $\eta(\omega)$ – электропроводность металла, $\eta(0)$ – электропроводность для постоянного тока. Подставляя (9) в (8), находим

$$\varepsilon = 1 + \frac{\beta_1 / \alpha_1}{\xi(\xi + \alpha_1)}, \quad (10)$$

а затем, имея в виду, что для металлов $\alpha_1^3 / \beta_1 \ll 1$, после интегрирования (7) и замены α_1 и β_1 их значениями окончательно получим:

$$W(H) \approx -\frac{\hbar}{64\sqrt{2}\pi H^2} \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right)^{1/2} = -\frac{\hbar}{64H^2} \left(\frac{2e^2}{\pi m^*} \right)^{1/2} \sqrt{\rho(\infty)}, \quad (11)$$

где $\rho(\infty) = \frac{z}{\Omega} = \frac{3z}{4\pi R^3}$, z – среднее число свободных электронов на атом, R – радиус s -сферы. Кроме сил притяжения следует учесть борновские силы отталкивания вследствие перекрытия s -сфер, которые можно охарактеризовать потенциалом вида $U = B/r^k$.

Энергия суммарного взаимодействия дисперсионных сил притяжения и борновских сил отталкивания в положении равновесия:

$$W(r_0) = W_{gn0}(H_0) \left(1 - \frac{2}{k-n} \right). \quad (12)$$

Влияние отталкивания s -сфер вследствие перекрытия их ионных атмосфер на ПЭ s -металлов незначительно, так как радиус иона

существенно меньше радиуса s – сферы, хотя для других металлов может быть существенным. Определяя поправку к ПЭ дисперсионных сил притяжения и сил отталкивания по формуле Борна

$$f_{\omega}^g = \frac{A_{12}}{2s} = \frac{W(H_0)}{2}, \quad (13)$$

где H_0 – равновесное расстояние между стенками, тогда полагая в соответствие с выбором границы раздела между металлом и вакуумом согласно [2-4] $H_0 = 2R \left(1 - \frac{r+x_{\Gamma}}{R}\right)$, находим для грани (hkl) :

$$f_{\omega}^g(hkl) = \frac{\hbar f}{512R^{7/2}} \left(\frac{A}{ND}\right)^{2/3} \left(\frac{3e^2 z}{2\pi^2 m^*}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r+x_{\Gamma}}{R}\right)^{-2} \left(1 - \frac{2}{k-n}\right) n(hkl), \quad (14)$$

где f – коэффициент упаковки (зависит от структуры металла), A и D – атомный вес и плотность металла, N – число Авогадро, $n=6$, $k=12$.

Подставляя физические константы в выражение (14), находим для дисперсионной поправки к ПЭ грани металлического кристалла расчетную формулу в виде:

$$f_{\omega}^g(hkl) = 12,115 \frac{\hbar f (z/\gamma)^{1/2}}{R^{7/2}} \left(\frac{A}{ND}\right)^{2/3} \left(1 - \frac{r+x_{\Gamma}}{R}\right)^{-2} \left(1 - \frac{2}{k-n}\right) n(hkl), \quad (15)$$

где $\gamma = m^*/m$, m – масса свободного электрона.

Поправки $f_{\omega}^p(hkl)$ и $f_{\omega}^g(hkl)$, рассчитанные по формулам (6) и (15) для щелочных металлов, приведены в Таблице 1. Также даются значения ПЭ и температурного коэффициента ПЭ полученные с учетом этих поправок ($f_{\omega}(hkl)$, $df_{\omega}(hkl)/dT$), средние статистические значения ПЭ, рассчитанные по $f_{\omega}(hkl)$, и температурного коэффициента ПЭ ($\bar{f}_{\omega}$ и $\overline{df_{\omega}(hkl)/dT}$).

Поверхностная энергия рассчитана при температуре плавления как

$$f_{\omega}(hkl) = f_{\omega}^k(hkl) + f_{\omega}^g(hkl) + f_{\omega}^p(hkl) + \Delta f_{\omega}^T(hkl), \quad (16)$$

где $f_{\omega}^k(hkl)$ – значения ПЭ металлов при 0 К, полученные нами [2, 3] в рамках электронно-статистической теории при учете квантовых поправок, $\Delta f_{\omega}^T(hkl)$ – температурный вклад в ПЭ граней металлических кристаллов.

Наши результаты показывают, что дисперсионные взаимодействия вносят заметный вклад в ПЭ металлов, а поляризация ионов в переходном слое незначительно снижает ПЭ. Обе поправки существенно зависят от ориентации кристалла. Так, дисперсионная поправка составляет для разных граней: лития 3–11%, натрия 4–17%, калия 5–20%, рубидия 6–22%, цезия 6–23% от ПЭ, а поляризационная – 0,06–0,79%. Температурный вклад в ПЭ для разных граней этих металлов составляет ~8–15%. Учет дисперсионного взаимодействия атомов и поляризации

ионов значительно улучшает согласие вычисленных значений ПЭ и температурного коэффициента с экспериментальными данными расплавов [11].

Таблица 1. Дисперсионная и поляризационная поправки к ПЭ (мДж/м²) и температурному коэффициенту ПЭ (мДж/(м²К)) граней щелочных металлов.

Металл	hkl	$f_{\omega}^k(hkl)$	$f_{\omega}^g(hkl)$	$-f_{\omega}^p(hkl)$	$f_{\omega}^0(hkl)$	$-\frac{df_{\omega}^k(hkl)}{dT}$	$-\frac{df_{\omega}^g}{dT}$	$f_{\omega}(hkl)$	$\bar{f}_{\omega}$
$\alpha - Li$	100	495,5	31,8	0,60	526,7	0,118	0,112	473,2	463
	110	397,2	44,9	0,84	441,3	0,108		392,4	
	111	593,3	18,3	0,36	661,2	0,113		559,9	
$\alpha - Na$	100	252,9	23,8	1,13	275,6	0,077	0,071	247,0	244
	110	197,0	33,7	1,58	229,1	0,070		203,1	
	111	314,5	13,7	0,67	327,5	0,067		302,4	
K	100	113,7	12,5	0,49	125,7	0,043	0,042	111,2	109
	110	83,7	17,6	0,69	100,6	0,038		87,6	
	111	147,2	7,2	0,29	154,1	0,048		137,9	
Rb	100	92,9	11,4	0,34	104,0	0,038	0,037	92,1	90
	110	67,6	16,2	0,48	83,3	0,034		72,7	
	111	119,3	6,6	0,20	125,7	0,041		13,0	
Cs	100	71,1	9,4	0,28	80,2	0,031	0,031	70,8	70
	110	52,1	13,3	0,40	65,0	0,029		56,4	
	111	94,2	5,5	0,17	99,5	0,015		88,9	

Библиографический список:

1. **Кац, Е.И.** Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи / Е.И. Кац // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – Вып. 9. С. 964-969. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201509g.0964.
2. **Задумкин, С.Н.** Новый вариант статистической электронной теории поверхностного натяжения металлов / С.Н. Задумкин // Физика металлов и металловедение. – 1961. – Т. 11. – № 3. – С. 331-346.
3. **Задумкин, С.Н.** Приближенная оценка ориентационной зависимости поверхностной энергии и поверхностного натяжения металлического кристалла / С.Н. Задумкин, И.Г. Шебзухова // Физика металлов и металловедение. – 1969. – Т. 28. – № 3. С. 434-439.
4. **Шебзухова, И.Г.** Анизотропия, температурный и барический коэффициенты поверхностной энергии полиморфных фаз щелочных металлов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева, Х.Б. Хоконов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2008. – № 3. – С. 54-58.
5. **Шебзухова, И.Г.** О температурной зависимости поверхностной энергии граней кристаллов актинидов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева, Х.Б. Хоконов // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – № 12. – С. 2400-2403.
6. **Арефьева, Л.П.** Межфазная энергия на границе металлический кристалл-расплав /

- Л.П. Арефьева, И.Г. Шебзухова // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60. – Вып. 7. – С. 1270-1276. DOI: 10.21883/FTT.2018.07.46108.010.
7. **Шебзухова, И.Г.** Анизотропия поверхностной энергии и работы выхода электрона ИВ металлов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 2. – С. 306-309. DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47087.188-18.
8. **Задумкин, С.Н.** Влияние дисперсионного взаимодействия s -сфер и поляризации ионов на поверхностную энергию металлов / С.Н. Задумкин, И.Г. Шебзухова, Р.М. Дигилов // В кн.: Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 32-36.
9. **Лифшиц, Е.М.** Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами / Е.М. Лифшиц // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1956. – Т. 29. – Вып. 1. – С. 94-110.
10. **Дзялошинский, И.Н.** Общая теория ван-дер-ваальсовых сил / И.Н. Дзялошинский, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 73. – Вып. 3. – С. 381-422. DOI: 10.3367/UFNr.0073.196103b.0381.
11. **Alchagirov, A.B.** Surface energy and surface tension of solid and liquid metals: Recommended values / A.B. Alchagirov, B.B. Alchagirov, T.M. Taova, Kh.B. Khokonov // Transactions of Joining and Welding Research Institute Osaka University. – 2001. – V. 30. – Special Issue. – P. 287-291.

References:

1. **Kats, E.I.** Van der Waals, Casimir, and Lifshitz forces in soft matter / E.I. Kats // Physics-Uspekhi. – 2015. – V. 58. – I. 9. – P. 892-896. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201509g.0964.
2. **Zadumkin, S.N.** Novyi variant statisticheskoi ehlektronnoi teorii poverkhnostnogo natyazheniya metallov [A new version of the statistical electronic theory of surface tension of metals] / S.N. Zadumkin // The Physics of Metals and Metallography. – 1961. – V. 11. – № 3. – P. 331-346. (In Russian).
3. **Zadumkin, S.N.** Priblizhennaya otsenka orientatsionnoi zavisimosti poverkhnostnoi ehnergii i poverkhnostnogo natyazheniya metallichesкого kristalla [An approximate estimate of the orientational dependence of the surface energy and surface tension of a metal crystal] / S.N. Zadumkin, I.G. Shebzukhova // The Physics of Metals and Metallography. – 1969. – V. 28. – № 3. – P. 434-439. (In Russian).
4. **Shebzukhova, I.G.** Anizotropiya, temperaturnyi i baricheskii koehffitsienty poverkhnostnoi ehnergii polimorfnykh faz shchelochnykh metallov [Anisotropy, temperature and pressure coefficients of the surface energy of polymorphic phases of alkali metals] / I.G. Shebzukhova, L.P. Aref'eva, Kh.B. Khokonov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki. – 2008. – № 3. – P. 54-58. (In Russian).
5. **Shebzukhova, I.G.** On the temperature dependence of the surface energy of actinide crystal faces / I.G. Shebzukhova, L.P. Aref'eva, Kh.B. Khokonov // Physics of the Solid State. 2009. – V. 51. – I. 12. – P. 2553-2556. DOI: 10.1134/S1063783409120191.
6. **Aref'eva, L.P.** Interfacial free energy at the metallic crystal–melt interface / L.P. Aref'eva, I.G. Shebzukhova // Physics of the Solid State. – 2018. – V. 60. – I. 7. – P. 1273-1279. DOI: 10.1134/S1063783418070041.
7. **Shebzukhova, I.G.** Anisotropy of the surface energy and work function of IIB metals / I.G. Shebzukhova, L.P. Aref'eva // Technical Physics. – 2019. – V. 64. – I. 2. – P. 274-277. DOI: 10.1134/S1063784219020208.
8. **Zadumkin, S.N.** Vliyanie dispersionnogo vzaimodeistviya s -sfer i polyarizatsii ionov na

poverkhnostnyu ehnergiyu metallov [Influence of the dispersive interaction of s – spheres and ion polarization on the surface energy of metals] / S.N. Zadumkin, I.G. Shebzukhova, R.M. Digilov // In book: Fizicheskaya khimiya poverkhnostnykh yavlenii v rasplavakh [Physical chemistry of surface phenomena in melts]. – Kiev: Naukova dumka, 1971. – P. 32-36. (In Russian).

9. **Lifshits, E.M.** The theory of molecular attractive forces between solids / E.M. Lifshits // Soviet Physics. – 1956. – V. 2. – № 1. – P. 73-83.

10. **Dzyaloshinskii, I.N.** General theory of van der Waals' forces / I.E. Dzyaloshinskii, E.M. Lifshitz, L.P. Pitaevskii // Soviet Physics Uspekhi. – 1961. – V. 4. – № 2. – P. 153-176. DOI: 10.1070/PU1961v004n02ABEH003330.

11. **Alchagirov, A.B.** Surface energy and surface tension of solid and liquid metals: Recommended values / A.B. Alchagirov, B.B. Alchagirov, T.M. Taova, Kh.B. Khokonov // Transactions of Joining and Welding Research Institute Osaka University. – 2001. – V. 30. – Special Issue. – P. 287-291.

Short Communication

ESTIMATION OF THE POLARIZATION AND DISPERSION CORRECTIONS TO THE SURFACE ENERGY OF THE FACES OF METAL CRYSTALS

I.G. Shebzukhova¹, L.P. Arefeva²

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.319

Abstract: On the basis of the electronic statistical method, expressions for the dispersion and polarization corrections to the surface energy of the crystal faces $1A$ of metals at the boundary with vacuum are obtained and their value are calculated. Both corrections are highly anisotropic. The dispersion correction increases the surface energies of the faces (from 3 to 23%), the polarization correction reduces them by less than 1%. Taking into account these interactions improves the agreement between the calculated surface energy and the experimental data of the melts.

Keywords: surface energy, dispersion interaction, ion polarization, alkali metals, electronic statistical method.

Шебзухова Ирина Гусейновна – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики ФБГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Арефьева Людмила Павловна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Irina G. Shebzukhova – Dr. Sc., Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Ludmila P. Arefeva – Ph. D., Docent, Department of Physical and Applied Material Science, Don State Technical University

Поступила в редакцию/received: 15.08.2020; после рецензирования/revised: 5.09.2020; принята/accepted 15.09.2020.