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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

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 Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей 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. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 539.211 : 532.61

РАЗМЕР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ КАК ФАКТОР ИХ СТАБИЛЬНОСТИ

Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Тверь, Садовый пер., 35
nsdobnyakov@mail.ru, samsonoff@inbox.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.576

Аннотация: С использованием экспериментальных данных по скоростям испарения металлических наночастиц и усадки вакансионных пор проведены оценки размерных интервалов наночастиц, в которых справедливо линейное соотношение $\sigma = KR$ между поверхностным натяжением σ и радиусом частицы R . Определены доверительные интервалы ΔK для коэффициента пропорциональности K . Полученные результаты сопоставлены с оценками Э.Н. Витоля (1992). На основе результатов этих оценок подтверждён сделанный ранее вывод о том, что условие термодинамической стабильности выполняется для наночастиц всех рассмотренных металлов.

Ключевые слова: наночастицы металлов, формула Русанова, стабильность, испарение наночастиц, усадка вакансионных пор.

1. Введение

Проблема стабильности наночастиц и наносистем, включая наноструктурированные материалы, занимает в нанонауке и нанотехнологии одно из центральных мест. В частности согласно [1, 2], металлические нанокластеры как правило являются нестабильными, и их стабилизируют лигандами. Например, поликристаллический никель с наноразмерными зёрнами является нестабильным, и для его стабилизации применяется допирование медью, атомы которой сегрегируют к границам зёрен [3]. Применительно к бинарным наночастицам в [4] было введено понятие энергетической стабильности. Имеется в виду, что по энергии частицы можно судить о том, будет ли энергетически выгодным смешение компонентов или их пространственное разделение. Большое внимание проблеме стабильности наносистем и наноматериалов уделял Р.А. Андриевский. В [5] он вводит понятие термической стабильности, радиационной стабильности, деформационной и коррозионной стабильности. Термической стабильности посвящены его обзоры [6, 7]. Несмотря на важность проблемы стабильности наночастиц и наноматериалов, к настоящему времени отсутствует даже классификация проявлений стабильности/нестабильности наночастиц и наносистем. В [5-7] был сделан шаг в этом направлении, и эта классификация отвечает различным внешним воздействиям на наночастицы и наносистемы: термическому, радиационному, механическому и химическому. Однако при этом опускается одно очень важное обстоятельство: спонтанная стабильность/нестабильность малых объектов должна зависеть от их размера. Поскольку поверхностное натяжение должно уменьшаться с

уменьшением размера частиц [8, 9], можно ожидать, что степень стабильности наночастиц должна уменьшаться с уменьшением их размера. Действительно, если бы поверхностное натяжение было бы отрицательным, то малые капли были бы абсолютно нестабильными: их поверхность должна была бы возрасти (нестабильность формы), что, в свою очередь привело бы к распаду капли. Таким образом, уменьшение величины положительного поверхностного натяжения также должно выступать в роли фактора, способствующего дестабилизации наночастиц, а отмеченные выше внешние факторы могут усиливать тенденции к спонтанному распаду.

В наших предыдущих работах [10, 11] был развит термодинамический подход к проблеме стабильности наночастиц, основывающийся на рассмотрении изотермической вариации δF энергии Гельмгольца частицы. Основная идея этого подхода сводится к тому, что нестабильность может быть вызвана флуктуациями объема частицы, которым препятствует эффект поверхностного натяжения.

Согласно А.И. Русанову [8], для малых частиц поверхностное натяжение σ пропорционально радиусу частицы R :

$$\sigma = KR, \quad (1)$$

где K – коэффициент пропорциональности. К настоящему времени прямые экспериментальные данные для параметра K отсутствуют, а косвенные, рассчитанные по скорости испарения наночастиц и скорости усадки вакансионных пор [12], являются не вполне достоверными. В свою очередь, недостаточная достоверность данных для параметра K не позволяет сделать надежные заключения о стабильности/нестабильности соответствующих наночастиц. Данную работу можно рассматривать как шаг в решении данной проблемы.

2. Метод исследования

Как уже отмечалось ранее, один из способов оценки параметра K отвечает использованию представленного в [13, 14] соотношения для скорости испарения наночастиц dR/dt (t – время испарения):

$$K = \left(\frac{k_B T}{2V_r} \right) \ln \left(\frac{(2\pi k_B T m)^{1/2} \left[\frac{dR}{dt} \right]}{\alpha P V_r} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент испарения ($\alpha = 1$ для жидкости и $\alpha \in (0, 2; 1, 0)$ для твердого тела), m – масса атома, k_B – постоянная Больцмана, P – давление насыщенного пара над плоской поверхностью испарения при температуре T , V_r – атомный объем в микрочастице, который в дальнейшем полагается равным атомному объему в массивном образце. Уже тот факт, что для твердого тела коэффициент испарения α изменяется в широком диапазоне,

говорит о том, что для корректного расчета параметра K следует исходить из интервала значений α . В работе [13] утверждается, что, например, для наночастиц золота в твердом состоянии можно принять $\alpha = 0,5$. Однако данные, представленные в [13], свидетельствуют о существенном разбросе значений α в исследуемом температурном интервале. Важным управляющим параметром также является давление насыщенного пара P . Для металлов экспериментальные данные по давлению насыщенного пара существенно различаются. Одним из слабых мест расчетов Витоля [12] является допущение о равенстве атомных объемов в твердом и жидком состояниях ($V_s = V_l$). Наши оценки показывают, что при температуре плавления относительная разность объемов $(V_l - V_s)/V_l$ составляет 2–5 %. При температурах отличных от температуры фазового перехода различие может быть еще более существенным. Альтернативный способ оценки параметра K отвечает использованию представленного в [15, 16] соотношения для скорости усадки вакансионных пор dR/dt , из которого следует

$$K = \left(\frac{k_B T}{2V_r} \right) \ln \left(1 - \frac{r}{D} \left[\frac{dR}{dt} \right] \right). \quad (3)$$

Здесь D – коэффициент самодиффузии.

3. Результаты и обсуждение

Результаты оценок параметра K для наночастиц серебра, алюминия и свинца приведены в работах [17, 18], золота и меди в [19]. В данной работе мы проведем рассмотрение этих результатов с точки зрения оценки доверительных интервалов для параметра K и оценки характерного значения радиуса наночастиц, при котором линейная формула (1) выполняется. В Таблице 1 представлены результаты расчетов размера наночастиц R_{ch} , отвечающего переходу от формулы Русанова (1) к макроскопическому значению. Для результатов [12] представлено лишь одно значение, в нашем случае речь идет о диапазоне значений размеров, поскольку в [17-19] определялся диапазон значений параметра K при изменении управляющих параметров (давление насыщенного пара над плоской поверхностью испарения при заданной температуре, коэффициент испарения для твердых металлов, коэффициент самодиффузии). Кроме того, определены приведенные характерные значения размеров наночастиц $R_{ch}^* = R_{ch} / a$, где a – эффективный диаметр атома [20] и число частиц N_{min} , отвечающее наименьшему из рассматриваемых значений R_{ch} . Для определения абсолютного значения изменения параметра в формуле Русанова ΔK мы использовали следующее соотношение

$$\Delta K = \frac{\sigma_{\infty}}{(R_{ch})^2} \Delta R_{ch}, \quad (4)$$

где σ_{∞} – поверхностное натяжение, отвечающее макроскопическому значению (значения взяты из [17-19], а также использованы данные [21, 22]). При оценке ΔR_{ch} мы исходили из того, что уменьшение поверхностного натяжения составляет не более 5–10%, использовалось минимальное значение R_{ch} из диапазона. Таким образом, если для определения абсолютного значения изменения параметра ΔK использовать соотношение вида

$$\Delta K / K = \Delta \sigma / \sigma + \Delta R_{ch} / R_{ch}, \quad (5)$$

то вклад первого слагаемого не может превышать 5–10%, т.е. использование соотношения (4) для оценки является приемлемым.

Таблица 1. Оценка характерных значений, отвечающих использованию формулы (4)

Вещество	R_{ch} , нм		R_{ch}^*		N_{min}	$\Delta K \cdot 10^{10}$ мДж/м ³	
	настоящая работа	по данным [12]	настоящая работа	по данным [12]		настоящая работа	по данным [12]
<i>Au(s)</i>	0,86-5,25	3,38	18	12	146	53,2	3,4
<i>Au(l)</i>	0,71-19,86	3,87	69	13	78	65,1	2,2
<i>Ag(s)</i>	0,84-11,47	3,79	40	13	146	50,9	2,5
<i>Cu(s)</i>	5,52-21,61	3,92	84	15	59604	2,9	6,5
<i>Al(s)</i>	0,71-51,82	4,60	181	16	90	64,9	1,5
<i>Pb(s)</i>	3,51-8,96	3,75	26	11	5975	2,5	2,2

Воспользовавшись критерием устойчивости, полученным в [10], можно определить характерные значения параметра K_{ch} , отвечающие границе устойчивости (см. результаты в Таблице 2).

Таблица 2. К оценке критерия устойчивости

Вещество	$K_{ch} \cdot 10^{10}$ мДж/м ³	$K_{max} \cdot 10^{10}$ мДж/м ³
<i>Au(s)</i>	1724	157,9
<i>Au(l)</i>	840	160,0
<i>Ag(s)</i>	1010	148,6
<i>Cu(s)</i>	1370	31,7
<i>Al(s)</i>	793	160,8
<i>Pb(s)</i>	424	22,2

Для расчета характерного значения использовались данные по сжимаемости для наночастиц золота, серебра и меди из [10], для нанокapель золота данные [23], для наночастиц свинца данные [24].

Значение K_{max} , отвечает максимальному расчетному значению, полученному с использованием различных экспериментальных данных по давлению насыщенного пара над плоской поверхностью испарения при заданной температуре, коэффициенту испарения для твердых металлов, коэффициенту самодиффузии. Видно, что во всех случаях $K_{max} < K_{ch}$, т.е. полученное ранее условие стабильности $K < K_{ch}$ [10, 11, 17] должно выполняться для всех рассмотренных выше металлических наночастиц.

4. Заключение

Таким образом, сравнивая данные, представленные в Таблице 2, можно утверждать, что для металлических нанокластеров лишь создание экстремальных условий может спровоцировать распад наночастицы при флуктуациях объема, но с уменьшением размера рассматриваемых нанокластеров диапазон изменения параметра в формуле Русанова ΔK , может также увеличиваться, что требует внимательного отношения при проверке критерия устойчивости [10], например, при технологическом использовании наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-03-00132 а) и Минобрнауки Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 3.5506.2017/БЧ).

Библиографический список:

1. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 412 с.
2. **Суздалев, И.П.** Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздалев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
3. **Pellicer, E.** Grain boundary segregation and interdiffusion effects in nickel-copper alloys: an effective means to improve the thermal stability of nanocrystalline nickel / E. Pellicer, A. Varea, K.M. Sivaraman, et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2011. – V. 3. – I. 7. – P. 2265-2274.
4. **Ferrando, R.** Nanoalloys: From theory to applications of alloy clusters and nanoparticles / R. Ferrando, J. Jellinek, R.L. Johnston // Chemical Reviews. – 2008. – V. 108. – I. 3. – P. 845-910.
5. **Андриевский, Р.А.** Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы / Р.А. Андриевский. – 3-е изд. (эл.). – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 255 с.
6. **Андриевский, Р.А.** Термическая стабильность наноматериалов / Р.А. Андриевский // Успехи химии. – 2002. – Т. 71. – Вып. 10. – С. 967-981.
7. **Андриевский, Р.А.** Термическая стабильность консолидированных металлических наноматериалов / Р.А. Андриевский // Успехи химии. – 2014. – Т. 83. – Вып. 4. – С. 365-375.
8. **Русанов, А.И.** Термодинамика поверхностных явлений / А.И. Русанов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1960. – 181 с.

9. **Samsonov, V.M.** Surface tension in small droplets and nanocrystals / V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, N.Yu. Sdobnyakov // Journal of Physical Chemistry. – 2003. – V. 77. – Suppl. 1. – P. 158-161.
10. **Samsonov, V.M.** A thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // Central European Journal of Physics. – 2003. – V. 1. – I. 2. – P.344-354.
11. **Samsonov, V.M.** On thermodynamic stability conditions for nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.N. Bazulev // Surface Science. – 2003. – V. 532-535. – P. 526-530.
12. **Витоль, Э.Н.** Определение зависимости поверхностного натяжения металлов от кривизны поверхности раздела фаз / Э.Н. Витоль // Коллоидный журнал. – 1992. – Т. 54. – № 3. – С. 21-22.
13. **Sambles, J.R.** An electron microscope study of evaporating gold particles: Kelvin equation for liquid gold and the lowering of melting point of solid gold particles / J.R. Sambles // Proceedings of The Royal Society A. – 1971. – V. 324. – P. 339-351.
14. **Sambles, J.R.** An electron microscope study of evaporating small particles: Kelvin equation for liquid lead and the mean surface energy of solid silver / J.R. Sambles, L.M. Skinner, N.D. Lisgarten // Proceedings of The Royal Society A. – 1970. – V. 318. – P. 507-522.
15. **Westmacott, K.H.** The annealing of voids in quenched aluminium and the determination of the surface energy / K.H. Westmacott, R.E. Smallman, P.S. Dobson // Metals Science Journal. – 1968. – V. 2. – № 1. – P. 177-181.
16. **Edington, J.W.** Smallman Faulted dislocation loops in quenched aluminium / J.W. Edington, R.E. Smallman // Philosophical Magazine. – 1965. – V. 11. – I. 114. – P. 1109-1123.
17. **Сдобняков, Н.Ю.** Оценка критерия термодинамической стабильности металлических наночастиц с использованием доверительных интервалов для коэффициента пропорциональности в формуле Русанова для поверхностного натяжения / Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев и др. // Вестник Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого. Серия Технические науки. – 2017. – № 5 (103). – С. 43-48.
18. **Сдобняков, Н.Ю.** Оценка коэффициента пропорциональности в формуле Русанова для поверхностного натяжения по кинетике испарения наночастиц и усадки вакансионных пор / Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев, Д.А. Новожилова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 337-344.
19. **Сдобняков, Н.Ю.** Оценка коэффициента пропорциональности в формуле Русанова для поверхностного натяжения по кинетике испарения наночастиц и усадки вакансионных пор / Н.Ю. Сдобняков, В.М. Самсонов, А.Н. Базулев, Д.А. Новожилова // Известия РАН. Серия физическая. – 2017. – Т. 81. – № 3. – С. 409-411.
20. **Гордон, А.** Спутник химика. Физико-химические свойства, методики, библиография / А. Гордон, Р. Форд. – М.: Мир, 1976. – 541 с.
21. **Хоконов, Х.Б.** Поверхностные явления в расплавах и возникающих в них твердых фазах / Х.Б. Хоконов // В кн.: Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. – Кишинев: Штиинца, 1974. – С. 190-261.
22. **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 // Transitions JWRI. – 2001. – V. 30. – P. 287-291.

23. **Marcus, Y.** On the compressibility of liquid metals / Y. Marcus // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. – 2016. – V. 109. – P. 11-15.
24. Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

References:

1. **Gusev, A.I.** Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii / A.I. Gusev. – М.: Fizmatlit, 2005. – 412 p.
2. **Suzdalev, I.P.** Nanotekhnologiya: fiziko-himiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov / I.P. Suzdalev. – М.: KomKniga, 2006. – 592 p.
3. **Pellicer, E.** Grain boundary segregation and interdiffusion effects in nickel-copper alloys: an effective means to improve the thermal stability of nanocrystalline nickel / E. Pellicer, A. Varea, K.M. Sivaraman, et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2011. – V. 3. – I. 7. – P. 2265-2274.
4. **Ferrando, R.** Nanoalloys: From theory to applications of alloy clusters and nanoparticles / R. Ferrando, J. Jellinek, R.L. Johnston // *Chemical Reviews*. – 2008. – V. 108. – I. 3. – P. 845-910.
5. **Andrievskiy, R.A.** Osnovy nanostrukturnogo materialovedeniya. Vozmozhnosti i problemy / R.A. Andrievskiy. – 3-e izd. (el.). – М.: Laboratoriya znaniy, 2017. – 255 p.
6. **Andrievskiy, R.A.** Termicheskaya stabil'nost' nanomaterialov / R.A. Andrievskiy // *Uspekhi himii*. – 2002. – V. 71. – I. 10. – P. 967-981.
7. **Andrievskiy, R.A.** Termicheskaya stabil'nost' konsolidirovannykh metallicheskih nanomaterialov / R.A. Andrievskiy // *Uspekhi himii*. – 2014. – V. 83. – I. 4. – P. 365-375.
8. **Rusanov, A.I.** Termodinamika poverhnostnykh yavlenij / A.I. Rusanov. – L.: Izd-vo LGU, 1960. – 181 p.
9. **Samsonov, V.M.** Surface tension in small droplets and nanocrystals / V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, N.Yu. Sdobnyakov // *Journal of Physical Chemistry*. – 2003. – V. 77. – Suppl. 1. – P. 158-161.
10. **Samsonov, V.M.** A thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // *Central European Journal of Physics*. – 2003. – V. 1. – I. 2. – P.344-354.
11. **Samsonov, V.M.** On thermodynamic stability conditions for nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.N. Bazulev // *Surface Science*. – 2003. – V. 532-535. – P. 526-530.
12. **Vitol', E.N.** Opredelenie zavisimosti poverhnostnogo natyazheniya metallov ot krivizny poverhnosti razdela faz / E.N. Vitol' // *Kolloidnyy zhurnal*. – 1992. – V. 54. – no 3. – P. 21-22.
13. **Sambles, J.R.** An electron microscope study of evaporating gold particles: Kelvin equation for liquid gold and the lowering of melting point of solid gold particles / J.R. Sambles // *Proceedings of The Royal Society A*. – 1971. – V. 324. – P. 339-351.
14. **Sambles, J.R.** An electron microscope study of evaporating small particles: Kelvin equation for liquid lead and the mean surface energy of solid silver / J.R. Sambles, L.M. Skinner, N.D. Liggarten // *Proceedings of The Royal Society A*. – 1970. – V. 318. – P. 507-522.
15. **Westmacott, K.H.** The annealing of voids in quenched aluminium and the determination of the surface energy / K.H. Westmacott, R.E. Smallman, P.S. Dobson // *Metals Science Journal*. – 1968. – V. 2. – № 1. – P. 177-181.
16. **Edington, J.W.** Smallman Faulted dislocation loops in quenched aluminium / J.W. Edington, R.E. Smallman // *Philosophical Magazine*. – 1965. – V. 11. – I. 114.

– P. 1109-1123.

17. **Sdobnyakov, N.Yu.** Ocenka kriteriya termodinamicheskoy stabil'nosti metallicheskih nanochastic s ispol'zovaniem doveritel'nyh intervalov dlya koefficienta proporcional'nosti v formule Rusanova dlya poverhnostnogo natyazheniya / N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev i dr. // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yaroslava Mudrogo. Seriya Tekhnicheskie nauki. – 2017. – no. 5 (103). – P. 43-48.

18. **Sdobnyakov, N.Yu.** Ocenka koefficienta proporcional'nosti v formule Rusanova dlya poverhnostnogo natyazheniya po kinetike ispareniya nanochastic i usadki vakansionnyh por / N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, D.A. Novozhilova // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2016. – I. 8. – P. 337-344.

19. **Sdobnyakov, N.Yu.** Ocenka koefficienta proporcional'nosti v formule Rusanova dlya poverhnostnogo natyazheniya po kinetike ispareniya nanochastic i usadki vakansionnyh por / N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev, D.A. Novozhilova // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2017. – V. 81. – no 3. – P. 409-411.

20. **Gordon, A.** Sputnik himika. Fiziko-himicheskie svoystva, metodiki, bibliografiya / A. Gordon, R. Ford. – M.: Mir, 1976. – 541 p.

21. **Khokonov, Kh.B.** Poverhnostnye yavleniya v rasplavah i voznikayushchih v nih tverdyh fazah / Kh.B. Khokonov // V kn.: Poverhnostnye yavleniya v rasplavah i voznikayushchih iz nih tverdyh fazah. – Kishinev: Shtiinca, 1974. – P. 190-261.

22. **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 // Transitions JWRI. – 2001. – V. 30. – P. 287-291.

23. **Marcus, Y.** On the compressibility of liquid metals / Y. Marcus // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2016. – V. 109. – P. 11-15.

24. Fizicheskie velichiny. Spravochnik / pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejliхова. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p.

SIZE OF METAL NANOPARTICLES AS A FACTOR OF THEIR STABILITY

N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev

Tver State University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.576

Abstract: Using available experimental data on evaporation rates for metal nanoparticles and shrinkage rates for vacancy pores, evaluations have been performed of the particle size ranges where the linear dependence $\sigma = Kr$ between the surface tension σ and the particle radius r . The reliability intervals have been found for the proportionality coefficient K . The results obtained are compared to evaluations by E.N. Vitol (1992). On the bases of the results of these evaluations a conclusion has been confirmed that a thermodynamic stability condition obtained before is fulfilled for nanoparticles of all metals considered in the paper.

Keywords: *metal nanoparticles, Rusanov's formula, stability, evaporation of nanoparticles, shrinkage of vacancy pores.*

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Самсонов Владимир Михайлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Базулев Анатолий Николаевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent of General Physics Department, Tver State University

Vladimir M. Samsonov – Dr. Sc., Full Professor of General Physics Department, Tver State University

Anatolii N. Bazulev – Ph. D., Docent of General Physics Department, Tver State University