

**ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**PROCEEDINGS OF THE
KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY**

ТОМ IX, № 4, 2019

Учредитель: Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ)

Главный редактор **Б.С. КАРАМУРЗОВ**
Первый зам. главного редактора **А.П. САВИНЦЕВ**
Зам. главного редактора **Х.Б. ХОКОНОВ**
Зам. главного редактора **А.А. ШЕБЗУХОВ**
Зам. главного редактора **Г.Б. ШУСТОВ**
Зам. главного редактора **М.Х. ШХАНУКОВ-ЛАФИШЕВ**
Ответственный секретарь **И.В. ДОЛБИН**

Редакционная коллегия

Берлин А.А., Гуфан Ю.М., Заиков Г.Е., Киреев В.В., Кушхов Х.Б., Лучинин В.В., Мазуров В.Д.,
Махнев А.А., Радченко В.П., Рубаков В.А., Тешев Р.Ш., Фортвов В.Е., Хохлов А.Р.

Свидетельство Роскомнадзора о регистрации СМИ *ПИ № ФС 77-76623 от 15.08.2019 г.*
Подписной индекс в Каталоге «Пресса России» ф 43720.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Доступ к рефератам статей журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Адрес редакции: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова.

Телефоны: (88662) 722313
E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Авторы, 2019
© Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова, 2019

Founder: Kabardino-Balkarian State University (KBSU)

Editor in chief **B.S. KARAMURZOV**
The 1st Deputy Editor **A.P. SAVINTSEV**
Deputy Editor **H.B. KHOKONOV**
Deputy Editor **A.A. SHEBZUHOV**
Deputy Editor **G.B. SHUSTOV**
Deputy Editor **M. H. SHKHANUKOV-LAFISHEV**
Executive sekretary **I.V. DOLBIN**

Editorial board

Berlin A.A., Gufan Yu.M., Zaikov G.E., Kireev V.V., Kushkhov H.B., Luchinin V.V., Mazurov V.D.,
Makhnev A.A., Radchenko V.P., Rubakov V.A., Teshev R.Sh., Fortov V.E., Khokhlov A.R.

Registration certificate Roskomnadzora *PI № FS 77-76623* from 15.08.2019
Subscription index in the catalog «Russian Press» F 43720
Access to abstracts of articles of the magazine is carried out on the Scientific Electronic Library Online «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Editorial address: Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevsky st., 173, Nalchik, 360004

Phone number: (88662)722313
E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Authors, 2019
© Kabardino-Balkarian State University, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА МАТЕРИАЛЫ

9-го Международного междисциплинарного симпозиума

«Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы»

Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Богданов С.С., Соколов Д.Н., Колосов А.Ю., Акимова Ю.Н. Выбор оптимального потенциала для моделирования плавления и кристаллизации наночастиц никеля	5
Старцев Ю.К. Новые приемы синтеза стекол как следствие изучения процессов фазового разделения в оксидных расплавах	10
Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Давыденкова Е.М., Антонов А.С., Комаров П.В., Ершов П.М. О структурных превращениях в наночастицах титан–алюминий	13
Сергеев И.Н., Хоконов А.Х., Ахматов З.А. Капиллярные свойства эвтектических сплавов галлия в различных средах при магнитных и электростатических воздействиях	17
Жазаева Е.М., Шадов З.О., Тхакахов Р.Б. Структурирование смесей на основе кристаллизующихся полимеров под действием термообработки	26
Старцев Ю.К. От исследования химической стойкости стекла в XX веке к широкому применению биоситаллов в текущем столетии	30
Бориев А.А., Пшихачев А.Г., Тхакахов Р.Б. Особенности динамических и механических свойств модифицированного полиэтилена низкой плотности	34
Алчагиров Б.Б., Кясова О.Х., Дадашев Р.Х., Калажиков Х.Х., Хибиев А.Х., Элимханов Д.З. Поверхностное натяжение жидкого галлия в атмосфере азота	39
Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Тамаев Т.Х., Хотова Л.В. Влияние щелочных добавок на фазообразование и кинетику в бинарных металлических системах на примере Sn–Pb, In–Zn и Sn–Zn, используемых в электронике	45
Кузамишев А.Г., Бжихатлов К.Ч., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Размерная зависимость поверхностного натяжения наночастиц	50
Кузамишев А.Г., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Влияние размера на термическое расширение наночастиц	57
ИСТОРИЯ	
Губжиков М.Н. Антропология советскости через призму музейных источников	64
Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»	77

CONTENTS

PHYSICS

MATERIALS

9th International Interdisciplinary Symposium

«Physics of surface phenomena, interphase boundaries and phase transitions»

Sdobnyakov N.Yu., Myasnichenko V.S., Bogdanov S.S., Sokolov D.N., Kolosov A.Yu., Akimova Yu.N. Selection of optimal potential for modeling melting and crystallization of nickel nanoparticles	5
Startsev Yu.K. New methods of glass synthesis as a result of study of phase separation processes in oxide melts	10
Sdobnyakov N.Yu., Myasnichenko V.S., Davydenkova E.M., Antonov A.S., Komarov P.V., Ershov P.M. About structural transformations in titanium-containing nanoparticles	13
Sergeev I.N., Khokonov A.Kh., Akhmatov Z.A. Capillary properties of eutectic gallium alloys in various media under magnetic and electrostatic influences	17
Zhazaeva E.M., Shadov Z.O., Tkhakakhov R.B. The structuring of the mixtures on the basis of crystallizable polymers under the influence of heat treatment	26
Startsev Yu.K. From research of glass chemical resistance in xx century to widespread using of bioglass-ceramics for nowadays	30
Boriev A.A., Pshihachev A.G., Tkhakakhov R.B. Features of dynamic and mechanical properties of modified low density polyethylene	34
Alchagirov B.B., Kysova O.Kh., Dadashev R.Kh., Kalazhokov Kh.Kh., Khibiev A.Kh., Elimkhanova D.Z. Surface tension of liquid gallium in a nitrogen atmosphere	39
Akhkubekov A.A., Akhkubekov S.N., Tamaev T.Kh., Khotova L.V. Effect of alkaline additives on phase formation and kinetics in binary metal systems using SN–PB, IN–ZN and SN–ZN, used in electronics	45
Kuzamishev A.G., Bzhikhatlov K.Ch., Shebzukhova M.A., Shebzukhov A.A. Surface tension size dependence of nanoparticles	50
Kuzamishev A.G., Shebzukhova M.A., Shebzukhov A.A. Size influence on thermal expansion of nanoparticles	57
HISTORY	
Gubzhokov M.N. Anthropology of Sovietness through the prism of museum sources	64
The demand to the design of the scientific article, represented in the journal «Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University»	77

ФИЗИКА

УДК 544.015.4:536.912:620.3

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ

*Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Богданов С.С.,
Соколов Д.Н., Колосов А.Ю., Акимова Ю.Н.

Тверской государственный университет

*nsdobnyakov@mail.ru

Проведено моделирование фазового перехода плавление/кристаллизация в наночастицах никеля в программе LAMMPS для исследования размерных зависимостей температур плавления и кристаллизации, а также теплот соответствующих фазовых переходов. Моделирование проводилось с использованием двух потенциалов в рамках модели погруженного атома. Полученные результаты сравниваются с имеющимися результатами проведения моделирования с использованием метода Монте-Карло и метода молекулярной динамики, а также с результатами серий молекулярно-динамических экспериментов других авторов.

Ключевые слова: фазовый переход, температура плавления и кристаллизации, моделирование, метод молекулярной динамики, наночастицы.

SELECTION OF OPTIMAL POTENTIAL FOR MODELING MELTING AND CRYSTALLIZATION OF NICKEL NANOPARTICLES

Sdobnyakov N.Yu., Myasnichenko V.S., Bogdanov S.S.,
Sokolov D.N., Kolosov A.Yu., Akimova Yu.N.

Tver State University

The melting / crystallization phase transition in nickel nanoparticles was simulated in the LAMMPS program to study the size dependences of the melting and crystallization temperatures, as well as the heats of the corresponding phase transitions. The simulation was performed using two potentials within the model of an immersed atom. The obtained results are compared with our estimations using the Monte Carlo method and the molecular dynamics method, as well as with the results of a series of molecular dynamic experiments by other authors.

Keywords: phase transition, melting and crystallization temperatures, simulated, method molecular dynamics, nanoparticles.

Введение. В настоящее время в науке широко используется компьютерное моделирование для исследования физико-химических характеристик наночастиц (НЧ) и наноструктурированных материалов, так как подобные модельные расчёты позволяют с опорой на мощь современных вычислительных методов и средств детально и полно изучать наноструктуры, что является недоступным, чисто теоретическим подходом. Однако одной из главных проблем компьютерного моделирования явля-

ется выбор межатомного потенциала, который связан не только с получением конкретных величин, но и с описанием базовых физических величин, относящихся к массивной фазе. Перспективным с прикладной точки зрения является изучение вида и параметров петли гистерезиса, т. е. температурных зависимостей потенциальной части внутренней энергии, отвечающих нагреву и охлаждению наночастицы. Такой анализ позволяет определить целый комплекс термодинамических характеристик металлических НЧ, в частности температуры плавления и кристаллизации, а также теплоты указанных процессов. Кроме того, важным аспектом изучения фазовых переходов с прикладной точки зрения являются закономерности типа структура–свойства, которые необходимы для обоснования тех или иных режимов в технологических процессах (сегрегация, коалесценция, нанопайка и др.) с участием наночастиц и наноструктурированных материалов [1].

Постановка задачи. Целью настоящей работы являлось проведение компьютерного моделирования фазового перехода плавление/кристаллизация для нанокластеров никеля различного размера. В качестве инструмента моделирования была использована программа LAMMPS. Данная программа обладает свободной лицензией и способна моделировать 2D- и 3D-системы с сотнями миллионов частиц, используя различные межатомные потенциалы (силовые поля), а также граничные условия. Для описания взаимодействия атомов нами использовались потенциалы модели погруженного атома (EAM) [2, 3].

В ходе настоящего моделирования исследовались размерные зависимости температур плавления и кристаллизации (в том числе область гистерезиса и фазы начала и конца плавления и кристаллизации соответственно) НЧ никеля размером $N = 456, 600, 956, 1200, 1364, 1536, 1724$. Полученные результаты сравниваются с имеющимися данными, полученными методами Монте-Карло (МК) и молекулярной динамики (МД) с помощью программных комплексов NanoExpert [4] и ClusterEvolution [5], которые используют потенциал сильной связи [6]. Аналогичные расчеты были проведены для размерных зависимостей теплот плавления и кристаллизации. Ранее исследование размерных зависимостей температур и теплот фазовых переходов проводилось авторами настоящей статьи в работах [7–11].

Обсуждение результатов. На рис. 1 представлены соответствующие размерные зависимости температур плавления и кристаллизации нанокластеров никеля различного размера с использованием альтернативных подходов к атомистическому моделированию: метода молекулярной динамики, метода Монте-Карло и LAMMPS.

Данные МК прогнозируют макроскопическую температуру плавления (без учета нелинейности соответствующей размерной зависимости) 1862 К (т.е. на 8 % выше экспериментального значения – 1728 К [14]), в то время как данные работы [12] – 2091 К, работы [15] – 1917 К. Результаты LAMMPS показывают, что из двух исследуемых авторами статьи потенциалов [2] и [3] лучшее совпадение с макроскопической температурой плавления наблюдается при моделировании наносистем с использованием потенциала [2] – 1772 К (отклонение 0,7 % от макроскопического значения). Альтернативные молекулярно-динамические результаты по данным [13] также представлены на рис. 1. По данным [13] для макроскопического значения температуры плавления получено значение 1760 К, для температуры кристаллизации значения получены лишь для двух размеров – они одинаковы и составляют 640 К, что ниже всех результатов, представленных на рис. 1.

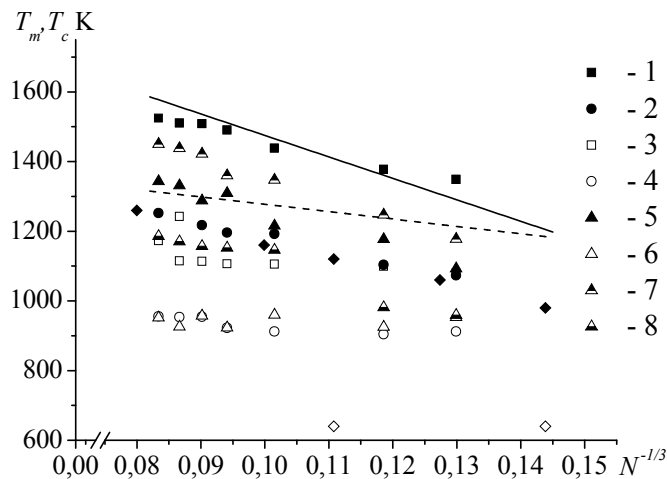


Рис. 1. Размерные зависимости температур плавления (точки 1 – МК, точки 2 – МД) и кристаллизации (точки 3 – МК, точки 4 – МД) для кластеров никеля

Серии точек 5, 6 отвечают за результаты LAMMPS с использованием потенциала [2] для значений температур начала плавления и начала кристаллизации соответственно. Серии точек 7, 8 отвечают за результаты LAMMPS с использованием потенциала [3]. Сплошная и пунктирные линии – аппроксимации результатов работы, полученные методом молекулярной динамики [12]. Символами \blacklozenge , \blacklozenge показаны молекулярно-динамические результаты работы [13] для плавления и кристаллизации соответственно.

Поскольку для нанокластеров металлов можно говорить о наличии гистерезиса при рассмотрении фазового перехода плавления/кристаллизация, необходимо учитывать размерную зависимость температур плавления и кристаллизации [16, 17]. Безусловно, это должно отразиться и на наблюдаемых значениях теплот плавления и кристаллизации. На рис. 2 представлены зависимости молярных теплот плавления и кристаллизации для нанокластеров никеля различного размера, полученные с использованием альтернативных подходов к атомистическому моделированию: метода молекулярной динамики, метода Монте-Карло и LAMMPS. Макроскопическое значение теплоты плавления никеля 17.6 Дж/моль [14].

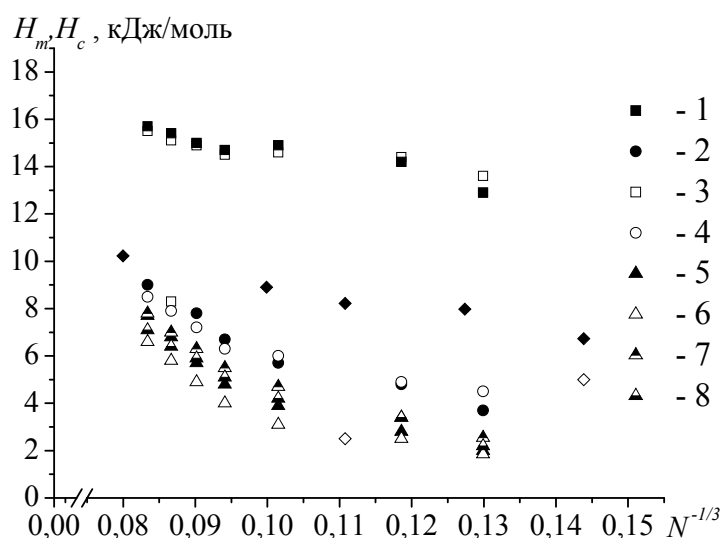


Рис. 2. Размерные зависимости теплот плавления (точки 1 – МК, точки 2 – МД) и кристаллизации (точки 3 – МК, точки 4 – МД) для кластеров никеля

Серии точек 5, 6 отвечают за результаты LAMMPS с использованием потенциала [2] для значений температур начала плавления и начала кристаллизации соответственно. Серии точек 7, 8 – результаты LAMMPS с использованием потенциала [3]. Символами \blacklozenge , \blacklozenge показаны молекулярно-динамические результаты работы [13] для плавления и кристаллизации соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного подбора типа и параметров потенциала для нанокластеров металлов. Даже при применении однотипных потенциалов в рамках модели погруженного атома, но с различными параметрами, можно добиться лучшего согласия аппроксимации полученных размерных зависимостей в области макроскопических размеров. Так, параметры потенциала [2] дают лучшее согласие с имеющимися экспериментальными данными для температуры, но предсказывают несколько заниженные значения теплот фазового перехода плавление/кристаллизация.

Необходимо отметить, что данные способы моделирования с использованием метода Монте-Карло в исследованной области существенно превышают как молекулярно-динамические результаты, так и результаты LAMMPS. Хотя, как показано в [10], в некоторых случаях данные, полученные с использованием метода Монте-Карло, могут давать лучшее совпадение с макроскопическим значением теплот фазового перехода, в частности по сравнению с результатами, полученными с использованием метода молекулярной динамики. В нашем случае результаты, полученные методом Монте-Карло, наилучшим образом предсказывают макроскопическое значение для теплоты кристаллизации (см. данные таблицы). При этом характерной особенностью поведения размерных зависимостей теплот плавления и кристаллизации является то, что могут существовать размеры, для которых $H_c > H_m$.

Данный эффект, в частности, наблюдался нами в [1, 11], и он особенно проявляется в области малых размеров.

Таблица

Получаемые макроскопические значения для теплот фазовых переходов никеля

Номер данных	1	2	3	4	5	6	7	8	♦ [13]
Величина, кДж/моль	19,8	17,4	17,8	14,6	16,2	13,5	16,0	14,7	14,2

Заметим, что некоторые молекулярно-динамические результаты, приведенные на рис. 2 (♦ – [13]) предсказывают уменьшение теплоты кристаллизации с увеличением размера нанокластера. На наш взгляд, это является артефактом и связано с некорректными условиями охлаждения системы, а также, возможно, и непосредственного определения температуры кристаллизации (при расчете данных ♦ мы определяли теплоту фазового перехода при температуре кристаллизации, найденной авторами [13]).

Еще одной трудностью для корректного определения теплот фазового перехода плавление/кристаллизация является отмеченное в [15] наличие достаточно выраженного гистерезиса плавления и кристаллизации наночастиц никеля. В [15] были введены для рассмотрения температуры начала и завершения соответствующего фазового перехода. Температура фазового перехода определялась как среднее арифметическое температур его начала и завершения. При аппроксимации данных, представленных на рис. 2 в области макроскопических размеров, необходимо учитывать возможный нелинейный характер зависимостей $T(r)$, $H(r)$, что обсуждалось, например, в [1, 18, 19].

В данной работе мы ограничимся линейной аппроксимацией для размерных зависимостей теплот плавления и кристаллизации (результаты представлены в таблице; номера соответствуют данным, представленным на рис. 2).

Таким образом, комплексное изучение размерных зависимостей температур плавления и кристаллизации, а также размерных зависимостей теплот соответствующих фазовых переходов для наночастиц никеля позволяет прогнозировать технологические условия использования наночастиц определенного размера.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-38-00571 мол_а, № 18-03-00132).

Библиография

1. Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н. Изучение термодинамических и структурных характеристик наночастиц металлов в процессах плавления и кристаллизации: теория и компьютерное моделирование: монография. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. 176 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.url: https://github.com/lammps/lammps/blob/master/potentials/CuNi.eam.alloy](https://github.com/lammps/lammps/blob/master/potentials/CuNi.eam.alloy)
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.url: https://github.com/lammps/lammps/blob/master/potentials/Ni_u3.eam](https://github.com/lammps/lammps/blob/master/potentials/Ni_u3.eam)
4. Свидетельство № 2017615289 РФ о государственной регистрации для ЭВМ / Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н., Комаров П.В., Колосов А.Ю. Программа моделирования термодинамических характеристик сложных наносистем: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.05.2017.
5. Свидетельство № 2011615692 РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ / Мясниченко В.С. Молекулярнодинамическое моделирование и биоинспирированная оптимизация бинарных и тройных металлических наноструктур (КластерЭволюшн): зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ. 20.06.2011.
6. Cleri F., Rosato V. Tight binding potentials for transition metals and alloys // Physical Review B. 1993. V. 48. Is. 1. P. 22–33.
7. Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н., Базулев А.Н. и др. О взаимосвязи между размерными зависимостями температур плавления и кристаллизации для металлических наночастиц // Расплавы. 2012. № 5. С. 88–94.

8. Сдобняков Н.Ю., Репчак С.В., Самсонов В.М. и др. О взаимосвязи размерных зависимостей температур плавления и кристаллизации наночастиц металлов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 5. С. 109–112.

9. Сдобняков Н.Ю., Комаров П.В., Колосов А.Ю. и др. Расчет размерных зависимостей теплоты плавления наночастиц металлов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15, № 3. С. 337–344.

10. Самсонов В.М., Сдобняков Н.Ю., Васильев С.А., Соколов Д.Н. О размерной зависимости теплоты плавления металлических нанокластеров // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 5. С. 547–550.

11. Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н., Мясниченко В.С., Базулев А.Н. Расчет размерных зависимостей теплот плавления и кристаллизации наночастиц металлов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2014. Вып. 6. С. 342–348.

12. Самсонов В.М., Тальзин И.В., Самсонов М.В. О влиянии скоростей нагрева и охлаждения на плавление и кристаллизацию металлических нанокластеров // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 149–152.

13. Qi Y., Çağın T., Johnson W.L., Goddard III W.A. Melting and crystallization in Ni nanoclusters: the mesoscale regime // The Journal of Chemical Physics. 2001. V. 115. No 1. P. 385–394.

14. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

15. Самсонов В.М., Бембель А.Г., Шакуло О.В. О фазовых переходах первого рода в кластерах никеля // Вестник ТвГУ. Серия: Физика. 2011. Вып. 13. С. 82–93.

16. Сдобняков Н.Ю., Комаров П.В., Соколов Д.Н., Самсонов В.М. Расчет размерных зависимостей теплоты плавления наночастиц металлов // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 111, № 1. С. 15–22.

17. Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н., Самсонов В.М. и др. Исследование гистерезиса плавления и кристаллизации нанокластеров золота с использованием многочастичного потенциала Гупта // Металлы. 2012. № 2. С. 48–54.

18. Самсонов В.М., Мальков О.А. Термодинамическая модель кристаллизации и плавления малой частицы // Расплавы. 2005. № 2. С. 71–79.

19. Samsonov V.M., Malkov O.A. Thermodynamic model of crystallization and melting of small particles // Central European Journal of Physics. 2004. V. 1. P. 1–14.

НОВЫЕ ПРИЁМЫ СИНТЕЗА СТЕКОЛ КАК СЛЕДСТВИЕ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В ОКСИДНЫХ РАСПЛАВАХ

^{1,2}Старцев Ю.К.

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

startsevyuk@yahoo.com

Приведены сведения о способах направленного синтеза пористых стекол с заданными размерами и объёмом пор. Практические рекомендации основаны на опыте работы с пористыми стеклами, полученными на основе натриево-боросиликатных систем. Научное обоснование синтеза новых стекол базируется на теории метастабильной ликвации в стеклообразующих оксидных расплавах. Приведены сведения об использовании пористых стекол в качестве матриц для получения материалов, обладающих необходимыми оптическими, электрическими, сенсорными и другими свойствами.

Ключевые слова: синтез стекол, пористые стекла, оксидные расплавы, натриево-боросиликатные системы.

NEW METHODS OF GLASS SYNTHESIS AS A RESULT OF STUDY OF PHASE SEPARATION PROCESSES IN OXIDE MELTS

^{1,2} Startsev Yu.K.

¹*Saint-Petersburg` State Institute of Technology*

²*Saint-Petersburg` State University of Civil Aviation*

Provides information about how direct synthesis of porous glass with specified size and volume. Practical recommendations based on experience with porous glass derived from sodium borosilicate system. Scientific substantiation of the synthesis of new glass is based on the theory of metastable segregation in glassy oxide melts. Provides information about using porous glass as matrices to obtain materials, with the requisite optical, electrical, sensory and other properties.

Keywords: synthesis of glass, porous glass, oxide melts, sodium borosilicate system.

Исследование метастабильной ликвации в оксидных расплавах, видимо, началось в 1927 году, когда была опубликована работа Грейга [1], где автор, исходя из S-образной формы ликвидуса в системе ВаО–ВаО*SiO₂, высказал предположение о существовании в подликвидусной области жидкостной несмешиваемости в этой системе и даже наметил возможные контуры купола несмешиваемости. После выхода статьи Грейга и её перевода на русский язык в 1929 году [2] развернулась дискуссия о степени реальности ликвационной структуры в обычных промышленных стеклах, которую резюмировал О.К. Ботвинкин [3] предположением: «Нужно ожидать, что подобные области расслоения силикатных сплавов при высоких температурах более распространены, чем мы это сейчас знаем».

В течение нескольких десятилетий центральным и единственным объектом исследований в этой области были натриевоборосиликатные стекла [4, 5]. После фундаментальных исследований, выполненных в Институте химии силикатов РАН [6, 7], мы знаем, что расслаивающихся систем и в самом деле множество. Синтез материалов с заданным комплексом свойств на основе ликвидирующих стекол радикально меняется [8]. По существу, речь идёт о разработке научных основ и совершенствовании технологии получения высококремнеземных нанопористых стекол, получаемых из однофазного расплава, в котором путем термообработки образуется структура их двух взаимопроникающих сеток.

Эти среды обладают уникальными адсорбционными свойствами, стабильными разделительными характеристиками при длительной эксплуатации, возможностью их стерилизации и регенерации (см., например, [9–11]). Комплекс свойств пористых стекол делает их перспективными базовыми матрицами для изготовления большого числа элементов различного назначения – от композиционных материалов с заданными свойствами до носителей катализаторов.

Решив задачу выбора химических и температурно-временных режимов синтеза материала, мы узнаем, как создать новые материалы с нужным набором свойств. С решением задач промышленного, экологического, медицинского и других направлений разработка новых материалов из пористых стекол, имеющих каналы задаваемого диаметра в нанометровом диапазоне значений, области их применения значительно расширятся.

Основные представления о процессе получения исходных пористых стекол были заложены в классических работах [12–15], выполненных еще в первой половине XX века, и не потеряли своего значения до сих пор. Следует иметь в виду, что эти представления были сформированы задолго до современного развития теории метастабильной ликвации в стеклообразующих расплавах и носили чисто качественный характер. Поскольку исследуемые образцы находились в неравновесных состояниях, некоторые результаты не поддаются систематизации, а в ряде случаев оказываются внутренне противоречивыми.

В первую очередь это относится к результатам изучения влияния условий выщелачивания стекла на скорость процесса и структуру пористых стекол. Кроме того, так как основной областью практического применения пористых стекол на тот момент являлось использование их в качестве адсорбентов, большинство исследований было выполнено на порошках, а не на пластинах, что не позволило выявить ряд важных физико-химических особенностей, характерных для процесса получения массивных образцов, требующихся для мембранных и лазерных технологий.

В дальнейшем был значительно расширен круг объектов и методов исследования, а также подходов и методов обработки данных, и был получен значительный объем новых результатов. Основой для этого послужили теория и результаты исследования явления метастабильного фазового разделения в стеклообразующих расплавах, которые дали информацию о составе и характере взаимного распределения фаз, сосуществующих в двухфазном стекле.

Исходными стеклами для производства пористых мембран сегодня служат ликвирующие натриевоборосиликатные и натриевобороалюмосиликатные стекла [16]. Для последних, в частности, было установлено, что нерастрескивающиеся кварцоиды должны содержать ионы алюминия. Причина такого влияния ионов алюминия пока не выяснена.

Из приведенного обзора видно, как много новых материалов с ценными комплексами свойств уже создано в настоящее время, и насколько перспективна область практического использования ликвирующих стекол.

Библиография

1. Грейг Дж. Явления несмешиваемости в силикатных расплавах // Классические работы по физико-химии силикатов. Л.: ОНТИ ХимТеорет, 1937. С. 125–185.
2. Старцев Ю.К. Исследования стекла в России. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2009. 364 с.
3. Ботвинкин О.К. Введение в физическую химию силикатов М.-Л.: Гизлегпром, 1938. 284 с.
4. Молчанова О.С. Натриевоборосиликатные и пористые стекла // Строение стекла. М.-Л., 1955. С. 141–144.
5. Mazurin O.V., Streltsina M.V., Totesh A.S. Determination of Tie-Line Directions in the Metastable Phase-Separation Regions of Ternary Systems // Phys. Chem. Glasses. 1969. V. 10. No 2. P. 63-68.
6. Андреев Н.С., Мазурин О.В., Порай-Кошиц Е.А., Роскова Г.П., Филипович В. Н. Явления ликвации в стеклах / под ред. М.М. Шульца. Л.: Наука, 1974. 195 с.
7. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение / под ред. Б.Г. Варшала. Л.: Наука, 1991. 276 с.
8. Роскова Г.П., Цехомская Т.С. Использование ликвационных явлений для создания стекол и материалов с заданными свойствами // Физ. хим. стекла. 1981. Т. 7, № 5. С. 513–534.
9. Мешковский И.К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. СПб: СПбГУ ИТМО (ТУ), 1998. 332 с.
10. Антропова Т.В. Физико-химические процессы создания пористых стекол и высококремнеземных материалов на основе ликвирующих щелочноборосиликатных систем: автореф. дисс. ... д-ра хим. наук // ИХС РАН, 2005. 45 с.

11. Пак В.Н., Гавронская Ю.Ю., Буркат Т.М. Пористые стекла и наноструктурированные материалы на их основе. СПб.: РГПУ, 2013. 129 с.
12. Hood H.P., Nordberg M.E. Cold spray surface patterning of aluminum on aluminum, silicon, glass, and printed circuit board substrates // J. Soc. Glass Technol. 1939. V. 23, No 100. Abs. 856.
13. Гребенщиков И.В., Молчанова О.С. Получение макропенки на натриевоборосиликатных стеклах и ее свойства // ЖОХ. 1942. № 12. С. 588–597.
14. Жданов С.П. Сравнительное исследование структуры пористых стекол адсорбционными методами и под электронным микроскопом. // ДАН СССР. 1952 Т. 82, № 2. С. 281–284.
15. Добычин Д.П., Киселева Н.Н. О влиянии термической обработки натриевосиликатных стекол на пористую структуру продуктов их выщелачивания в кислоте // ЖФХ. 1958. Т. 32, № 1. С. 27–34.
16. McMillan P.W., Matthews C.E. Microporous glasses for reverse osmosis // J. Mater. Sci. 1976. V. 11, No 7. P. 1187–1199.

О СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В НАНОЧАСТИЦАХ ТИТАН–АЛЮМИНИЙ

*Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Давыденкова Е.М.,
Антонов А.С., Комаров П.В., Ершов П.М.

Тверской государственный университет

*nsdobnyakov@mail.ru

В работе проведено моделирование и проанализировано изменение структуры биметаллических TiAl кластеров нанометрового размера в процессе охлаждения. Результаты показывают преимущественно кристаллическую $\alpha + \beta$ структуру наносплава TiAl после охлаждения. Определена температура стеклования для биметаллической системы TiAl.

Ключевые слова: структурные изменения, наночастицы, кластеры, наносплав, температура стеклования.

ABOUT STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN TITANIUM–CONTAINING NANOPARTICLES

Sdobnyakov N.Yu., Myasnichenko V.S., Davydenkova E.M.,
Antonov A.S., Komarov P.V., Ershov P.M.

Tver State University

In the work we simulated and analyzed changes in the structure of nanosized bimetallic TiAl clusters during the cooling process. The results show the predominantly $\alpha + \beta$ crystalline structure of TiAl nanoalloy after cooling. The glass transition temperature for bimetallic system TiAl is determined.

Keywords: changes of the structure, nanoparticles, clusters, nanoalloy, glass transition temperature.

Введение. Чистый титан является аллотропным элементом, который может иметь более одной кристаллической структуры при изменении температуры. Титан демонстрирует мартенситные переходы между α (ГПУ), β (ОЦК) и ω (гексагональная) фазами. Легирующие элементы, в зависимости от того, повышает добавление легирующего элемента или уменьшает температуру $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода, могут быть классифицированы на α -стабилизаторы либо β -стабилизаторы. Одним из важных стабилизирующих элементов первого класса является алюминий, имеющий большую растворимость в α -фазе. Можно разделить β -стабилизирующие элементы на две группы, исходя из их влияния на получаемую бинарную фазовую диаграмму: изоморфные (образующие неограниченные твердые β -растворы) и эвтектоидообразующие стабилизаторы (приводящие к эвтектоидному превращению в сплаве). Изоморфные β -стабилизаторы (в том числе V) понижают температуру полиморфного превращения и расширяют область существования β -фазы.

При переходе к нанометровому диапазону размеров физико-химические свойства металлов и сплавов, с одной стороны, могут иметь сильную размерную зависимость [1]; с другой стороны, они могут проявлять особые термодинамические, оптические, электрические, магнитные и даже биологические свойства. Различные аспекты роста и структурных превращений при фазовых переходах исследовались ранее для монометаллических наноструктур титана [2, 3], а также биметаллических (в т.ч. микроструктурированных) сплавов титан–алюминий и титан–ванадий [4–6]. В [6, 7] описано влияние скорости охлаждения и состава на температуру фазовых превращений, наблюдаемых в титановых $\alpha + \beta$ -сплавах. В дан-

ной работе мы намерены моделировать и анализировать изменение структуры биметаллических титаносодержащих кластеров нанометрового размера на примере наносплава $TiAl$ в процессе охлаждения.

Описание компьютерной модели. Для задания межатомного взаимодействия был выбран многочастичный потенциал сильной связи. Мы используем известные числовые параметры потенциала для титана и алюминия [8, 9]. Параметры для смешанных связей рассчитывали по правилам Лоренца – Бергло. Для расчета действующих сил, а также внутренней потенциальной энергии U использовался радиус обрезания (r_{cut}) по пятой координационной сфере включительно. Начальная конфигурация из 2869 атомов (включая 2582 атома Ti) подвергалась нагреву при температуре 2000 К до полного разупорядочения. Далее наночастица охлаждалась до 200 К с постоянной скоростью 1.0 К/пс или 10 К/пс.

Для отслеживания структурных преобразований мы использовали метод сопоставления полиэдральных шаблонов (polyhedral template matching) [10], реализованный в открытом ПО Ovito, для идентификации простых фаз: fcc, hcp, bcc и ico. Этот метод можно использовать для идентификации структур даже вблизи точки плавления, и он хорошо идентифицирует bcc (ОЦК) фазу в сплаве. Метод основан на пошаговом отображении локальной окрестности атома на каждую геометрическую структуру идеальной формы. Если такое сопоставление существует, вычисляется значение среднеквадратичного отклонения (RMSD). Это мера пространственного отклонения от шаблона идеальной структуры, а именно качество совпадения; она может быть ограничена сверху (в нашем случае использовалось значение 0.156). Наконец, атому присваивается структурный тип с наименьшим значением RMSD. Заметим, что в данной работе мы относили к квазикристаллической фазе (ico) только центральные атомы из каждого 13-атомного икосаэдра.

Обсуждение результатов. Была выполнена серия из 10 запусков метода молекулярной динамики для исследуемой системы. Для дальнейшего структурного анализа выбирались два наилучших по внутренней потенциальной энергии результата. На рис. 1, 2 приведены данные анализа атомной структуры методом сопоставления полиэдральных шаблонов для двух выбранных скоростей охлаждения, а именно 1.0 К/пс и 10.0 К/пс. В обоих случаях отсутствует фазовое равновесие при низких температурах, в отличие от объемной фазы. Результаты показывают преимущественно кристаллическую $\alpha + \beta$ -структуру наносплава $TiAl$ после охлаждения, температура кристаллизации находится в диапазоне 700–800 К для скорости охлаждения 1.0 К/пс. При высокоскоростном охлаждении кристаллизации практически не наблюдается.

Температура стеклования (glass formation) определялась по соотношению высоты первого минимума радиальной функции распределения к высоте её первого пика, которое приравнялось к 0.14. Данный эмпирический критерий описан в работе [11], а также использовался в [12] для исследования размерных эффектов в наночастицах $Ti@Al$ типа ядро-оболочка (данные для различных составов представлены в таблице). Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что температура стеклования нелинейно зависит от доли атомов Ti в исследуемой биметаллической системе.

Таблица

Температура стеклования T_g в наносплаве $TiAl$

Скорость охлаждения, К/пс	Соотношение компонент			Данные о структуре типа ядро-оболочка
	50–50	70–30	90–10	
1	920 [К]	990 [К]	910-976 [К]	759 [К] [12]
10	–	–	995 – 1000[К]	800 [К] [13] 740-800 [К] [6]

На основе указанного критерия в работе [12] была рассчитана температура стеклования T_g для наночастиц $Ti@Al$ типа ядро-оболочка с $N = 3184$ и соотношением компонент 60 на 40 со скоростью охлаждения 12 К/пс. Разница в полученных значениях температуры стеклования обусловлена, с одной стороны, более высокой скоростью охлаждения во время молекулярно-динамического моделирования, а с другой – использованием исходной структуры типа ядро-оболочка. Известно, что ско-

рость охлаждения существенно влияет на конечную фазу. В [13] наночастице $Ti@Al$ типа ядро–оболочка с $N=3500$ и соотношением компонент 50 на 50 температура стеклования была оценена при скорости охлаждения $66,7$ К/нс. Образование аморфной фазы и процессы ее релаксации и кристаллизации в бинарной системе $Ti-Al$ (система $Ti - 25\%$ атомов из 4096 атомов) исследованы в [6] с использованием методов молекулярной динамики при скоростях охлаждения $1,0$ К/пс и 10 К/пс соответственно. Сравнение температуры стеклования T_g представлено в таблице.

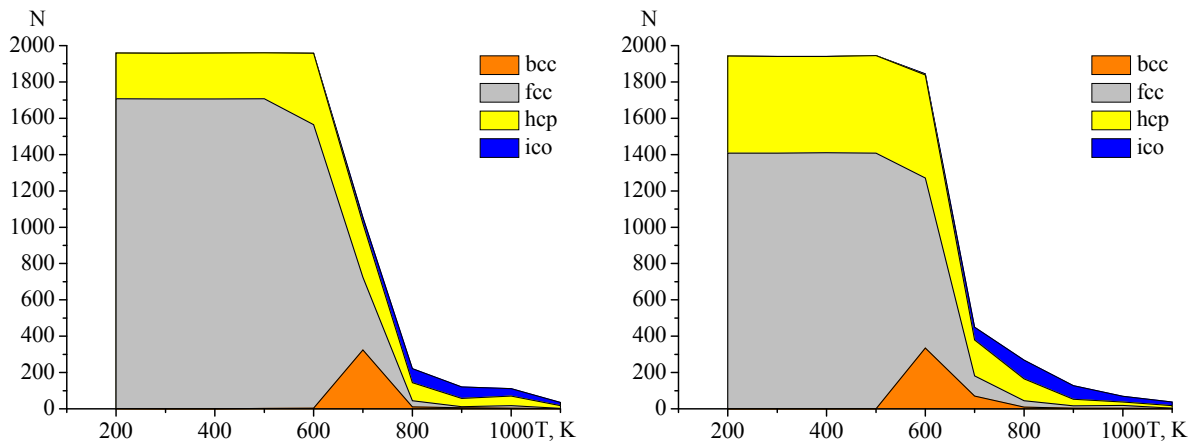


Рис. 1. Распределение атомов наносплава $TiAl$ по распознанным фазам при различной температуре в процессе охлаждения: bcc – ОЦК-, fcc – ГЦК-, hcp – ГПУ-фазы, ico – икосаэдрические квазикристаллы (порядок следования фаз снизу вверх, данные приведены для двух серий экспериментов с минимальной энергией). Скорость охлаждения 1.0 К/пс

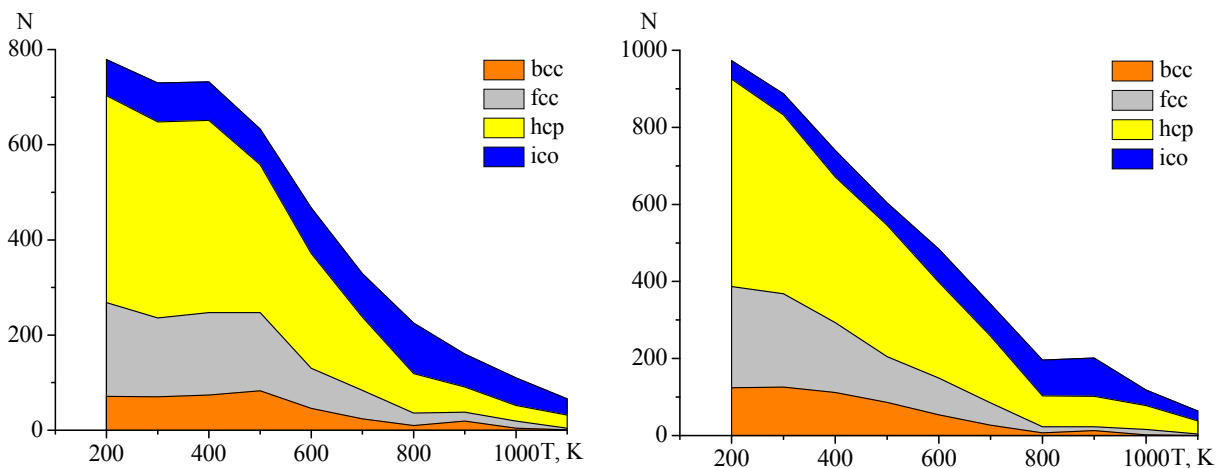


Рис. 2. Распределение атомов наносплава $TiAl$ по распознанным фазам при различной температуре в процессе охлаждения: bcc – ОЦК-, fcc – ГЦК-, hcp – ГПУ-фазы, ico – икосаэдрические квазикристаллы (порядок следования фаз снизу вверх, данные приведены для двух серий экспериментов с минимальной энергией). Скорость охлаждения 10 К/пс

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-03-00132 и 18-38-00571-мол_а).

Библиография

1. Yu X., Zhan Z. The effects of the size of nanocrystalline materials on their thermodynamic and mechanical properties // *Nanoscale Research Letters*. 2014. V. 9. Is. 1. Art. Num. 516.
2. Wang B., Wang G., Chen X., Zhao J. Melting behavior of ultrathin titanium nanowires // *Physical Review B*. 2003. V. 67. Is. 19. P. 193403.
3. Gunnarsson R., Brenning N., Ojamae L., Kalered E., Helmersson U., Raadu M.A. Nucleation of titanium nanoparticles in an oxygen-starved environment. II: theory // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. V 51, No 45. P. 455202.
4. Kostov A., Živković D. Thermodynamic analysis of alloys Ti–Al, Ti–V, Al–V and Ti–Al–V // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. V. 460. Is. 1-2. P. 164–171.
5. Doubenskaia M., Domashenkov A., Smurov I. Study of the laser melting of pre-deposited intermetallic tial power by comprehensive optical diagnostics // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 321. P. 118–127.
6. Shimono M., Onodera H. Molecular dynamics study on formation and crystallization of Ti–Al amorphous alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. V. 304–306. P. 515–519.
7. Ahmed T., Rack H.J. Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 1998. V. 243. Is. 1-2. P. 206–211.
8. Karolewski M.A. Tight-binding potentials for sputtering simulation with FCC and DCC metals // *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2001. V. 153, No 3. P. 239–255.
9. Pan'kin N.A. Structure of Ti N (N=6–15) titanium cluster isomers // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2014. V. 118. Is. 6. P. 856–862.
10. Larsen P.M, Schmidt S., Schiøtz J. Robust structural identification via polyhedral template matching // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2016. V. 24, No 5. P. 055007.
11. Wendt H.R., Abraham F.F. Empirical Criterion for the glass transition region based on Monte-Carlo simulations // *Physical Review Letters*. 1978. V. 41. Is. 18. P. 1244–1246.
12. Zhang J.-P., Zhang Y.-Y., Wang E.-P., Tang C.-M., Cheng X.-L., Zhang Q.-H. Zhang Y.-Y. Size effect in the melting and freezing behaviors of Al/Ti core-shell nanoparticles using molecular dynamics simulation // *Chinese Phys. B*. 2016. V. 25. No 3. P. 036102.
13. Levchenko E.V., Evteev A.V., Löwisch G.G., Belova I.V., Murch G.E. Molecular dynamics simulation of alloying in a Ti-coated Al nanoparticle // *Intermetallics*. 2012. V. 22. P. 193–202.

**КАПИЛЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ГАЛЛИЯ
В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ, ПРИ МАГНИТНЫХ И
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

¹Сергеев И.Н.,* ^{1,2,3}Хоконов А.Х., ¹Ахматов З.А.

¹*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

²*Кабардино-Балкарский научный центр РАН*

³*Институт ядерных исследований РАН*

*sergeev@kbsu.ru

Проведено комплексное исследование капиллярных свойств микролитровых капель эвтектических сплавов Ga – 14,2 атм. % In и Ga – 8,5 атм. % Sn динамическим и статическим методами. Методом капиллярных колебаний изучено влияние раствора электролита на межфазное натяжение галлиевых сплавов. Методом «лежащей капли» исследовано влияние силы электромагнитного воздействия на краевой угол смачивания микрокаплями галлиевых сплавов медной подложки, размещенной в однородном магнитном поле при пропускании через подложку постоянного электрического тока.

Ключевые слова: эвтектические сплавы галлия, капиллярные свойства, краевой угол смачивания, электромагнитные взаимодействия, пондемоторные силы.

**CAPILLARY PROPERTIES OF EUTECTIC GALLIUM
ALLOYS IN VARIOUS MEDIA UNDER MAGNETIC
AND ELECTROSTATIC INFLUENCES**

¹Sergeev I.N., ^{1,2,3}Khokonov A.Kh., ¹Akhmatov Z.A.

¹*Kabardino-Balkarian State University*

²*Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*

³*Institute of Nuclear Research RAS*

Capillary properties of microliter drops of eutectic Ga-14.2 at. % In and Ga-8.5 at. % Sn were complex studied by dynamic and static methods. The capillary oscillations method was used to study the effect of an electrolyte solution on the gallium alloys interfacial tension. Using the «sessile drop» method, we studied the influence of electromagnetic field on the contact angle of gallium alloys microdroplets on a copper substrate placed in a uniform magnetic field when passing a constant electric current through the substrate.

Keywords: gallium eutectic alloys, capillary properties, contact angle, electromagnetic interactions, pondemotor forces.

Эвтектические сплавы Ga с индием и оловом способны сохранять жидкотекучее состояние при комнатных температурах и выгодно отличаются от ртути малой токсичностью. Благодаря этим свойствам сплавы галлия рассматриваются как перспективные материалы для микрофлюидики, гибкой электроники, оптических переключателей, микронасосов, 3D-принтеров и др. [1, 2]. Для технологического применения галлиевых сплавов в микромашинах активно разрабатываются методы управления их капиллярными свойствами, среди которых наиболее перспективны методы, основанные на электрохимических и электромагнитных взаимодействиях [2, 3].

В настоящей работе приводятся результаты комплексного исследования капиллярных свойств эвтектических сплавов Ga – 14,2 ат. % In и Ga – 8,5 ат. % Sn динамическим и статическим методами. Методом капиллярных колебаний измерено межфазное натяжение микролитровых капель указанных

сплавов на границе с электролитом (водным раствором соляной кислоты). Методом «лежащей капли» изучено влияние силы Ампера на краевой угол смачивания микрокаплями галлиевых сплавов медной подложки, размещенной в однородном магнитном поле при пропускании через подложку постоянного электрического тока. Приводятся также результаты опытов по управлению смачиванием диэлектрической подложки проводящей жидкостью с помощью электростатического воздействия.

В основе использованного нами динамического метода определения капиллярных свойств легкоплавких металлов во внешнем гравитационном и электромагнитном полях лежат уравнения гидродинамики, которые удобно записать в виде уравнения для переноса импульса в среде с учетом диссипации и уравнения непрерывности [4, 5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) = -\frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k) = 0, \quad (2)$$

где v_i – компонента скорости вдоль i -ой оси; ρ – плотность жидкости; Π_{ik} – тензор потока импульса, который включает электрическую Π_{ik}^e , магнитную Π_{ik}^m и диссипативную Π_{ik}^d компоненты

$$\Pi_{ik} = \rho v_i v_k + P(\rho, T)\delta_{ik} + \Pi_{ik}^e + \Pi_{ik}^m + \Pi_{ik}^d, \quad (3)$$

где P – давление, T – абсолютная температура, которую ниже мы будем считать постоянной, а все процессы – изотермическими. Давление включает как гравитационную, так и капиллярную составляющие. Электромагнитная часть тензора имеет вид:

$$\Pi_{ik}^e = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{ED}{2} \delta_{ik} - \frac{1}{2} (E_i D_k + E_k D_i) \right), \quad (4)$$

$$\Pi_{ik}^m = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{HB}{2} \delta_{ik} - \frac{1}{2} (H_i B_k + H_k B_i) \right), \quad (5)$$

где E – вектора электрического и магнитного полей, а D , B – вектора соответствующих индукций. Для диссипативной части тензора потока импульса в предположении несжимаемости жидкости имеем:

$$\Pi_{ik}^d = -\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

где η – динамическая вязкость. Для статических конфигураций уравнение (1) переходит уравнение:

$$\Pi_{ik} n_k = const. \quad (7)$$

Малым отклонениям от устойчивых статических конфигураций соответствуют капиллярные колебания. Для свободной капли без учета вязкости такая задача была решена аналитически Рэлеем [3], а с учетом вязкости Лэмбом [5]. Эти решения с учетом объемного заряда были применены к гидродинамической модели атомного ядра [6, 7]. Для капли, лежащей на подложке, уравнение (1) не имеет аналитического решения. В этом случае дисперсионное соотношение аппроксимируется решением для поверхностных капиллярных колебаний жидкости. Обобщая результаты работ [4, 5], можно записать это соотношение для случая, когда исследуемая жидкость плотности ρ граничит с другой несжимаемой жидкостью плотностью ρ_1 [8]:

$$\omega^2 = \left(\frac{\rho - \rho_1}{\rho + \rho_1} g k + \frac{\sigma_{12} k^3}{\rho + \rho_1} \right) th(kh), \quad (8)$$

где ω и $k = 2\pi/\lambda$ – частота и волновой вектор капиллярной волны с длиной λ , σ_{12} – межфазное натяжение; g – ускорение свободного падения; h – эффективная глубина жидкости [8].

Для исследования капиллярных колебаний галлиевых сплавов, граничащих с другой жидкостью, были использованы стеклянные кюветы, размещенные на пьезокерамическом вибраторе. Были исследованы эвтектические сплавы состава Ga – 8,5 ат. % Sn и Ga – 14,2 ат. % In. Методика подготовки образцов, возбуждения и фотодиодная регистрация сигнала описаны в работах [8–10]. Наряду с

вынужденными гармоническими колебаниями на вибраторе использовалось шумовое возбуждение каплей. В качестве внешней среды использовался **0.2 М** водный раствор соляной кислоты. Временная зависимость интенсивности рассеянного света и спектр частот капиллярных колебаний капли сплава Ga–Sn диаметром $d_1 = 0.278$ см при шумовом методе возбуждении показаны на рис. 1.

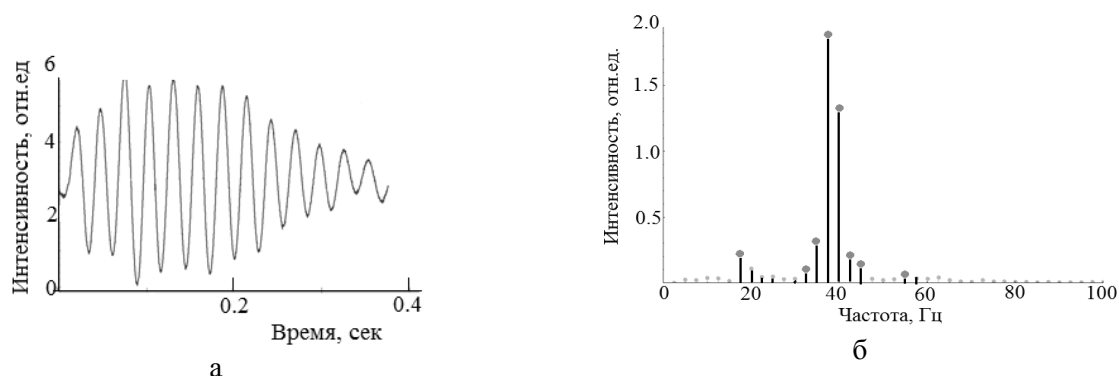


Рис. 1. Зависимость интенсивности рассеянного света от времени при шумовом возбуждении капли диаметром $d_1 = 0.278$ см для сплава Ga – 8,5 ат. % Sn (а) и соответствующий спектр частот капиллярных колебаний (б)

Частота основного возбуждения капли $\nu_1 = 36.37$ Гц соответствует по формуле (8) межфазному натяжению $\sigma_{12} = 588$ дин/см. При возбуждении колебаний с помощью пьезокерамического вибратора капли этого же сплава с меньшим диаметром $d_2 = 0.218$ см резонанс получен на частоте $\nu_2 = 39.76$ Гц, что соответствует межфазному натяжению $\sigma_{12} = 542$ дин/см. Спектр частот капиллярных колебаний для этого случая показан на рис. 2.

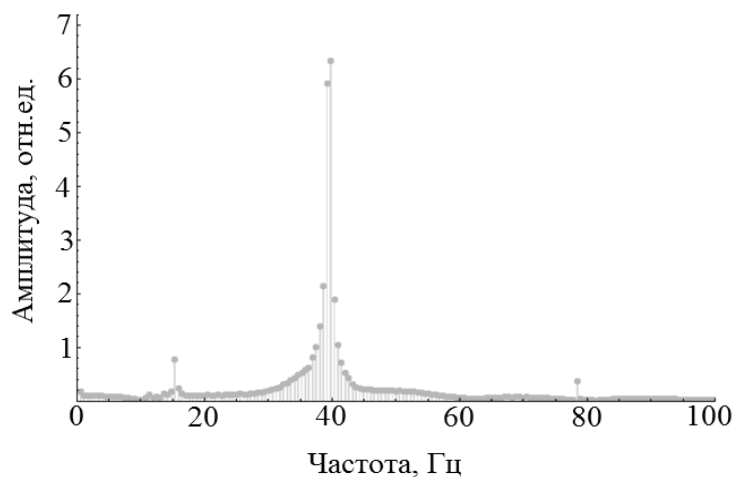


Рис. 2. Резонанс в спектре частот капиллярных колебаний капли диаметром $d_1 = 0.218$ см для сплава Ga – 8,5 ат. % Sn, полученный при возбуждении пьезокерамическим вибратором

Отметим, что для полученных частот капиллярных колебаний с хорошей точностью выполняется соотношение, следующее из закона дисперсии (8) в пренебрежении силой тяжести $\nu_1 / \nu_2 \approx (d_2 / d_1)^{3/2}$. Это подтверждает применимость и самого дисперсионного соотношения (8). Рассматриваемая методика была также применена для капли сплава Ga – 14,2 ат. % In диаметром $d_3 = 0.176$ см. Соответствующие зависимости интенсивности рассеянного света и спектры частот капиллярных колебаний показаны на рис. 3.

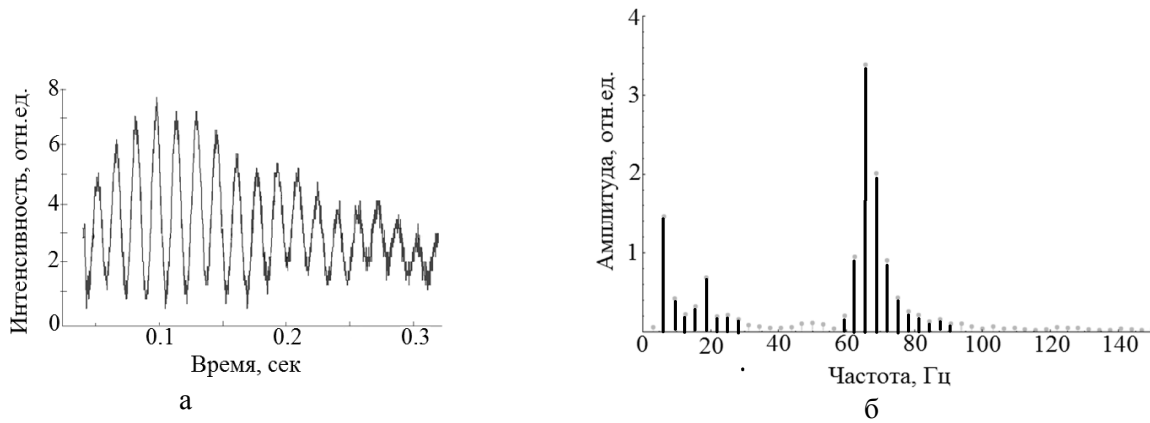


Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеянного света от времени при шумовом возбуждении капли сплава Ga – 14,2 ат. % In диаметром $d_3 = 0.176$ см (а) и соответствующий спектр частот капиллярных колебаний (б)

Расчет межфазного натяжения в этом случае дает $\sigma_{12} = 613$ дин/см.

Рассмотрим металлическую каплю, лежащую на проводящей подложке, размещенной в постоянном магнитном поле, и пропустим ток через каплю так, как показано на рис. 4.

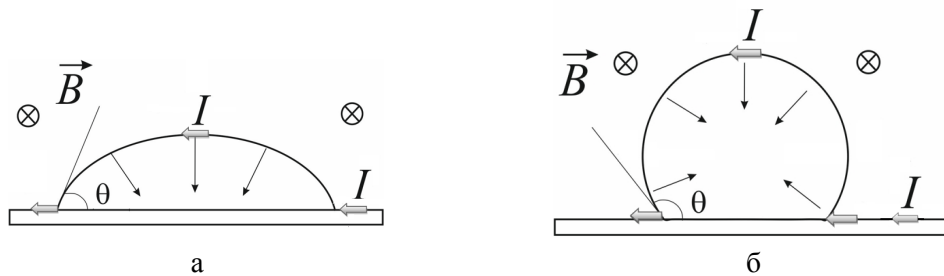


Рис. 4. Схема воздействия помдемоторных сил на проводящую каплю: а – исходный контактный угол $\theta < 90^\circ$; б – исходный контактный угол $\theta > 90^\circ$. Стрелками показаны силы, обусловленные магнитным полем

Рис. а и б относятся к случаю смачивания и не смачивания поверхности, при этом сила, действующая на элементарный объем dV , равна:

$$dF = \frac{1}{c} [j \cdot B] dV. \quad (9)$$

Эта сила, как видно из рис. 6 и приведенной формулы, направлена вдоль нормали к поверхности во внутреннюю область капли. Это эквивалентно воздействию на каплю внешнего давления:

$$P_B = \frac{1}{c} j_s B, \quad (10)$$

где j_s – поверхностная плотность тока. В результате уравнение (7), определяющее равновесную форму капли, примет вид:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = P_0 - P_B - \rho g z, \quad (11)$$

где R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны поверхности. Введем угол φ между касательной к поверхности и горизонтальной осью, как показано на рис. 5.

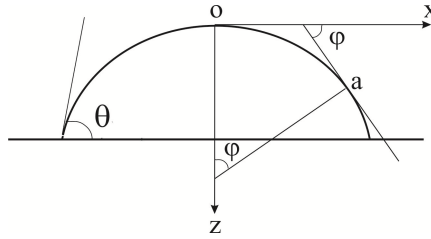


Рис. 5. Система координат и параметризация контура капли с помощью угла φ

Для радиусов кривизны имеет место:

$$R_1 = \frac{dx}{d(\sin \varphi)}, \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{x}{\sin \varphi}. \quad (13)$$

В результате соотношение (11) сводится к известному дифференциальному уравнению, определяющему контур «лежащей» капли [11] с дополнительным слагаемым, обусловленным пондемоторными силами:

$$\frac{d \sin \varphi}{dx} + \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{2}{R_0} - \frac{g}{2\sigma} z - \frac{P_B}{2\sigma'}, \quad (14)$$

где R_0 – радиус кривизны капли в отсутствие электромагнитного воздействия.

Для примера приведем результат расчета краевого угла смачивания капель воды гидрофильной подложки в зависимости от силы тока для двух значений индукции магнитного поля (рис. 6).

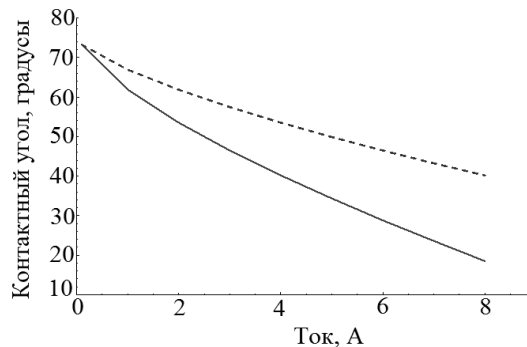


Рис. 6. Зависимость краевого угла смачивания от величины постоянного тока для воды.

Пунктир – $B = 0.5 \cdot 10^2 \text{ Гс}$; – $B = 0.5 \cdot 10^2 \text{ Гс}$, сплошная – $B = 2.3 \cdot 10^2 \text{ Гс}$

Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения капиллярных колебаний при воздействии на исследуемую жидкость электромагнитных пондемоторных сил показана на рис. 7.

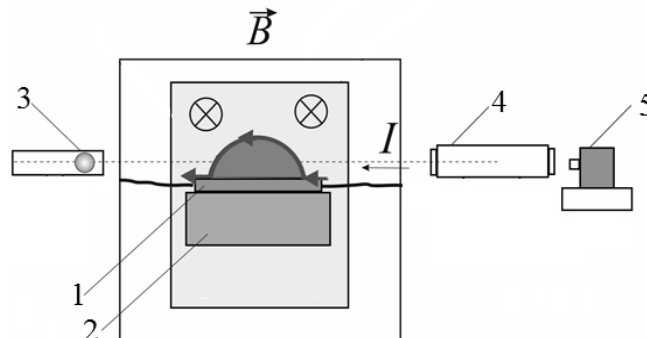


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для изучения капиллярных колебаний при воздействии электромагнитных пондемоторных сил: 1 – проводящая подложка; 2 – пьезокерамический вибратор; 3 – светодиодная система освещения; 4 – микроскоп; 5 – система фото- и видеофиксации

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 8а, фотографии каплей расплава в магнитном поле представлены на рис. 8б.

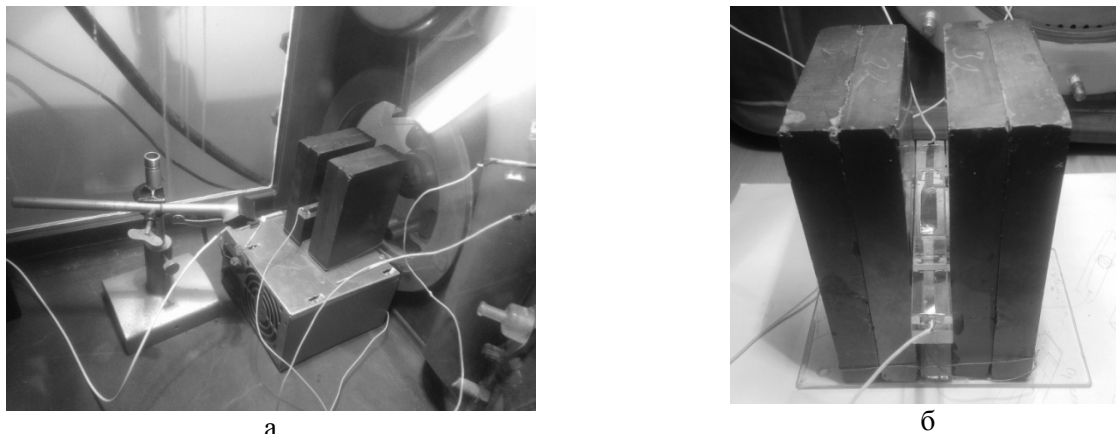


Рис. 8. Общий вид камеры с инертным газом с измерительной ячейкой (а) и медная подложка с токоподводами, размещенная между постоянными магнитами (б)

С помощью описанной установки изучено влияние силы Ампера на краевой угол смачивания медной подложки эвтектическим сплавом Ga–Sn.

Фотографии микролитровых капель эвтектического сплава Ga–Sn при различных значениях постоянного тока через подложку и каплю в магнитном поле $B = 1800 \text{ Гс}$ показаны на рис. 9.

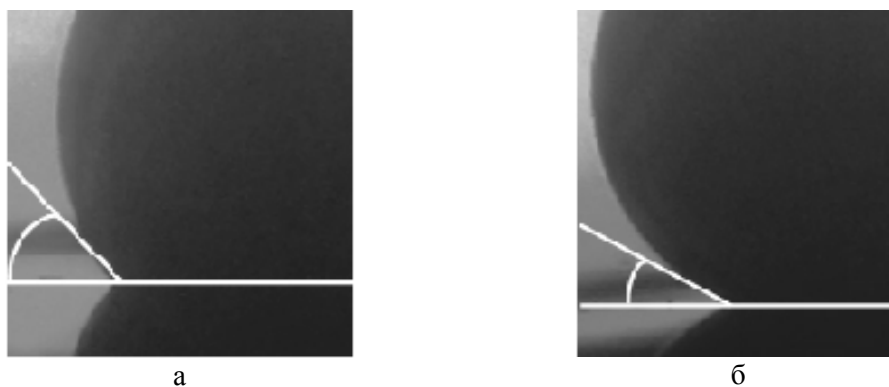


Рис. 9. Фотографии контура микролитровых капель эвтектического сплава Ga–Sn в магнитном поле при значениях постоянного тока $I = 0 \text{ А}$ (а) и $I = 8 \text{ А}$ (б) через подложку и каплю

Зависимость краевого угла смачивания микролитровой каплей сплава Ga–Sn медной подложки от величины постоянного тока приведена на рис. 10, для сравнения там же приводятся результаты теоретических расчетов описанного выше эффекта.

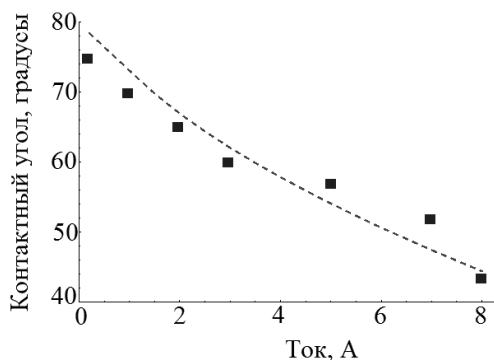


Рис. 10. Зависимость краевого угла смачивания от величины постоянного тока для сплава Ga–Sn. Пунктир – теоретический расчет; квадраты – экспериментальные данные при $B = 1800 \text{ Гс}$

Нами также рассмотрена возможность управления краевым углом смачивания капли с проводящей поверхностью за счет электростатической модификации поверхностной энергии подложки. Для понимания эффекта обуславливающего краевого угла смачивания приведем термодинамический вывод основного соотношения. В изотермическом процессе при малом смещении контура капли изменение свободной энергии F равно $\delta F = \sigma \delta A$, где δA – изменение площади контура. Учтем также, что увеличение площади смачиваемой поверхности ведет к изменению свободной энергии диэлектрической подложки:

$$\delta F = \frac{ED}{8\pi} h \delta A = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} h \delta A, \quad (15)$$

где h – толщина диэлектрического слоя; ε – ее диэлектрическая проницаемость. Изменение площадей поверхности незанятой каплей dA_1 , поверхности капли dA_2 связано с изменением площади основания капли dA соотношениями $dA_1 = dA \cos \theta$, $dA_2 = -dA$. Для полного изменения свободной энергии можно записать:

$$\delta F = \sigma_{12} dA + \sigma_{23} \cos \theta dA - \sigma_{13} dA + \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} h \delta A. \quad (16)$$

Минимуму свободной энергии соответствует $\delta F = 0$, что дает уравнение Юнга с дополнительным электростатическим членом:

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23} \cos \theta + \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} h. \quad (17)$$

Краевой угол θ_0 в отсутствие поля удовлетворяет соотношению:

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23} \cos \theta_0. \quad (18)$$

Исключая из этого уравнения разность $\sigma_{13} - \sigma_{12}$ и замечая, что электрическое поле связано с напряжением соотношением $E = (V - V_0)/h$, из (17) получаем формулу:

$$\cos \theta = \cos \theta_0 - \frac{\varepsilon}{8\pi h \sigma} (V - V_0)^2. \quad (19)$$

Для примера мы использовали каплю воды, поверхность которой сделана проводящей за счет малой добавки NaCl. Капля размещалась на тонкой гидрофобной диэлектрической пленке, в качестве которой нами использовался полиэтилен. Пленка с каплей размещена на плоском электроде. Второй электрод в виде тонкой иглы касается верхней части капли, как показано на рис. 11.

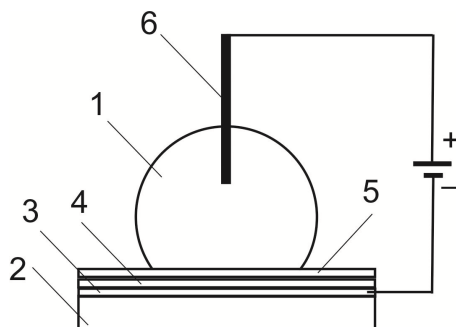


Рис. 11. Схема эксперимента по изучению воздействия электростатических полей на смачивание: 1 – капля исследуемой жидкости; 2 – подложка; 3 – нижний электрод; 4 – тонкий диэлектрический слой; 5 – гидрофобное покрытие (в случае водных растворов); 6 – верхний электрод

На рис. 12 приведены фотографии микролитровых капель воды на полиэтилене при различных напряжениях на капле.

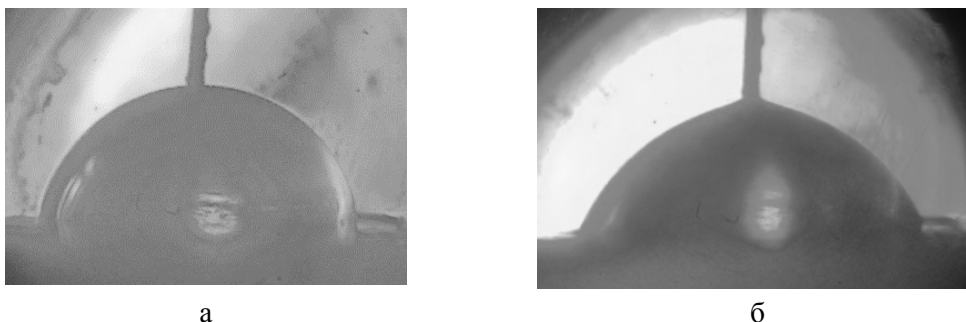


Рис. 12. Контуры капли воды в электростатическом поле: а – $V=0$ В; б – $V=80$ В

Из рисунка видно, что при подаче на каплю напряжения форма контура капли изменяется, и краевой угол смачивания уменьшается. На рис. 13 приведена зависимость от приложенного напряжения краевого угла смачивания капель воды полиэтиленовой пленки толщиной 150 мкм, там же для сравнения приведена теоретическая кривая.

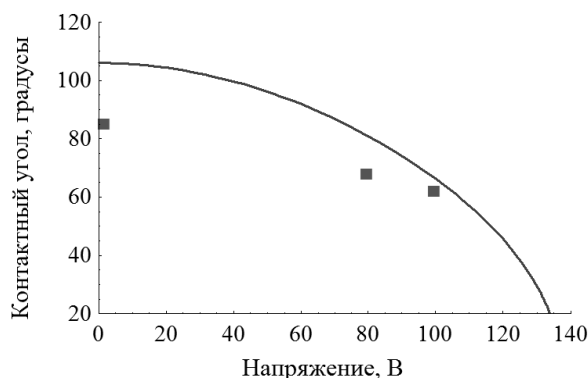


Рис. 13. Зависимость краевого угла смачивания микролитровой каплей воды полиэтиленовой пленки толщиной 150 мкм от величины приложенного напряжения. Сплошная кривая – теоретические значения; квадраты – экспериментальные данные

Приведенные результаты показывают, что описанная в статье экспериментальная установка позволяет комплексно изучать капиллярные свойства микролитровых капель легкоплавких сплавов как динамическим, так и статическим методом.

Методом капиллярных колебаний установлено, что межфазное натяжение эвтектических сплавов Ga–Sn и Ga–In на границе с водными растворами соляной кислоты снижается по сравнению с чистой поверхностью указанных сплавов в вакууме. Это объясняется физико-химическими процессами, протекающими на межфазной границе сплав–раствор HCl. В случае сплава Ga–Sn эффект выражен сильнее. Регулируя скорости восстановления поверхности капли расплава и адсорбции хлоридов галлия на межфазной границе путем подбора концентрации соляной кислоты, можно в определенных пределах контролировать величину межфазной энергии капли легкоплавкого сплава.

Результаты, полученные методом «лежащей капли» в магнитном поле, показывают перспективность предложенной нами методики для управления смачиванием металлических подложек микрокаплями галлиевых сплавов в технологиях пайки и пропитки. Для обоих изученных составов даже в относительно слабых магнитных полях при пропускании тока через подложку до 10 А удастся изменить краевой угол смачивания почти на 30° .

Данные по электростатической модификации смачивания проводящими жидкостями диэлектрических подложек, представленные в статье, также можно использовать для влияния на краевой угол смачивания. В случае микролитровой капли воды с малой добавкой соли на гидрофобной подложке при подаче напряжения менее 100 В краевой угол смачивания уменьшается на 10° .

Необходимо отметить, что теоретические модели, использованные в работе для описания динамики жидкой капли и процессов смачивания в электростатических и электромагнитных полях, во всех случаях дают хорошее согласие с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-01042 а и гранта Фонда содействия инновациям № 0038507.

Библиография

1. Majidi L., Gritsenko D., Xu J. Gallium-based room-temperature liquid metals: actuation and manipulation of droplets and flows // *Front. Mech. Eng.* 2017. V. 3. P. 1–7.
2. Zhao X., Xu S., Liu J. Surface tension of liquid metal: role, mechanism and application // *Front. Energy.* 2017. V. 11. P. 535–567.
3. Хоконов Х.Б., Хатажуков А.С. Эффект совместного влияния электрического тока и магнитного поля на капиллярное течение жидких металлов // *Адгезия расплавов и пайка материалов.* 1982. № 9. С. 3–5.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т. VI. 736 с.
5. Lamb H. *Hydrodynamics.* Cambridge University Press, 1932. 752 p.
6. Давыдов А.С. *Квантовая механика.* М.: Наука, 1973. 704 с.
7. Kokonov A.Kh. Liquid drop model of spherical nuclei with account of viscosity // *Nucl. Phys. A.* 2016. V. 945. P. 58–66.
8. Sergeev I.N., Khokonov A.Kh., Akhmatov Z.A. Experimental setup for determining the surface tension of highly curved interfaces by static and dynamic methods // *Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter; Abs. 34 Int. Conf. M.: ОИВТ РАН, 2019. P. 250.*
9. Сергеев И.Н., Хоконов А.Х., Ахматов З.А. Измерение межфазного натяжения микролитровых капель галлия на границе с водой методом капиллярных колебаний // *Микро- и нанотехнологии в электронике: мат. XI Межд. конф. 2019. С. 331–335.*
10. Хоконов А.Х., Сергеев И.Н., Ахматов З.А. Определение поверхностного натяжения жидкости методом резонансной раскочки капиллярных колебаний лежащей капли // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: мат. 5 Межд. конф. 2019. Т. 2. С. 233–238.*
11. Русанов А.И., Прохоров В.А. *Межфазная тензиометрия.* СПб.: Химия, 1994. 400 с.

СТРУКТУРИРОВАНИЕ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ

*Жазаева Е.М., Шадов З.О., Тхакахов Р.Б.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

*zhazaeva@list.ru

Исследовано влияние отжига и закалки на структуру, степень кристалличности, межфазное натяжение и прочность композиций на основе бутадиенового каучука и полиэтилена низкой плотности (СКД-35/ПЭНП). Обнаружено, что под действием термообработки меняется морфология смеси, степень кристалличности полиэтилена; происходят конформационные изменения макромолекул эластомера.

Ключевые слова: полиэтилен, термообработка, степень кристалличности, межфазное натяжение, прочность.

THE STRUCTURING OF THE MIXTURES ON THE BASIS OF CRYSTALLIZABLE POLYMERS UNDER THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT

Zhazaeva E.M., Shadov Z.O., Tkhakakhov R.B.

Kabardino-Balkarian State University

The effect of annealing and hardening on the structure, crystallinity, interfacial tension and strength of compositions based on butadiene rubber and low density polyethylene (SKD-35/LDPE) was studied. It was found that under the influence of heat treatment, the morphology of the mixture, the degree of crystallinity of polyethylene changes; conformational changes of elastomer macromolecules occur.

Keywords: polyethylene, heat treatment, crystallinity, interfacial tension, strength.

Новый комплекс свойств полимеров может формироваться под действием термической модификации или введением различных наноразмерных наполнителей. Это прежде всего связано с адсорбционными или молекулярными, сегментальными взаимодействиями, которые ответственны за адгезию на межфазной границе. Различные физические, механические и другие свойства материалов зависят от особенностей морфологии и структуры полимерной смеси [1–4].

В данной работе изучено влияние термической обработки на морфологию и степень кристалличности смесей на основе бутадиенового эластомера СКД-35 с полиэтиленом низкой плотности (ПЭНП). Образцы готовились на смесительно-валковом оборудовании с последующим прессованием при температуре 418 К и давлении 100 атм. Полученные смеси термостатировались при температуре 393 К в течение 4 часов. Затем часть образцов медленно охлаждали со скоростью 0,03 град/с (отжиг), а другую часть – со скоростью 5 град/с (закалка).

Исследование морфологии в проходящем поляризованном свете показало, что ПЭНП с СКД-35 образуют гетерогенные смеси, причем более дефектная структура наблюдается для отожженных, нежели для закаленных образцов [5]. Это связано с превращением одних изомеров СКД (1,2-изомер, 1,4-цис и 1,4-транс) в другие (рис. 1) и с изменением кристаллической фазы ПЭНП, наблюдаемых на полученных термограммах дифференциальной сканирующей калориметрии (рис. 2, 3).

Ярко выраженным зависимостям колебаний γ_{ω} ($=\text{CH}$) СКД от стерического расположения заместителей соответствуют характеристические полосы (рис. 1). Эти полосы лежат при следующих значениях волновых чисел: для 1,2-изомера при 910 см^{-1} , для транс-1,4-изомера при 967 см^{-1} , для цис-1,4-изомера вблизи 740 см^{-1} . Также для цис-1,4-изомера соответствуют полосы поглощения при 1000,

1311, 1408, 1660 см^{-1} , для – 1264 см^{-1} , для транс-1,4-изомера – 1355 см^{-1} . Интенсивность полос, относящихся к транс-1,4- и 1,2-изомерам, уменьшается после закалки, и увеличивается интенсивность цис-1,4-изомера, что обусловлено переходом одних изомеров в другие под действием термообработки.

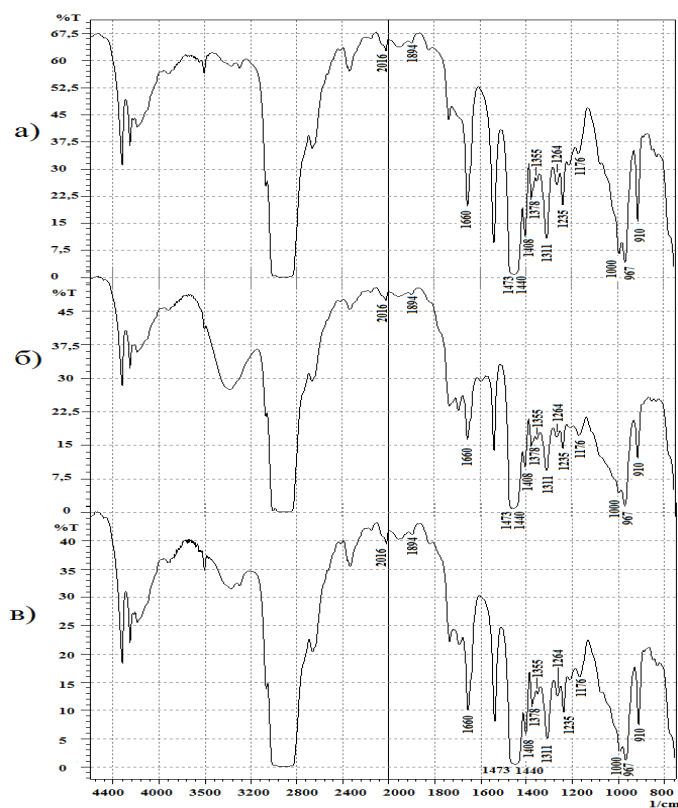


Рис. 1. ИК-спектры смеси 50 масс. % СКД-35 + 50 масс. % ПЭНП:
а) до термообработки; термостатированные в течение 4 часов
с последующим охлаждением со скоростью: б) 5 град/с; в) 0,03 град/с

Поглощение при волновых числах 2016, 1894, 1473, 1440, 1378, 1176 см^{-1} относится к функциональным группам полиэтилена. Интенсивность полос при 2016, 1894, 1176 см^{-1} связана с колебаниями функциональных групп в кристаллической фазе ПЭНП.

Изменение кристаллической фазы ПЭНП также хорошо видно из термограмм дифференциальной сканирующей калориметрии, на которых пик плавления под действием термообработки смещается в сторону более высоких температур, расширяется, выходя на плато, у закаленных образцов смеси (рис. 2).

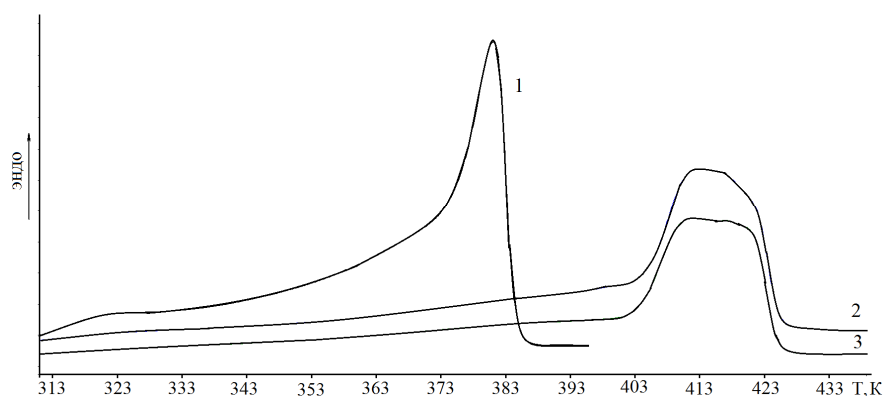


Рис. 2. Термограммы ДСК для образцов ПЭНП до термообработки (1), термостатированные в течение 4 часов с последующим охлаждением со скоростью 0,03 град/с (2) и 5 град/с (3)

Степень кристалличности ПЭНП уменьшается от 53,79 для исходных образцов до 52,53 для закаленных и 48,02 для отожженных (таблица), и соответствующий вид термограмм ДСК после термообработки отличается от термограмм исходных образцов. При длительной выдержке при температуре 293 К выше температуры плавления кристаллов ПЭНП формируются более совершенные кристаллы, что приводит к увеличению температуры плавления ПЭНП. У отожженных образцов пик плавления на ДСК-термограмме более острый, нежели у закаленных образцов (рис. 2), что связано с укрупнением кристаллитов в процессе медленного охлаждения, а при охлаждении со скоростью 5 град/с кристаллиты не успевают объединяться в большие кристаллические образования.

Таблица

Результаты обработки данных ДСК для смеси ПЭНП/СКД-35

Состав ПЭНП/СКД-35	Температура плавления $T_{пл}$, К			Теплота плавления $\Delta H_{пл}$, кДж/кг			Степень кристалличности K , %		
	исход	отож.	зак.	исход	отож.	зак.	исход	отож.	зак.
100/0	108,1	140,1	138,8	157,6	140,7	153,9	53,8	48,0	52,5
50/50	106,9	107,7	107,2	88,6	91,7	91,4	30,2	31,3	31,2
10/90	106,3	107,8	104,8	12,2	3,7	5,8	4,2	1,4	2,0

Сложность точного определения степени кристалличности для ПЭ заключается в правильном выборе границ интегрирования, т.к. необходимо определить изменение энтальпии во всем интервале плавления, который весьма широк.

В смеси смещение пика плавления в сторону высоких температур незначительно (рис. 3). Возможно, молекулы аморфной фазы при высоких температурах СКД-35 препятствуют образованию кристаллитов.

Степень кристалличности смеси 50 масс. % ПЭНП + 50 масс. % СКД-35 незначительно возрастает после термообработки, а пик температуры плавления увеличивается примерно на один градус (таблица).

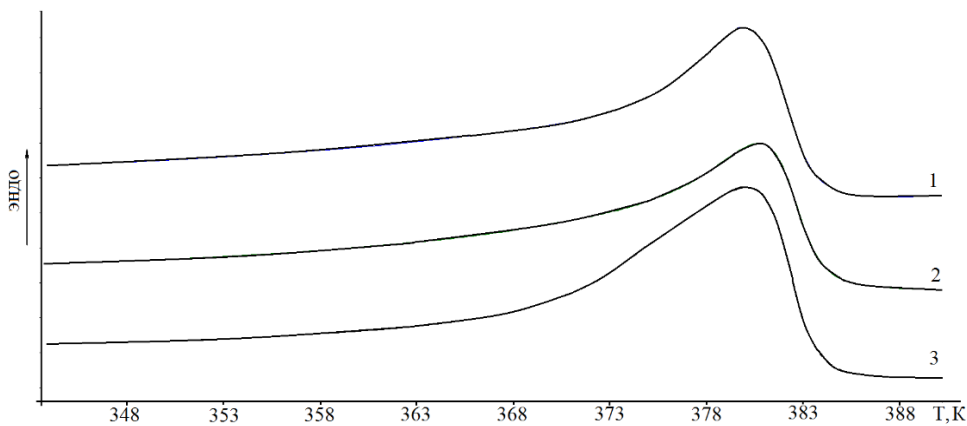


Рис. 3. Термограммы ДСК для образцов смеси 50 масс. % ПЭНП + 50 масс. % СКД-35 до термообработки (1), термостатированные в течение 4 часов с последующим охлаждением со скоростью 0,03 град/с (2) и 5 град/с (3)

Внешне пики плавления образцов, охлажденных со скоростью 5 град/с, шире, чем пики плавления исходных образцов и охлажденных со скоростью 0,03 град/с. Это связано с образованием множества различных видов кристаллов при быстром охлаждении, что приводит к более дефектной структуре и понижению прочности при разрыве (рис. 4).

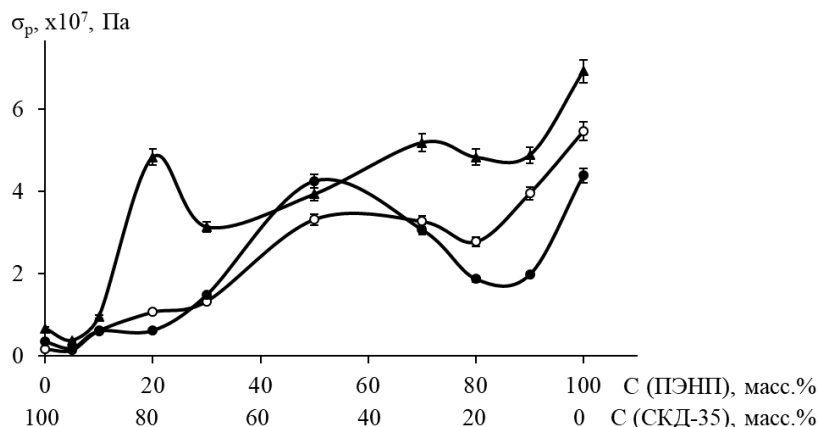


Рис. 4. Зависимость прочности композиции СКД-35/ПЭНП от концентрации для образцов до термообработки (\blacktriangle), термостатированных в течение 4 часов с последующим охлаждением со скоростью 0,03 град/с (\bullet) и 5 град/с (\circ)

Прочность композиций изменяется не пропорционально увеличению содержания ПЭНП в смеси, а проходит через экстремумы. Содержание 20 масс. % ПЭНП в матрице СКД-35 приводит к значительному повышению прочности, что, возможно, связано с инверсией фаз, однако после термообработки происходит падение прочности из-за разделения несовместимых компонентов и образования более дефектной структуры (рисунок 4). При концентрации 50 масс. % СКД-35 – 50 масс. % ПЭНП прочность после отжига возрастает, что связано с совершенствованием кристаллов ПЭНП, упрочняющих эластомер.

Таким образом, методом дифференциальной сканирующей калориметрии обнаружено повышение температуры плавления образцов ПЭНП от 381 К (исходные) до 413 К после отжига и 412 К после закалки, что, по-видимому, связано с совершенствованием кристаллических образований. Пик плавления у термостатированных образцов более широкий, что характерно при наличии разных кристаллов. На примере смеси кристаллизующихся смесей ПЭНП с СКД-35 показано, что закалка приводит к образованию различных кристаллов – об этом свидетельствуют более широкие пики плавления на ДСК-термограммах, а отжиг приводит к росту кристаллических структур, образованию дефектной структуры.

В смесях на основе несовместимых кристаллизующихся компонентов (ПЭНП/СКД-35) имеет место расслоение системы, что подтверждается падением значений прочностных характеристик под действием термообработки.

Библиография

1. Кулезнев В.Н. Смеси и сплавы полимеров. СПб: Научные основы и технологии, 2013. 216 с.
2. Zhazaeva E.M., Al Khaulyani Y.F.M., Tkhakakhov R.B., Shomakhov A.V. The morphology and strength of composites based on an isoprene elastomer and polyethylene, modified with fillers of different nature // International Polymer Science and Technology. 2016. V. 43, N 6. С. 35–38.
3. Pshikhachev A.G., Tkhakakhov R.B., Zhazaeva E.M., Karamurzov B.S., Tkhakakhov E.R. The effect of nanosized fillers on the structure and on the deformation and strength characteristics of polymer blends based on nitrile butadiene rubber and polyvinyl chloride // International Polymer Science and Technology. 2013. V. 40, N 8. С. 23–27.
4. Zhazaeva E.M., Pshikhachev A.G., Gubzhev T.A., Gekkieva Z.M., Tkhakakhov R.B. Surface energetic and strength characteristics of heat-treated composites based on butadiene-acrylonitrile elastomer modified with carbon black // International Polymer Science and Technology. 2013. V. 40, N 6. P. T. 33–T37.
5. Тхакахов Р.Б., Жазаева Е.М., Пшихачев А.Г., Темрокова О.Х., Губзев Т.А. Структура и деформационно-прочностные свойства смесей СКД-35 с ПЭВД под действием термической обработки // Новые полимерные композиционные материалы: мат. V Межд. конф. Нальчик, 2009. С. 212–215.

ОТ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ СТЕКЛА В XX ВЕКЕ К ШИРОКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ БИОСИТАЛЛОВ В ТЕКУЩЕМ СТОЛЕТИИ

^{1,2}Старцев Ю.К.

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

startsevyuk@yahoo.com

Выполнен анализ развития тематики химстойкости стекол за предыдущие сто лет. Показано, что именно это направление исследований привело к появлению нового класса материалов – биоматериалов, среди которых одно из важнейших мест занимают стоматологические имплантаты из ситалла.

Ключевые слова: стекло, химстойкость, ситалл.

FROM RESEARCH OF GLASS CHEMICAL RESISTANCE IN XX CENTURY TO WIDESPREAD USING OF BIOGLASS-CERAMICS FOR NOWDAYS

^{1,2}Startsev Yu.K.

¹Saint-Petersburg` State Institute of Technology

²Saint-Petersburg` State University of Civil Aviation

Analysis of the development of subjects of chemical resistance of glass for the previous hundred years was made. It was shown that this line of research has given rise to a new class of materials – biomaterials, – among them one of the most important is occupied by dental implants from glass-ceramics.

Keywords: glass, chemical resistance, glass-ceramics.

На протяжении вот уже столетия одним из основных направлений исследования свойств и создания новых стекол является исследование поверхности стекла и его химической устойчивости [1]. С развитием химии, особенно аналитической и физической химии, требования к стеклу становились строже. Для точных химических анализов и физических работ потребовалось стекло, как можно более стойкое в воде и различных химических реактивах. Известные к началу XX века йенские стекла, отличавшиеся такими ценными для химической практики свойствами, как тугоплавкость, устойчивость против расстекловывания (кристаллизации) при обработке в пламени горелки, термостойкость и устойчивость к действию кислых реагентов, превосходили все другие стекла, благодаря чему быстро приобрели славу среди химиков.

Это был блестящий результат долгой систематической работы, в которой Отто Шотт, владелец завода, поставил цель изучить влияние состава стекла на его устойчивость при действии химических реагентов, изменяя не только количественный, но и качественный его состав, вводя в стекло борный и фосфорный ангидриды, оксиды бария, магния, лития, цинка и др. Русские химики также оценили достоинства йенских стекол и предпочитали их тому единственному стеклу, которое варили на заводе Риттинга. Это заставило владельца завода обратиться к В.Е. Тищенко с просьбой заняться улучшением качества химического стекла. От подражания йенским стеклам Тищенко воздержался, так как йенские стекла сильнее других стекол растворялись в едком натре и аммиаке [2].

По литературным данным, известным на ту пору, во многих отношениях полезным оказывается введение в состав стекла оксида алюминия. Замена части оксида калия или натрия глиноземом в эквивалентном количестве уменьшает растворимость стекла в воде без ущерба для других качеств стекла. При замене части кремнезема 7–8 % оксида алюминия снижается температура варки стекла, а

введение в состав стекла борного ангидрида способствует еще большему снижению этой температуры и, кроме того, снижает коэффициент расширения и повышает термостойкость стекла.

Учитывая это, Тищенко рассчитал составы шихты для 400 варок, прежде чем остановился на составах трех стекол: № 13 состава $3(R_2O \cdot CaO) \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, № 23 состава $(R_2O \cdot CaO \cdot 6SiO_2) \cdot (R'_2O \cdot R_2O \cdot CaO \cdot 6SiO_2)$, № 24 состава $(R_2O \cdot R_2O \cdot CaO \cdot 6SiO_2) \cdot (R'_2O \cdot R''_2O \cdot CaO \cdot 6SiO_2)$, где R и R' = K и Na, а R'' = Al или B, причем K, Na, Al и B входили в стекло в различных отношениях. Эти три стекла завод Риттинга начал варить в 1900 году.

Новые стекла быстро приобрели хорошую репутацию у русских химиков. Они подвергались тщательному изучению параллельно с лучшими иностранными образцами. По устойчивости к воде, слабой серной кислоте и соде они оказались близкими к йенскому, а по отношению к едкому натру и аммиаку – лучше йенского. Особенно широкое применение нашло стекло № 23, из которого делали химическую посуду и баллоны электровакуумных приборов (рентгеновские трубки, радиолампы и др.), так как по коэффициенту расширения оно было очень близко к платине и платиниту и хорошо с ними спаивалось.

Вскоре было положено начало многочисленным исследованиям химстойкости стекол [3], продолжающимся до сих пор (2019 г.) и имеющим широкий спектр практических приложений – от элементов оптических устройств и очистки вакцин до импрегнированных оптических элементов [4]. В Государственном оптическом институте И.В. Гребенщиковым и Т.А. Фаворской [5] работы в этом направлении проводились, начиная с 1925 года. Ими была определена химстойкость многих тогдашних сортов стекла, исследовано влияние закалки на это свойство. И.В. Гребенщиков считал, что на огненнополированной поверхности стекла, не подверженной дальнейшей обработке, создается слой поверхностноактивных молекул кремнезема, вследствие чего сильно возрастает химическая устойчивость поверхности, в то время как внутренние слои обнаруживали сильное разрушение с образованием макропенки из кремнезема.

При последующей термической обработке происходит выравнивание концентрации щелочей в поверхностном слое и внутренних слоях стеклянных изделий, вследствие чего поверхность неотожженных изделий представляется более устойчивой по сравнению с отожженными в нейтральной атмосфере.

Развитие этого направления оказалось связанным с совершенно новым классом материалов – термопластических материалов – и породило новых специалистов в стекольном материаловедении: биоматериаловедов.

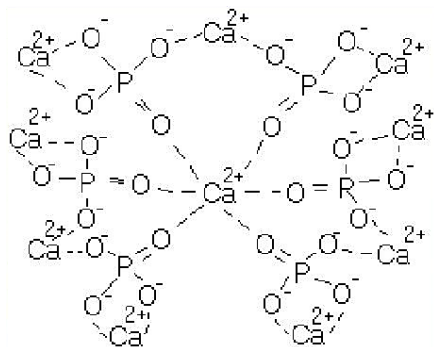


Рисунок. Структурная формула гидроксиапатита

В первую очередь, биоматериалы синтезировали из кристаллических фосфатов кальция, содержащих в качестве кристаллических фаз синтетические аналоги биоминералов костной ткани человека. Комплекс материалов на основе спеченного гидроксиапатита (ГАПа) – стехиометрического состава $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ – не удовлетворил всех по результатам применения (рисунок). Цикл исследований по изучению поведения культур остеобластов и остеокластов, выполненных в 90-е годы XX века биоматериаловедами, многое прояснил в механизмах остеогенеза и взаимодействия костной ткани с остеозамещающими материалами.

Сати с соавт. [6], изучавшие поведение культуры остеобластов на подложках из ГАПа, выявили, что остеобла-

сты прикрепляются к подложке с помощью наноразмерных фокальных контактов плазмалеммы (10–15 нм), при этом рецепторы клеточного комплекса взаимодействуют с последовательностью -Арг-Гли-Сер- с адсорбированными на поверхности подложки белковыми веществами. Клетке для того, чтобы начать реализовывать свои потенции, всегда надо прикрепиться к подложке и распластаться.

Бици [7] установил, что слой около 1 мкм уже достаточен для прикрепления, и лучше, если это будут остеонектины, остеопонтины – белки, продуцируемые остеобластами. Изучение процесса функционирования остеобластов показало, что он не отличается от такового же в объеме нормальной костной ткани при репаративном остеогенезе. Секретируемый бластами биополимер костного матрикса, появляющийся в пограничной зоне с подложкой ГАПа, минерализуется за счет тех же остеобластов.

Не менее важной функцией этих клеток-строителей, помимо секреции костного белкового матрикса, является «изготовление» зародышей кристаллов биоминералов костной ткани – нестехиомет-

рического карбоксигидроксиапатита, т.е. ГАПа с включенным в его структуру карбоксиланионом. Природа предусмотрела возможность большей растворимости, возможность кальциевого баланса между скелетом и средами организма и, самое главное, участие микрокристаллов костной ткани (в развертке их суммарная поверхность превышает 2000 м^2) в поддержании равновесия $\text{CO}-\text{CO}_2$ – важнейшего параметра дыхания организма.

Образование биоминерала клетка–остеобласт проводит в специальной структуре, за слоем внутриклеточной мембраны. На внутреннем слое везикулы откладываются комплексы фосфолипидов и молекулы фосфата кальция. Когда процесс формирования заканчивается, клетка открепляет везикулу. Она, окруженная 3-слойной мембраной, имея в диаметре 1 мкм, появляется в зоне клеточно продуцированного белкового матрикса.

Щелочная фосфатаза – основной фермент остеобласта – гидролизует эфиры фосфатов. Продуктом этого расщепления выступает ортофосфат PO_4^{3+} (устойчивый при $\text{pH} > 7$) – основное условие функционирования остеобласта, который реагирует с Ca^{2+} с образованием аморфного и нестехиометрического ГАПа. На внутренней поверхности везикул увеличение размеров зародышей микрокристаллов приводит к тому, что оболочка везикулы разрывается. Фосфолипаза и пептидаза ферментативно способствуют деградации везикул. Ингибитор процесса – $\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$ – пирофосфат-анион расщепляется пирофосфатазой. Этот механизм предложен на основе исследований Хэма и Кармана [8], обнаруживших в везикулах Mg^{2+} , щелочную фосфатазу, фосфолипиды, интегральные пептидазы, АТФ-азы и т.д. Рост кристаллов в дальнейшем происходит по типу эпитаксиального наслаивания, очень похожего на один из наиболее распространенных технологических приёмов в микроэлектронике.

Оптимальными остеокондукторами выступают материалы, имитирующие сотово-ячеистую архитектуру спонгиозы с обычной для нее пористостью. Менее выражены остеокондукторные свойства у кортексных структур с параллельными каналами длиной 200–250 мкм, соединенными отрезками длиной 170–180 мкм и диаметром пор 120 мкм [9, 10].

Процесс деградации остеопротектора (защитника, обеспечившего оптимальные условия организации ткани, но не захватчика утраченного костью пространства) в идеале должен быть синхронизирован с прохождением основных этапов остеогенеза и не должен завершаться ранее стадии ремоделирования новообразованной кости.

В последние годы замечены активные попытки создания синтетических остеопластических материалов, обладающих остеокондуктивными и остеопротекторными свойствами на основе различных веществ, в том числе и устойчивых к таким атакам. Примером может служить известная НТР – на основе производных ПММА и соединений кальция или керамики на основе $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, или $\text{BaCa}_3(\text{PO}_4)_2$ с различным соотношением этих составляющих, регулирующих скорость деградации как за счет физико-химического растворения, так и в результате клеточно опосредованных разрушений. В качестве альтернативных остеопластических материалов синтетические полимерные материалы рассматриваются достаточно давно.

В конце 80-х годов XX века были найдены бифазные остеокристаллические материалы. На поверхности этих стеклокристаллических материалов, синтезированных, как правило, в силикофосфатных стеклообразных системах с модификаторами – оксидами щелочных или щелочноземельных металлов и содержащих в результате направленной кристаллизации микрокристаллы – синтетические аналоги биоминералов костной ткани, не затруднены процессы адгезии распластывания, дифференцировки преостеобластов, равно как и деятельность самих клеток-строителей, а также без затруднений проходит процесс разрушения кислотонестойкого каркаса.

Продукты деградации – ионы кремния, магния, фосфора, кальция, цинка и другие остеотрофные вещества необычайно положительно влияют на процессы строительства новой костной ткани. Клиницисты отмечают возросшие параметры структуры и плотности новообразованной кости, заместившей имплантат. Поэтому для решения практических задач эффективного остеозамещения в современных разделах восстановительной, реконструкционной хирургии, челюстно-лицевой хирургии, имплантологии, пародонтологии большое значение придается выбору остеопластического материала с требуемым комплексом остеоиндуктивных, кондуктивных, протекторных свойств.

При реконструктивно-хирургических вмешательствах на разных отделах скелета, в т. ч. при лечении позвоночника, может быть использован хирургический костный имплантат из биоситалла, основной кристаллической фазой которого является карбогидроксилапатит (даллит) – синтетический аналог биоминерала кости человека, в котором новым является то, что он изготовлен многослойным путем совмещения слоев биоситалла различной структуры при соотношении объема сетчато-

ячеистых остеокондуктивных слоев и объема мелкопористых несущих слоев 1:4 – 2:3, а для изготовления биоситалла исходные компоненты взяты в следующем соотношении, мас. %: SiO_2 – 29,6-31,5; Al_2O_3 – 4,9–5,2; $\text{Ca}_3(\text{PO}_3)_2$ – 14,6–15,3; CaCO_3 – 41,3–44,5; MgO – 2,4–2,6; ZnO – 4,0–4,2 [11].

Хирургический имплантат обладает возможностями оптимизировать сроки получения положительного результата операции в различных участках скелета за счет изменения соотношения объемов со-вмещенных слоев. Прочная остеоинтеграция имплантата не является препятствием для проявления костной тканью всех ее морфогенетических потенций: граница соединения имплантат–кость доступна физиологической репарации – ремоделированию в течение всего срока пребывания имплантата в организме.

Решение задач остеозамещения у каждого пациента индивидуализировано и по показаниям, и по экономическим возможностям. Модифицировать свойства имплантатов можно, используя сочетание гранулированных фракций остеозамещающих материалов с биополимерами разной природы, белковыми продуктами, лекарственными средствами, за счет которых, наряду с указанными выше свойствами, имплантат приобретает антисептические свойства. Само по себе имплантирование материала в дефект, где представлен широкий спектр микроорганизмов, как грамотрицательных, так и грамположительных и т.д., проблематично. На сегодняшний день наиболее часто применяемыми препаратами для решения задач остеозамещения выступают синтетические материалы, эффективно сочетающие доступность (невысокие цены) и гарантированные производителем свойства.

Все материалы для взаимодействия с биосистемами организма (в том числе и стоматологические протезирующие материалы) должны быть тестированы, и должна быть оценена степень их биоактивности. В этих случаях говорят о биоинертности, что в общем-то некорректно, так как абсолютно инертных материалов не бывает. Здесь в качестве альтернативы при протезировании большого с массой интеркуррентных заболеваний выступают биоситаллы. Ведь именно в этом классе материалов можно создать протезирующие материалы, сочетающие такие свойства, как согласование по коэффициентам термического расширения с тканями зуба и высокую термостойкость, механическую стойкость, химическую устойчивость не только к средам полости рта, но и к «кухонным» кислотам, при замечательных оптических свойствах – основе эстетических характеристик протезов зубов.

Достижения мирового биоматериаловедения позволяют в настоящее время без особых затрат на разработку выпускать стеклокристаллические материалы для реставраций разрушенных зубов (так называемые «литьевые» ситаллы). Следовательно, нужно получить стеклокристаллические материалы (биоситаллы) для высокоэстетичного протезирования. В СПбГТИ(ТУ) имеется определенный опыт создания подобных конструкций. Проявит ли интерес промышленность и потребители к ним, покажет время.

Библиография

1. Старцев Ю. К. Исследования стекла в России. СПб.: СПбГТИ (ТУ), ВВМ, 2009. 364 с.
2. Тищенко В.Е. О качестве химического стекла // ЖПХ. 1929. Т. 2, № 1. С. 3–19.
3. Дуброво С.К. Стекло для лабораторных изделий и химической аппаратуры. Л.: Наука, л1965. 110 с.
4. Старцев Ю.К. Новые приемы синтеза стекол, как следствие изучения процессов фазового разделения в оксидных расплавах // Известия КБГУ. 2019. Т. 9, № 4. С. 8–11.
5. Гребенщиков И. В., Фаворская Т.А. О влиянии закалки стекла // Тр. ГОИ. 1929. Т. 5. Вып. 45.
6. Sautier J.M., Nefusi J.R., Forest N. Surface-reactive biomaterials in osteoblast cultures: An ultra-structural study // Biomaterials. 1992. V. 13, No 6. P. 400–402.
7. Bizios R. Mini-rview: osteoblasts: an in vitro model of bone-implant interactions // Biotechnology and Bioengineering. 1994. V. 43, No 7. P. 582–585.
8. Хэм А., Кормак Д. Костная ткань // Гистология. 1983. Т. 3. С. 19–131.
9. Лысенко Л.Н. Остеоинтеграция: молекулярные, клеточные механизмы // Клиническая имплантология и стоматология. 1997. № 2. С. 59–63.
10. Лысенко Л.Н. Остеогенез и возможности остеозамещения // Клиническая имплантология и стоматология. 2001. № 3-4. С.107–111.
11. Патент РФ 2175249. Хирургический костный имплант / Лысенко Л.Н., Самохвалова Т.И., Елагина И.А., Гайдар Б.В., Орлов В.П. / подача заявки: 1999-04-13, публикация патента: 27.10.2001

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Бориев А.А., *Пшихачев А.Г., Тхакахов Р.Б.

Кабардино-Балкарский Государственный Университет им. Х.М. Бербекова

*zorik007@yandex.ru

Изучены динамические механические свойства смесей полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с натрий-бутадиеновым каучуком (СКБ) и проведен расчет параметров процессов релаксации.

Ключевые слова: полиэтилен, каучук, процессы релаксации.

FEATURES OF DYNAMIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF MODIFIED LOW DENSITY POLYETHYLENE

Boriev A.A., Pshihachev A.G., Tkhakakhov R.B.

Kabardino-Balkarian State University

The dynamic mechanical properties of mixtures of low density polyethylene (LDPE) with sodium butadiene rubber (SKB) were studied and parameters of relaxation processes were calculated.

Keywords: polyethylene, rubber, relaxation processes.

Механические свойства полимерных материалов существенным образом зависят от их строения, а также от особенностей молекулярно-кинетических процессов, определяемых характером теплового движения. Изучение явлений механической релаксации в полимерах позволяет оценивать эксплуатационные свойства полимерных материалов и устанавливать взаимосвязь между химическим и физическим строением полимеров, молекулярной подвижностью и другими макроскопическими свойствами полимеров [1–3].

В данной работе были изучены динамические механические свойства смесей ПЭНП с СКБ и проведен расчет параметров процессов релаксации. Исследования были проведены в широком интервале температур, который охватывает области стеклования обоих полимеров. Среди динамических методов исследования был выбран резонансный метод, реализованный на приборе ЯП [4].

На рис. 1–3 приведены температурные зависимости тангенса угла механических потерь $tg\delta$ и динамического модуля упругости E смесей ПЭНП с СКБ.

Изменение концентрации компонентов оказывает существенное влияние на формирование динамических механических свойств смесей полимеров [5, 6]. В особенности оно влияет на температурное положение, высоту и полуширину максимумов тангенса угла механических потерь.

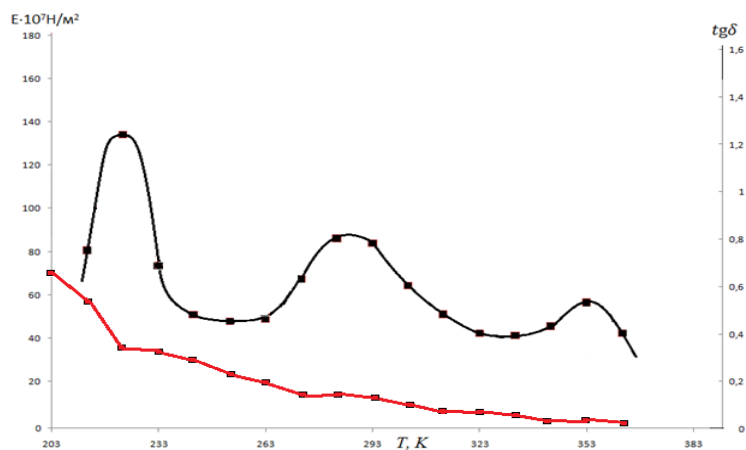


Рис. 1. Температурные зависимости модуля упругости и тангенса угла механических потерь смеси ПЭНП–СКБ (20 мас. %–80 мас.%) при частоте $2,5 \cdot 10^{-2}$ Гц

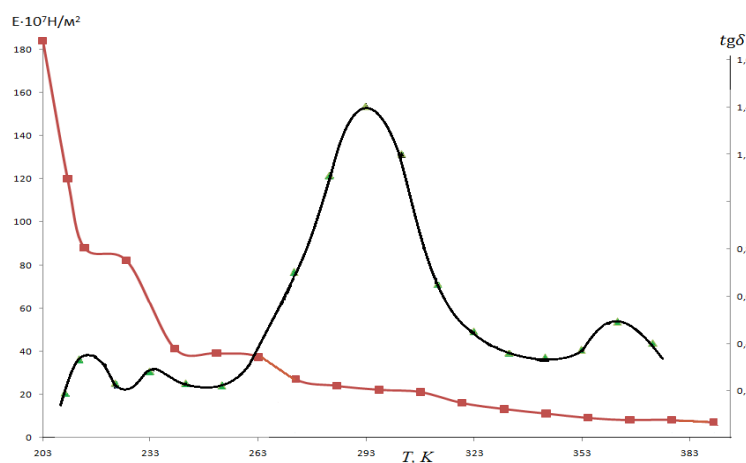


Рис. 2. Температурные зависимости модуля упругости и тангенса угла механических потерь смеси ПЭНП–СКБ (50 мас. % – 50 мас.%) при частоте $2,5 \cdot 10^{-2}$ Гц

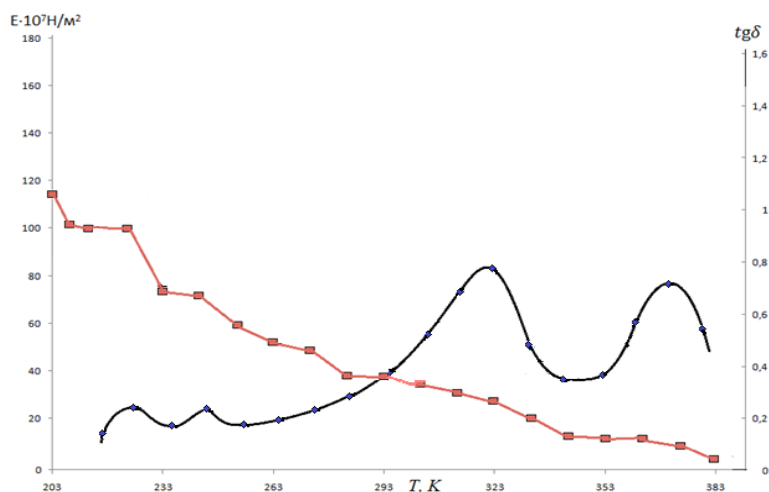


Рис. 3. Температурные зависимости модуля упругости и тангенса угла механических потерь смеси ПЭНП–СКБ (80 мас. % – 20 мас.%) при частоте $2,5 \cdot 10^{-2}$ Гц

Увеличение концентрации ПЭНП в смеси способствует возрастанию значений динамического модуля упругости. Возрастание E не плавное, а скачкообразное. При содержании ПЭНП более 20 и 80 в.ч. наблюдается скачок значений динамического модуля. Это связано с тем, что свойства системы

на основе ПЭНП и СКБ определяются взаимодействием структур исходных компонентов и переходного слоя. Зависимость E от доли ПЭНП в смеси характерна для гетерогенных смесей полимеров [7], что может быть связано с наличием развитого переходного слоя в смеси.

Уменьшение концентрации СКБ приводит к уменьшению соответствующего ему α_1 -максимума и сдвигу всех трех α_1 -, α' -, α_2 -максимумов в область высоких температур. При возрастании доли эластомера α_2 -процесс проявляется при более низкой температуре, что можно объяснить возрастанием эффекта пластификации ПЭНП каучуком. Изменение температурного положения α' -процесса может быть связано с изменением соотношения компонентов в промежуточной фазе.

Данные термомеханического метода исследования хорошо коррелируют с результатами исследования динамических механических свойств смесей ПЭНП с СКБ. Как видно из рис. 4, на термомеханических кривых проявляются по три изгиба. Низкотемпературные и высокотемпературные максимумы соответствуют областям стеклования эластомера и жесткоцепного полимера, а экстремумы в области переходного слоя связаны с подвижностью различных кинетических единиц в нем. Промежуточные максимумы на температурных зависимостях $\text{tg } \delta$ смесей ПЭНП с СКБ можно трактовать аналогично α' -процессу, обнаруженному Г.М. Бартеневым и Н.М. Лялиной [8, 9] для эластомеров, наполненных активным наполнителем, который связан с подвижностью кинетических единиц в слое полимера, адсорбированном на наполнителе.

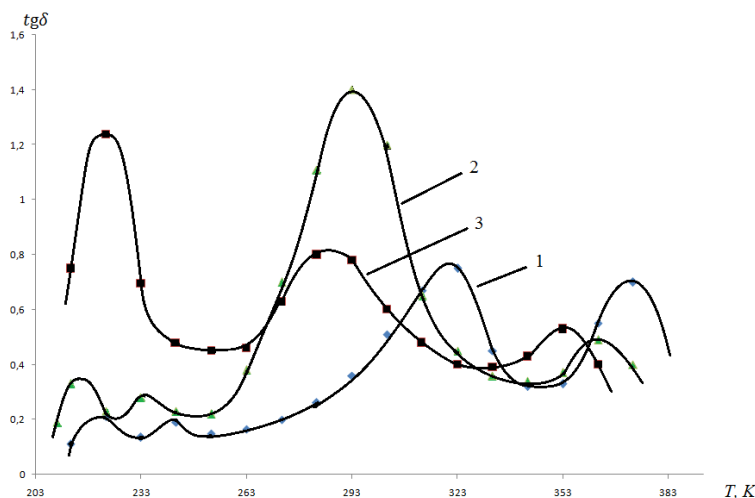


Рис. 4. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь для смесей: 1 – ПЭНП (80 мас.%) – СКБ (20 мас.%); 2 – ПЭНП (50 мас.%) – СКБ (50 %); 3 – ПЭНП (20 мас.%) – СКБ (80 мас.%) при частоте $2,5 \cdot 10^{-2}$ Гц

В смеси ПЭНП с СКБ переходный слой образуется путем взаимной диффузии частей макромолекул компонентов, и сегменты эластомера движутся в присутствии (окружении) кинетических единиц ПЭНП.

Динамический механический метод исследования позволяет оценить условную энергию активации различных процессов молекулярной релаксации. Температурное положение областей перехода при разных частотах определялось по максимуму механических потерь или по точке перегиба на температурной зависимости динамического модуля (рис. 5–7), а энергия активации в области стеклования рассчитывалась по зависимости $\lg \nu$ от температуры по формуле:

$$U = \frac{k \ln \nu_1 / \nu_2}{1/T_1 - 1/T_2}. \quad (1)$$

Формула (1) выводится при условии $\omega \tau = 1$ (где ω – частота колебаний; τ – время релаксации).

Из рис. 5 видно, что для смеси ПЭНП (50 мас. %) – СКБ (50 мас. %) увеличение частоты воздействия периодической силы значительно смещает максимумы механических потерь по шкале температур вправо.

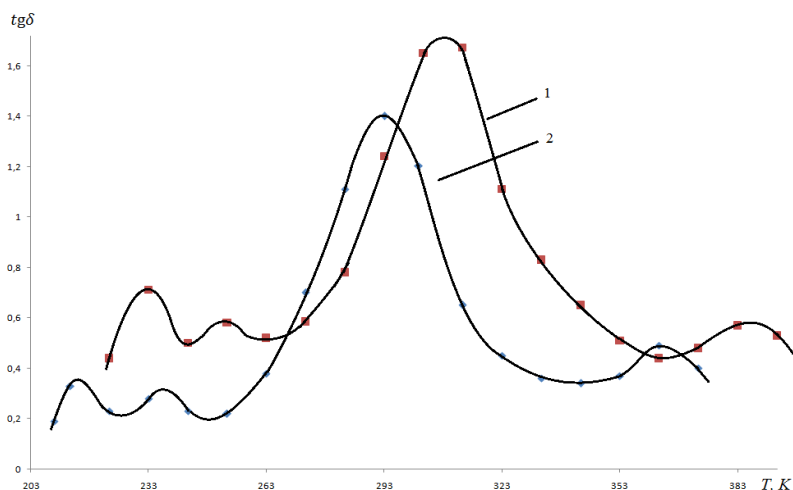


Рис. 5. Температурная зависимость $tg\delta$ для смеси ПЭНП (50 мас. %) – СКБ (50 мас. %) на разных частотах (1 – при частоте $2,5 \cdot 10^{-1}$ Гц; 2 – при частоте $2,5 \cdot 10^{-2}$ Гц)

Аналогичная картина наблюдается и при других концентрациях компонентов. Полученные значения условной энергии активации для кинетических переходов в смесях ПЭНП–СКБ сведены в таблице. В таблице так же приведены значения энергии образования кинетического объема, рассчитанной по формуле:

$$E = \frac{10}{3} kT . \quad (2)$$

Анализ результатов, приведенных в таблице, показал, что для смесей ПЭНП с СКБ в зависимости от величины взаимодействия макромолекул и концентрации компонентов для α_1 -, α' - и α_2 -максимумов значения параметров U и E претерпевают изменения.

Таблица

Значения условной энергии активации процессов молекулярной релаксации U и энергии образования кинетического объема E для смесей ПЭНП+СКБ

Технология смещения ПЭНП+СКБ вес.-%	Для высоко-температурного максимума		Для промежуточного максимума		Для низкотемпературного максимума	
	U , кДж/моль	E , 10^{20} Дж	U , кДж/моль	E , 10^{20} Дж	U , кДж/моль	E , 10^{20} Дж
100–0	–	–	97,31	1,452	96,39	1,682
80–20	89,35	1,104	95,80	1,444	96,01	1,679
50–50	85,61	1,071	93,82	1,347	95,94	1,66
20–80	79,14	1,016	91,14	1,306	94,15	1,587
0–100	74,75	1,007	–	–	–	–

Величина U существенно меняется для α_1 -, α' - и α_2 -максимумов. Условная энергия активации у эластомера меньше, чем для процессов релаксации в ПЭНП и переходном слое. С увеличением доли эластомера в смеси значения условной энергии активации и энергии образования кинетического объема уменьшаются во всех исследованных системах. Это показывает, что эластомер оказывает пластифицирующее действие на ПЭНП, а сегменты ПЭНП, наоборот, затормаживают движение кинетических единиц.

По нашему мнению, это является основной причиной смещения максимумов по шкале температур. Эффективный объем кинетических единиц ПЭНП в смесях ПЭНП с СКБ, содержащих различное число нитрильных групп, изменяется, по-видимому, вследствие пластификации ПЭНП эластомером. Но величина физического взаимодействия оказывает некоторое влияние на энергетические параметры. Это связано с процессами взаимодиффузии молекул. Чем больше объемная доля истинного раствора в смеси, тем больше эффект пластифицирования ПЭНП эластомером и усиление СКБ пластиком.

Библиография

1. Тхакахов Р.Б., Айвазов А.Е., Зеленев Ю.В., Динзбург Е.Н. Исследование молекулярной подвижности в смесях поливинилхлорида с бутадиен-акрилонитрильными эластомерами // Высокомолекулярные соединения. 1980. Т. 22 Б, № 11. С. 843–847.
2. Айвазов А.В. Изучение релаксационных явлений в полимерных композициях: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1970. 148 с.
3. Айвазов А.В., Тхакахов Р.Б., Динзбург Б.Н., Подлесный В.Н., Шитов Б.Г. Современные методы исследования динамических механических свойств полимеров // Полимерные материалы, их применение в народном хозяйстве: тез. докл. конф. Нальчик, 1976. Вып. 3. С. 24.
4. Зеленев Ю.В., Бартенев Г.М., Демишев Г.К. Определение динамических характеристик полимеров резонансным методом // Заводская лаборатория. 1963. № 7. С. 868–872.
5. Менсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия, 1979. 440 с.
6. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. М.: Химия, 1978. 310 с.
7. Кандырин Л.Б. Исследование реологических свойств бинарных смесей полимеров в растворе и в блоке: дисс. ... канд. хим. наук. М., 1971. 158 с.
8. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В., Айвазов А.Б. Динамические свойства композиций полимеров в широком интервале температур при низких и звуковых частотах // Уч. записки МОПИ им. Н.К. Крупской. 1964. Т. 149. Вып. 8. С. 129–135.
9. Слонимский Г.Д., Мусаелян И.Н., Казанцева В.В. О механических свойствах смесей полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6, № 2. С. 219–223.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОГО ГАЛЛИЯ В АТМОСФЕРЕ АЗОТА

¹Алчагиров Б.Б.*, ¹Кясова О.Х., ²Дадашев Р.Х.,
¹Калажоков Х.Х., ¹Хибиев А.Х., ²Элимханова Д.З.

¹*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*
²*Академия наук Чеченской Республики*

*alchg@kbsu.ru

В работе методом большой лежащей капли с использованием автоматизированной экспериментальной установки, позволяющей фиксировать достаточно быстрые изменения поверхностных свойств конденсированных фаз в условиях протекания адсорбционных процессов, изучено поверхностное натяжение галлия в вакууме и атмосфере азота. Показано, что в пределах погрешности измерений (2 %) высокочистый азот не оказывает влияния на поверхностное натяжение галлия.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, галлий, вакуум, азот, межфазная граница, метод большой лежащей капли.

SURFACE TENSION OF LIQUID GALLIUM IN A NITROGEN ATMOSPHERE

¹Alchagirov B.B., ¹Kysova O.Kh., ²Dadashev R.Kh.,
¹Kalazhokov Kh.Kh., ¹Khibiev A.Kh., ²Elimkhanova D.Z.

¹*Kabardino-Balkarian State University*
²*Academy of Sciences of the Chechen Republic*

The surface tension of gallium in a vacuum and nitrogen atmosphere is studied in the work by the method of a large lying drop using an automated experimental setup, which makes it possible to record fairly rapid changes in the surface properties of condensed phases under conditions of adsorption processes. It is shown that high-purity nitrogen does not affect the surface tension of gallium within the measurement error (2 %).

Keywords: surface tension, gallium, vacuum, nitrogen, interphase boundary, large lying drop method.

Введение. Галлий и его интерметаллические соединения, обладающие уникальными полупроводниковыми свойствами, используются в солнечных батареях, поскольку солнечные элементы, например из GaAs, стойки к космической радиации. Сплавы на основе галлия применяются для «холодной пайки» различных материалов, в качестве рабочей жидкости для высокотемпературных термометров и манометров и т.д. В перспективе предполагается использование жидкого галлия и сплавов на его основе в качестве теплоносителей ядерно-энергетических комплексов с повышенной безопасностью [1, 2]. Для лучшего понимания природы многих физико-химических процессов, имеющих место на межфазных границах жидких металлов с газами, данные о поверхностном натяжении (ПН) порой имеют определяющее значение. В настоящей работе решается вопрос о степени возможного влияния газообразного азота – одного из основных компонентов воздуха – на поверхностное натяжение жидкого галлия.

Состояние проблемы. В литературе имеется мало исследований, посвященных изучению ПН жидкого галлия в различных газовых атмосферах и средах [3–9], к тому же большинство из них были получены устаревшими и малонадежными методами на экспериментальных установках и с оборудованием, которые не могли в то время обеспечить достаточно быстрые изменения ПН, часто имеющие место при изучении адсорбционных процессов на поверхностях металлов и сплавов. Более того, во многих работах использовались приборы и измерительные ячейки с шлиф-кранами из стекла для регулировки параметров газовой среды и т.п., что весьма нежелательно при измерениях ПН высокоак-

тивных жидких металлов, и тем более для изучения адсорбционных процессов. Поэтому имеющиеся в литературе сведения о поверхностном натяжении галлия на границах с различными газовыми средами плохо согласуются между собой [3–9].

Одними из первых измерение ПН галлия было выполнено Ричардсом и Бойером [3], которые установили, что в атмосфере углекислого газа при 303 К ПН Ga составляет 358 мН/м. В работе [4] по форме профиля неподвижно висящей капли определили, что ПН чистого галлия в атмосфере водорода и углекислого газа в температурной области 303–313 К составляет около 735 мН/м.

На рис. 1 представлены результаты работы [6] по определению в атмосфере азота ПН двух типичных (из изученных 20 капель) образцов высокочистого галлия в зависимости от времени. Эксперименты проводились методом висящей капли в диапазоне температур 4–40 °С. Заметим, что капли галлия были получены с использованием шприца с наконечником из стекла пирекс, внутренний и внешний диаметры которого составляли 1 и 2 мм соответственно. Согласно [6], при 40 °С ПН галлия каждого из двух образцов в начальный момент времени составили 818 и 792 мН/м.

После начала экспозиции поверхностей капель галлия в атмосфере азота в течение 15 минут началось понижение величины ПН галлия, и через полтора-два часа ПН приняло постоянное значение 723 мН/м, которое фактически не изменилось до конца опытов, длившихся соответственно 10 и 22 часа для каждого из двух образцов галлия. К сожалению, авторы [6] получили малое количество экспериментальных точек, особенно в начальный период времени. На наш взгляд, работа [6] в основном носит качественный характер, а полученные в ней данные не обладают достаточной надежностью. По нашему мнению, основной причиной столь сильного влияния газообразного азота на ПН галлия, обнаруженного в [6], может быть недостаточная чистота использованного авторами [6] газообразного азота, т.е. наличие примесей с заметной активностью.

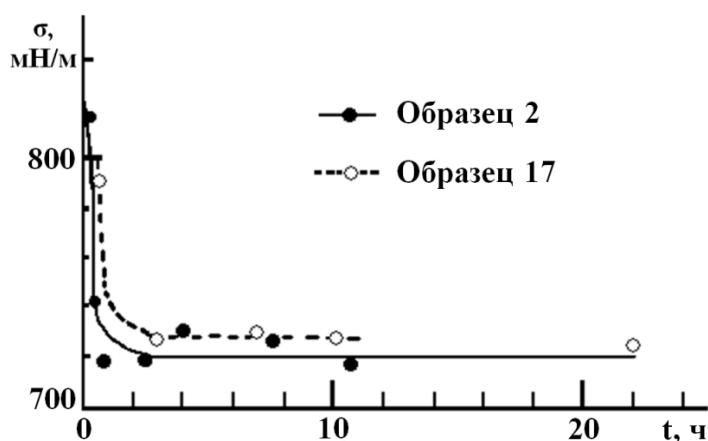


Рис. 1. Поверхностное натяжение двух образцов как функция времени [6]

Наиболее систематические исследования ПН легкоплавких металлов, в том числе и жидкого галлия, в различных газовых атмосферах проводились в работах [7–9], в которых измерения осуществлялись последовательно в вакууме и газовой среде при давлении около 720 мм рт.ст. по методу «большой» капли при температуре 333 К. Расчеты ПН велись по несколько устаревшей методике и таблицам Хантадзе и др. [10, 11]. Погрешность измерений ПН составила около 1 %. Следует сразу отметить, что по объективным причинам (отсутствие в 80-е годы прошлого столетия совершенной электронно-вычислительной техники и видеоаппаратуры и т.п.) у авторов [7, 8] не было практической возможности вести высокоскоростные съемки изображений жидких капель галлия и набора необходимых объемов статистических данных об изменениях ПН в результате адсорбционных процессов.

Но, с другой стороны, в то время вполне можно было воспользоваться скоростной фото- и/или киносъемкой для фиксации изображений капель, которые в то время широко применялись. Вместо этого для получения фотоизображений профилей капель авторы [7, 8] отдали предпочтение и использовали фотопластинки на стеклянной основе форматом 9 x 12 см, пригодные лишь для съемок малоподвижных объектов. Для фиксации изменений ПН металлов в результате адсорбционных процессов они практически оказались малопригодными, поскольку процесс ручной перезарядки фотокассет занимает много времени, и в лучшем случае по данной технологии удается фиксировать лишь несколько фотоизображений профилей капель в минуту.

Полученные в работе Б. Унежева и др. [7, 8] результаты представлены на рис. 2 в виде графика зависимости ПН от возраста капли в вакууме при постоянной температуре 333 К. Как видно на рис. 2, за первые две минуты после начала измерений ПН галлия в вакууме авторам [7, 8] удалось отснять лишь одну-две фотографии исследуемых образцов галлия.

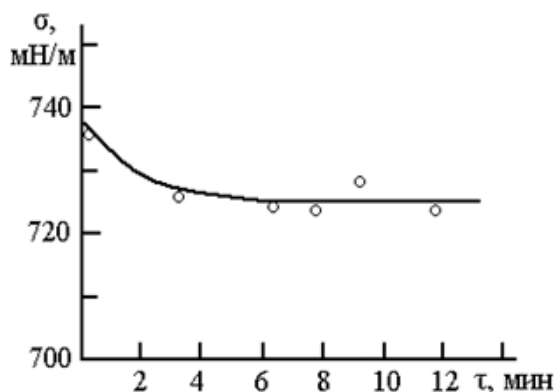


Рис. 2. Поверхностное натяжение галлия при 333 К в зависимости от возраста капли в вакууме по данным [7, 8]

На наш взгляд, малое количество экспериментальных точек (всего две) на изотерме ПН галлия, полученное авторами [7, 8] в первые несколько минут после начала измерений не позволяет уверенно делать вывод об уменьшении ПН галлия на 10 мН/м в вакууме. Более того, для действительно чистых металлов время установления равновесного значения ПН в условиях высокого вакуума не должно превышать нескольких секунд. На наш взгляд, уменьшение ПН галлия в вакууме могло произойти в результате недостаточно высокого вакуума в измерительной ячейке, а также недооценки авторами погрешностей своих измерений. Об этом, как будет отмечено ниже, свидетельствуют также и данные измерений авторами [7, 8] поверхностного натяжения галлия в атмосфере азота при постоянной температуре 333 К (рис. 3, темные треугольники).

Материалы и методика эксперимента. В настоящей работе использована цельно-паяная измерительная ячейка и автоматизированная экспериментальная установка, обеспечивающие возможность отслеживания быстрых изменений ПН металлических расплавов как в статическом вакууме, так и в условиях протекания адсорбционных процессов на их поверхностях [12, 13]. Измерения ПН жидкого галлия марки Ga-00 на границе с собственным насыщенным паром и атмосфере высокочистого азота (99,999 об.% по ГОСТ 9293-74) при температуре 400 К осуществлены методом большой капли [14] на одной и той же поверхности большой осесимметричной капли галлия [11].

Блок-схема установки, состоящей из воздушного термостата с установленной внутри него измерительной ячейкой, программно-аппаратного комплекса «SigmaDrop», катетометра В-630, осветителя и блоков питания, достаточно подробно описана в работе [13]. Измерения ПН осуществлялись в непрерывном режиме на одной и той же поверхности капли галлия последовательно, сначала в условиях статического вакуума, а затем – в атмосфере высокочистого сертифицированного азота. Погрешность определения ПН галлия составила около 2 %.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 показана полученная нами на первом этапе измерений изотерма (373 К) ПН галлия в зависимости от времени экспозиции в вакууме. Для сравнения с нашими данными на этом же рисунке, как отмечалось выше, представлены также результаты измерений ПН галлия в вакууме, полученные в работе Б. Унежева и др. [7, 8] (темные треугольники). На рис. 3 видно, что наши данные о ПН галлия в вакууме (736,5 мН/м, светлые кружочки) и данные [7, 8] (729,5 мН/м) в пределах ошибки экспериментов представляют собой прямые линии и находятся в удовлетворительном согласии. Отметим, что согласно наиболее надежным рекомендуемым литературным данным о ПН галлия в вакууме (Б. Киине [15], В. Ниженко и Л. Флока [16], Б. Алчагиров и др. [17]), вблизи температуры плавления составляют 724,5, 706 и 718 мН/м соответственно.

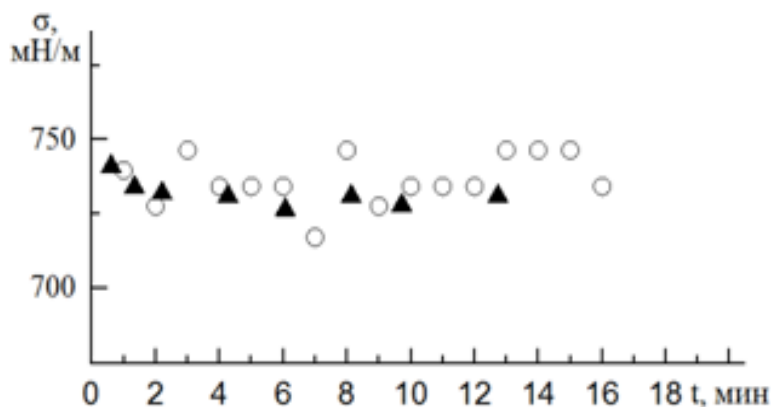


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения галлия от времени экспозиции в вакууме:
○ – данные настоящей работы; ▲ – данные [7, 8]

В последней (по хронологии) работе 2014 года, посвященной измерению ПН галлия в вакууме методом большой капли, было получено значение ПН, равное 724 мН/м [18].

На рис. 4 графически представлены результаты наших измерений ПН галлия в зависимости от времени экспонирования в атмосфере азота, на котором видно, что после вскрытия ампулы с газообразным азотом и заполнения измерительной ячейки до давления около 700 мм рт.ст. ПН галлия практически не изменилось в сравнении с его величиной в вакууме в течение одного часа и в среднем составило 730 мН/м.

Интересно отметить, что в момент вскрытия железным бойком ампулы с газом произошла небольшая встряска прибора, приведшая к еле заметному механическому колебанию поверхности исследуемой жидкой капли. Однако данный инцидент не привел к потере устойчивости и падению капли, но четко отразился в виде «всплеска» величины ПН галлия в зависимости от времени (рис. 4). При этом амплитуда «всплеска» значений ПН галлия составила около 170 мН/м, что значительно превышает погрешность наших измерений ПН (2 % или ± 8 мН/м) и свидетельствует о высокой чувствительности экспериментальной установки к любым изменениям поверхностного натяжения.

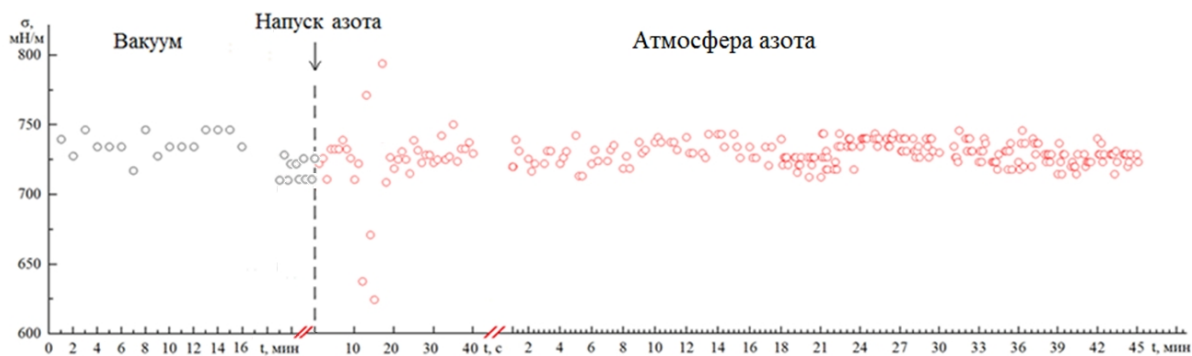


Рис. 4. Поверхностное натяжение галлия в атмосфере азота (в сравнении с вакуумом)

На рис. 5 показана полученная в настоящей работе изотерма (373 К) ПН галлия в зависимости от времени экспозиции в атмосфере азота. Для сравнения на этом же рис. 5 представлены результаты измерений ПН галлия в атмосфере азота при постоянной температуре 333 К, полученные в работе Б. Унежева и др. [7, 8] (темные треугольники). На рис. 5 видно, что данные о ПН галлия в обеих работах находятся в удовлетворительном согласии. На наш взгляд, малое количество экспериментальных точек на изотерме ПН галлия, полученное авторами [7, 8] в первые секунды после начала адсорбции молекул азота на поверхности галлия, не позволяет достаточно уверенно делать вывод о некотором уменьшении ПН галлия. Согласно же нашим данным, на порядок превосходящим количество экспериментальных точек, полученных в [7, 8], можно утверждать, что в пределах ошибки эксперимента адсорбция молекул азота не оказывает заметного влияния на ПН жидкого галлия.

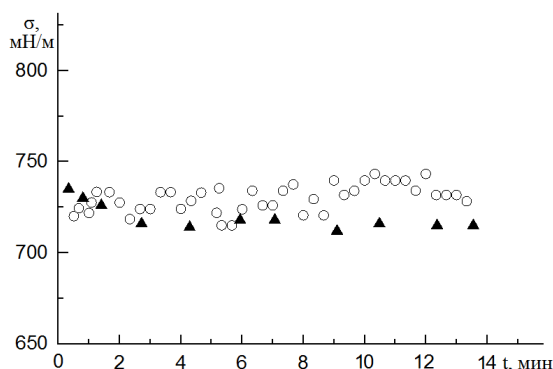


Рис. 5. Поверхностное натяжение галлия в атмосфере азота: ▲ – данные [7, 8], ○ – наши данные

Таким образом, изучение возможного влияния газообразного азота высокой чистоты на поверхностное натяжение галлия на современной автоматизированной установке методом большой капли показывает, что в пределах погрешности эксперимента в 2 % часовая экспозиция поверхности галлия в атмосфере высокочистого азота не влияет на величину ПН и остается таким же, как и в условиях статического вакуума. Данный вывод согласуется с теоретическими оценками и расчетами влияния инертных газов на ПН металлов на основе электронно-статистической теории С.Н. Задумкина [19], показывающими, что степень влияния инертных и малоактивных газов на ПН жидких металлов находится в пределах точности современных методов измерения ПН жидких металлов.

Выводы

1. Показано, что в пределах погрешности измерений (2 %) высокочистый азот не влияет на поверхностное натяжение галлия.
2. Отсутствие влияния азота на величину поверхностного натяжения галлия при невысокой температуре (473 К) можно объяснить малой активностью высокочистого газообразного азота.

Библиография

1. Яценко С.П., Данилин В.И. Физико-химические свойства сплавов на основе галлия. М.: Наука, 1974. 220 с.
2. Прохоренко В.Я., Рощупкин В.В., Покрасин М.А., Прохоренко С.В., Котов В.В. Жидкий галлий: перспективы использования в качестве теплоносителя // ТВТ. 2000. Т. 38, № 6. С. 991–1005.
3. Richards T.W., Boyer S. Further studies concerning gallium. Its electrolytic behavior, purification, melting point, density, coefficient of expansion, compressibility, surface tension and latent heat of fusion // J. American Chemical Society. 1921. V. 43, No. 2. P. 274–294.
4. Mack G.L., Davis J.K., Bartell F.E. The boundary tension of gallium // J. Physical Chemistry. 1941. V. 45, No 5. P. 846–851.
5. Алчагиров Б.Б., Калажоков Х.Х., Куршев О.И., Хоконов Х.Б. Влияние адсорбции паров воды на поверхностное натяжение и работу выхода электрона галлия, ртути, индия, олова, кадмия, свинца и таллия // Адгезия и контактное взаимодействие расплавов. Киев: Наукова думка, 1988. С. 53–57.
6. Abbaschian G.J. Surface tension of liquid gallium // J. Less Common Metals. 1975. V. 40, No 3. P. 329–333.
7. Унежев Б.Х., Задумкин С.Н., Карашаев А.А. Влияние газовой среды на поверхностное натяжение жидких металлов // Электрохимия и расплавы. М.: Наука, 1974. С. 111–118.
8. Задумкин С.Н., Махова М.М., Унежев Б.Х. Влияние низкотемпературной плазмы водорода на поверхностное натяжение галлия и индия // Электрохимия. 1978. Т. 14, № 2. С. 303–306.
9. Задумкин С.Н., Унежев Б.Х., Махова М.М. Влияние степени заполнения на поверхностное натяжение при полимолекулярной адсорбции // ЖФХ. 1978. Т. 52, № 5. С. 445–447.
10. Хантадзе Д.В., Оникашвили Э.Г., Тавадзе Ф.Н. Некоторые приложения теории капиллярности при физико-химическом исследовании расплавов. Тбилиси: Мецниереба, 1971. 116 с.
11. Русанов А.И., Прохоров В.А. Межфазная тензиометрия. СПб.: Химия. 1994. 400 с.

12. Алчагиров Б.Б., Альбердиева Д.Х., Дадашев Р.Х., Хибиев А.Х., Элимханов Д.З. Прибор для изучения влияния газовой атмосферы на поверхностное натяжение металлов и сплавов // Вестник АН ЧР. 2016. № 4 (33). С. 5–13.

13. Алчагиров Б.Б., Дышекова Ф.Ф., Коков З.А. Автоматизированная экспериментальная установка для определения быстрых изменений поверхностного натяжения жидкометаллических расплавов и краевых углов смачивания ими поверхностей твердых тел // Приборы. 2017. № 2. С. 18–28.

14. Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х. Метод большой капли для определения плотности и поверхностного натяжения металлов и сплавов. Нальчик: КБГУ, 2000. 94 с.

15. Keene В. J. Review of data for the surface tension of pure metals // Mater. Int. Rev. 1993. V. 38. P. 157–192.

16. Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 208 с.

17. Alchagirov A.B., Alchagirov B.B., Taova T.M., Khokonov Kh.B. Surface energy and surface tension of solid and liquid metals. Recommended values // Transactions JWRI, Osaka University, Japan, 2001. V. 30. Special Issue. P. 287–291.

18. Алчагиров Б.Б., Дышекова Ф.Ф., Дадашев Р.Х., Бетуганова Ф.М., Элимханов Д.З. К вопросу о температурной зависимости поверхностного натяжения чистого галлия // Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы: тр. Межд. симп. 2014. С. 213–214.

19. Задумкин С.Н., Темроков А.И., Шебзухова И.Г., Алиев И.М. Взаимосвязь между поверхностными и другими свойствами веществ // Поверхностные явления в расплавах. Киев: Наукова думка, 1968. С. 9–20.

**ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ ДОБАВОК НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И КИНЕТИКУ
В БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ
SN–PB, IN–ZN И SN–ZN, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

***Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Тамаев Т.Х., Хотова Л.В.**

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

***dis1@kbsu.ru**

Исследовано влияние примесей Li и Sr на кинетику и структурообразование сплавов в системах Sn–Pb, In–Zn, Sn–Zn, используемых при пайке узлов приборов в электронике. Методом РФЭС показано, что при данных условиях проведения эксперимента и указанных концентрациях примесей лития в свинце и стронция в цинке отсутствуют предпосылки к образованию химсоединений, что объясняется незначительным содержанием примесей. Установлено также, что примеси влияют на кинетику роста фаз в зоне соединения.

Ключевые слова: сплавы, метод РФЭС, химсоединение, кинетика роста фаз.

**EFFECT OF ALKALINE ADDITIVES ON PHASE FORMATION AND KINETICS IN
BINARY METAL SYSTEMS USING SN–PB, IN–ZN AND SN–ZN, USED IN ELECTRONICS**

Akhkubekov A.A., Akhkubekov S.N., Tamaev T.Kh., Khotova L.V.

Kabardino-Balkarian State University

The effect of Li and Sr impurities on the kinetics and structure formation of alloys in the Sn–Pb, In–Zn, Sn–Zn systems used in the soldering of instrument nodes in electronics has been investigated. The XPS method showed that under the given experimental conditions and the indicated concentrations of lithium impurities in lead and strontium in zinc, there are no prerequisites for the formation of chemical compounds. It was also established that impurities affect the kinetics of phase growth in the junction zone.

Keywords: alloys, XPS method, chemical compounds, kinetics of phase growth.

Введение. Важной задачей легирования является повышение коррозионной стойкости соединений металлов, возможность варьирования температурного интервала при пайке легкоплавкими припоями для улучшения взаимодействия при лужении паяемых поверхностей [1]. Припои, слабо взаимодействующие с паяемым металлом, легируют с целью активирования такого взаимодействия. В связи с этим представляется актуальным изучение влияния поверхностно активных примесей различной природы на кинетику и фазообразование в эвтектических системах (контактное плавление (КП)) [2–5], т.к. позволяет управлять свойствами в зоне соединения при контактно-реактивной пайке узлов приборов макро- и микро (нано) электроники. Существенным может оказаться влияние примесей также на температуру соединений [6–8].

Результаты исследований

Система Sn–(Pb + 0,5 атм.% Li). В работе исследовано влияние примесей Li и Sr на кинетику и структурообразование в системах Sn–(Pb + 0,5 атм.% Li), In–(Zn + 0,5 атм.% Sr) и Sn–(Zn + 0,5 атм.% Sr). Методики исследований описаны в работах [7–9].

На рис. 1а, б представлены зависимости квадрата протяженности контактных прослоек (δ^2) и микрошлифы полученных в системе Sn–(Pb+ 0,5атм.% Li) от времени ($\tau=7$ ч) при температуре 186 °С.

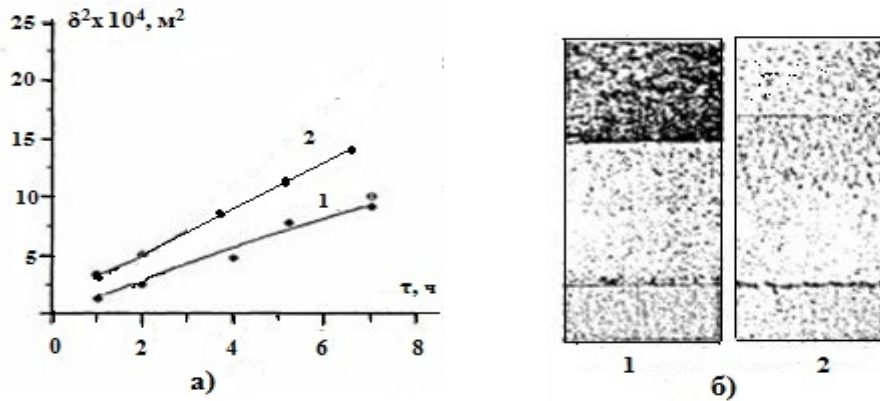


Рис. 1: а – зависимость $\delta^2(\tau)$: 1 – без примеси; 2 – с примесью; б – микрошлифы прослоек: 1– без примеси; 2 – с примесью (x20)

Как видно из рис. 1а, введение примеси Li в Pb ведет к повышению скорости контактного плавления, т.е. к увеличению протяженности контактной прослойки (рис. 1б).

На рис. 1б представлены микрошлифы прослоек системы Sn–(Pb + 0,5 атм.% Li); видно, что наличие примесей ведет к измельчению структуры зоны соединения. Фотографирование шлифов проводилось с помощью микроскопа МБС 9 и цифровой фотокамеры OLIMPUS 5 Мр.

Система In–(Zn+0,5 атм.% Sr). На рис. 2 представлено оптическое изображение исследуемой области образца и направление съемки спектров. Исследовано 15 точек.

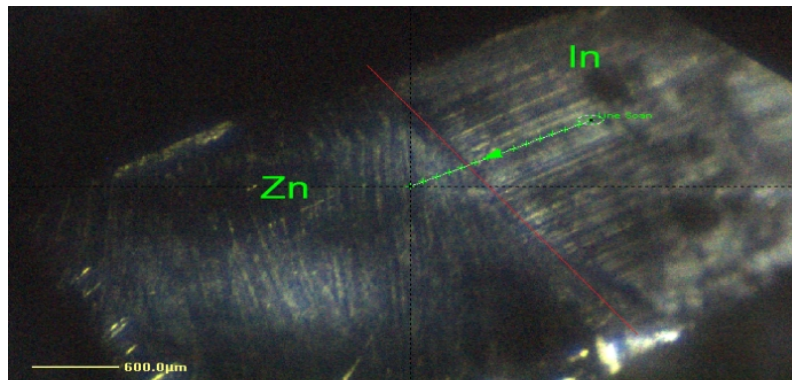


Рис. 2. Оптическое фото шлифа системы In–(Zn+0,5 атм. % Sr)

На рис. 3 представлены спектры сканирования отдельных точек. Запись спектров осуществлялась в условиях сверхвысокого вакуума 10^{-9} мбар, плотность сбора данных для обзорного (спектра) составляла 1 эВ, спектров высокого разрешения 0.1 эВ [10, 11].

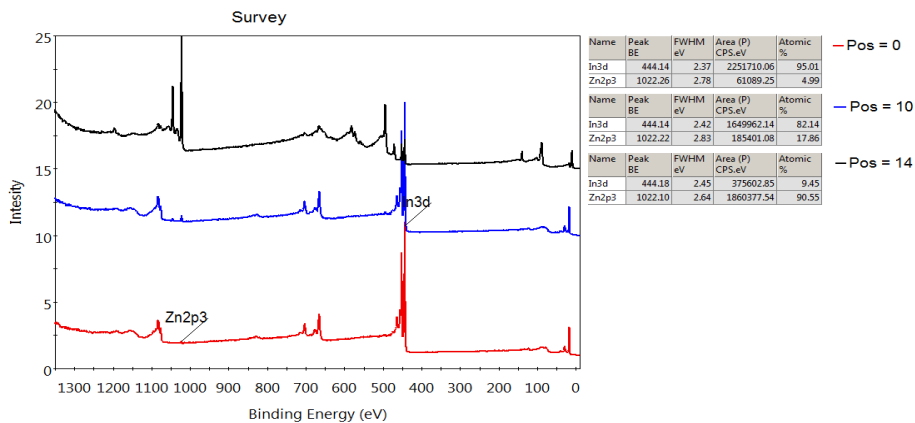


Рис. 3. Спектры сканирования шлифа системы In–(Zn + 0,5 атм.% Sr)

Анализ количественного распределения элементов показывает, что контактная прослойка представляет собой переходную зону, состоящую в большей степени из индия. В то же время это говорит о том, что в контактной прослойке отсутствуют химвзаимодействия компонентов.

Сопоставив интенсивности фотоэлектронных линий для отдельного элемента в каждой точке сканирования, удалось оценить толщину контактного слоя ~ 100 мкм (рис. 4).

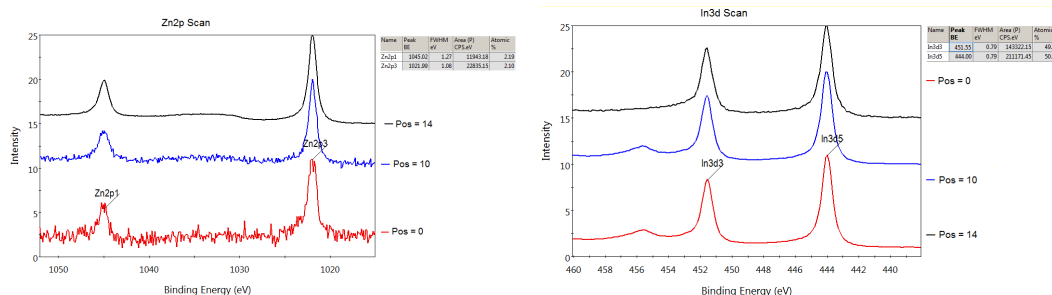


Рис. 4. Фотоэлектронные спектры высокого разрешения In3d и Zn2p

С целью подтверждения вышесказанного был проведен также дополнительный компонентный анализ спектров высокого разрешения фотоэлектронных линий In3d и Zn2p (рис. 4). Из рис. 4 видно, что положение максимумов для линий In3d 5/2 и Zn2p 3/2 соответствует чистым металлам индия и цинка соответственно системе, которое подтверждает указанные выше суждения: плавлению компонентов предшествует образование твердых растворов на границе кристалл–расплав [11].

На рис. 5 представлено концентрационное распределение компонентов в системе In–(Zn + 0,5 атм.% Sr).

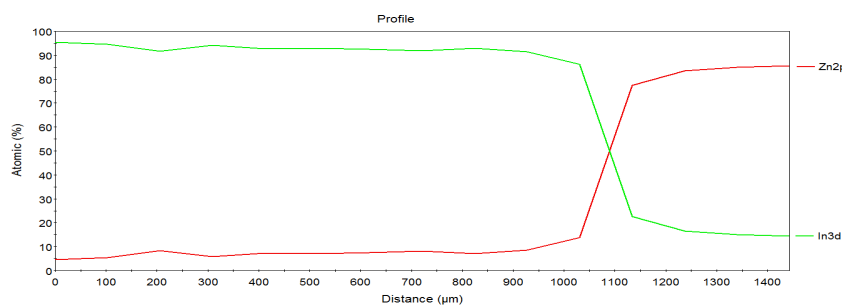


Рис. 5. Концентрационное распределение компонентов в системе In–(Zn+0,5%Sr)

Как видно из рис. 5, изменение концентрации компонентов происходит без образования экстремальных точек (максимума и минимума), что говорит об отсутствии химсоединений.

Представляет интерес исследование механических свойств системы In–(Zn + 0,5 атм.% Sr). На рис. 6 представлены результаты измерения микротвердости контактной прослойки системы In–(Zn + 0,5 атм.% Sr).

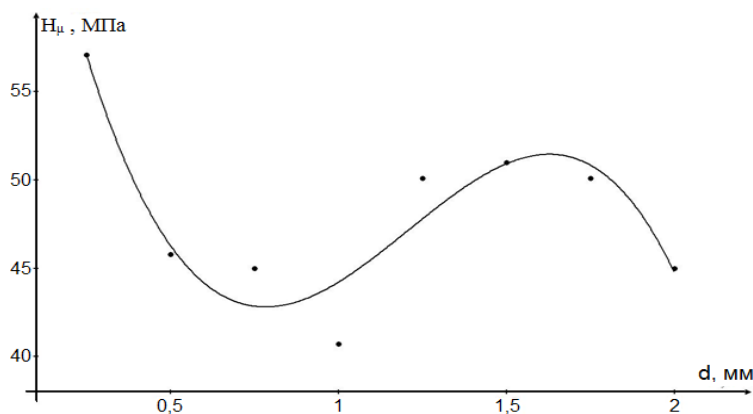


Рис. 6. Микротвердость (H_{μ}) вдоль контактной прослойки, полученной при КП в системе In–(Zn + 0,5 атм.% Sr)

Низкие значения микротвердости прослойки (в пределах 40–60 МПа), по сравнению с микротвердостью цинка (около 500 МПа), говорят о крайне малом содержании цинка в образовавшемся сплаве. При этом зона, граничащая с твердым раствором ($Zn+0,5$ атм.% Sr), твёрже остальной части из-за меньшего количества индия в ней [12]. Правда, дальнейший ход микротвердости трудно объяснить только уменьшением в сплаве содержания цинка, так как сначала эта величина довольно резко падает, а потом немного увеличивается. Можно предположить, что в процессе контактного плавления происходит образование микронеоднородных областей из атомов одного из компонентов (индия).

Система Sn–(Zn + 0,5 атм.% Sr). На рис. 7 представлено изображение области исследования образца.

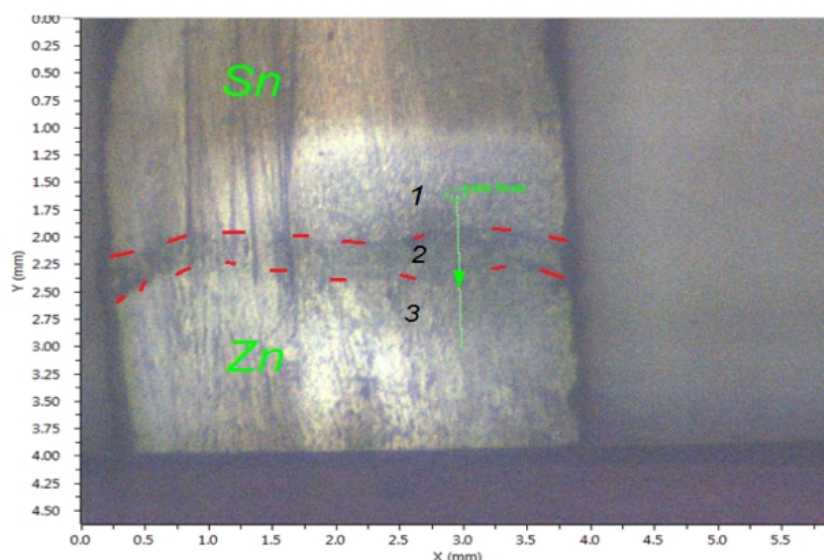


Рис. 7. Оптический шлиф системы Sn–(Zn+0.5%Sr)

Основной состав поверхности в точках 1, 2 и 3 отображен в обзорных спектрах на рис. 8.

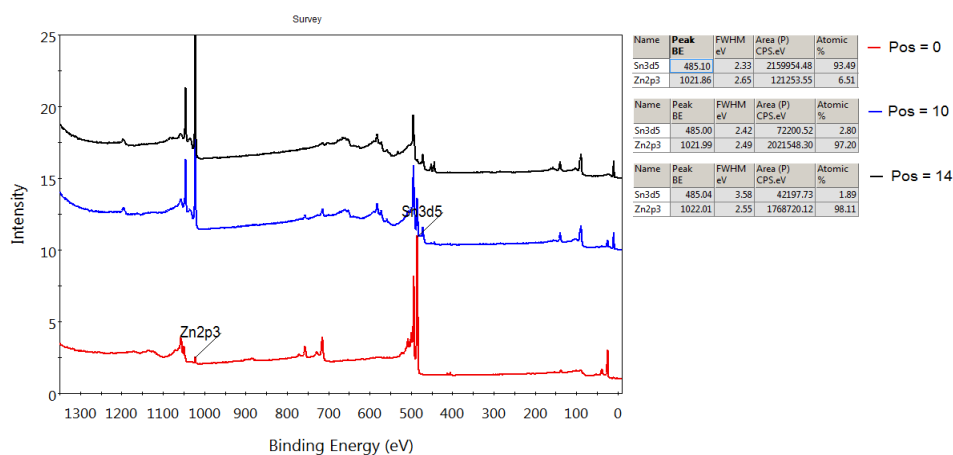


Рис. 8. Обзорный спектр системы Sn/Zn

Сопоставив интенсивности серий фотоэлектронных сигналов для линий олова Sn3d и линий цинка Zn2p в зависимости от расстояния, можно определить ширину контактной области сплава олово–цинк.

Таким образом, исследование контактных прослоек вышеуказанных систем методом РФЭС показало, что при данных условиях проведения эксперимента и концентрации стронция в цинке отсутствуют предпосылки к образованию химсоединений, что объясняется малой примесью стронция, хотя, согласно диаграмме состояния, стронций с индием, оловом и цинком образуют значительное количество химсоединений [14].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00572 мол_а.

Библиография

1. Легкоплавкие припои для пайки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metalliche-skiy-portal.ru>.
2. Багов А.М. Влияние электропереноса на взаимную диффузию и макроскопическое течение расплава, образующегося при контактном плавлении: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик: КБГУ, 2016.
3. Ахкубеков А.А., Савинцев С.П., Багов А.М. Влияние электропереноса на кристаллизацию и макроскопическое течение при контактном плавлении металлов // *Металлы*. 2004. № 4. С. 33–36.
4. Ахкубеков А.А., Савинцев С.П., Багов А.М. О влиянии разности атомных объемов компонентов на взаимную диффузию в двойных жидких сплавах // *Известия РАН. Серия физическая*. 2007. Т. 71, № 2. С. 189–191.
5. Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Зубхаджиев М.А.В., Тамаев Т.Х. Растекание галлия по поверхности контактной прослойки переменного состава системы Pb–Bi // *Известия РАН. Серия физическая*. 2016. Т. 80, № 6. С. 701.
6. Кармоков А.М. Контактное плавление в эвтектических композициях и сложных системах: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1978. 19 с.
7. Ахкубеков А.А., Орквасов Т.А., Созаев В.А. Контактное плавление металлов и наноструктур на их основе: монография. М.: Физматлит, 2008. 152 с.
8. Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Зубхаджиев М.А.А., Мамаева Ж.М. О снижении температуры контактного плавления в металлических системах с интерметаллидами // *Известия РАН. Серия физическая*. 2010. Т. 74, № 5. С. 681–685.
9. Ахкубеков А.А., Карамурзов Б.С., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Василян Р.И. Понижение температуры контакта при взаимодействии однородных и разнородных металлов, не образующих интерметаллиды // *Известия РАН. Серия физическая*. 2011. Т. 75, № 8. С. 1146–1149.
10. Худяков М.А. *Материаловедение*. Уфа: УГНТУ, 2006. 162 с.
11. Wagner C. D. et al. *Handbook of x-ray photoelectron spectroscopy*. Perkin-Elmer Corporation, 1979. 200 p.
12. Ахкубеков А.А., Багов А.М. О смещении инертных меток при контактном плавлении бинарных металлических систем при наличии электропереноса // *Известия РАН. Серия физическая*. 2009. Т. 73, № 7. С. 961–963.
13. Powell C.J. Recommended Auger parameters for 42 elemental solids // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 2012. V. 185, N 1–2. P. 1–3.
14. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под ред. Н.П. Лякишева*. М.: Машиностроение, 1996–2001.

РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ

Кузамишев А.Г., Бжихатлов К.Ч., *Шебзухова М.А., Шебзухов А.А.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

*sh-madina@mail.ru

Получено уравнение по размерной зависимости поверхностного натяжения наночастицы сферической формы на границе с паром с учетом влияния размера на температуру фазового равновесия. Проведены численные расчеты для жидких наночастиц олова. Установлено немонотонное изменение поверхностного натяжения при уменьшении радиуса поверхности натяжения (возрастание при больших размерах и уменьшение в области малых размеров).

Ключевые слова: поверхностное натяжение, наночастица, размерный эффект, немонотонность.

SURFACE TENSION SIZE DEPENDENCE OF NANOPARTICLES

Kuzamishev A.G., Bzhikhatlov K.Ch., Shebzukhova M.A., Shebzukhov A.A.

Kabardino-Balkarian State University

An equation for the size surface tension dependence of a spherical nanoparticle at the vapor boundary is obtained, taking into account the size effect on the phase equilibrium temperature. Numerical calculations are performed for liquid tin nanoparticles. A nonmonotonic change in the surface tension is established with a decrease in the radius of the surface tension (increase with large sizes and decrease in the region of small sizes).

Keywords: surface tension, nanoparticle, size effect, nonmonotonicity.

Влияние размера на поверхностное натяжение является предметом исследования многих работ [1–5]. Такие исследования, как правило, проводятся при условии постоянства температуры ($T = \text{const}$). Так, известное уравнение Гиббса – Толмена – Кенига – Баффа (уравнение ГТКБ) для однокомпонентной системы, которое имеет вид

$$\frac{1}{\sigma} \left(\frac{d\sigma}{dr} \right)_T = \frac{\frac{2\delta}{r^2} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} \right)}{1 + \frac{2\delta}{r} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} \right)}, \quad (1)$$

следует из фундаментальных уравнений термодинамики дисперсных систем при постоянстве температуры. В этом уравнении фигурирует поверхностное натяжение σ , радиус поверхности натяжения r

и параметр Толмена δ . Положение поверхности натяжения определяется условием $\left[\frac{d\sigma_x}{dr_x} \right] = 0$, где производная относится к случаю перемещения разделяющей поверхности в пределах переходного слоя между сосуществующими фазами без изменения физического состояния системы (мысленное или виртуальное перемещение разделяющей поверхности). Параметр Толмена может быть определен разными способами, в том числе в виде $\delta = r_e - r$, где r_e – радиус эквимолекулярной разделяющей

поверхности, положение которой определяется из условия $\left(\frac{d\sigma_x}{d\mu}\right)_{T,r_x} = 0$, где μ – химический потенциал. При относительно больших значениях r из (1) следует известная формула Толмена на плоской поверхности ($r \rightarrow \infty$) $\sigma = \sigma_\infty / (1 + 2\delta_\infty/r)$, где σ_∞ и δ_∞ – поверхностное натяжение и параметр (длина) Толмена при $r \rightarrow \infty$. Дифференциальное уравнение (1) и, соответственно, формула Толмена довольно часто используются в теории поверхностных явлений в дисперсных системах. Оно, в частности, введено в Энциклопедию систем жизнеобеспечения Организации Объединенных наций по вопросам образования, науки и культуры (UNESCO) в разделе Нанонаука и нанотехнология [6].

В наиболее общем случае для размерной зависимости поверхностного натяжения в изотермических условиях в случае положительной кривизны поверхности сферической формы было получено выражение в работе [7]. Из него в качестве частных случаев следуют многие соотношения, полученные ранее многими авторами. Расчеты с использованием этого соотношения показывают монотонное уменьшение поверхностного натяжения жидкой капли или твердой частицы, находящейся в собственном паре, с уменьшением размера дисперсной частицы. Аналогичная задача была решена в работе [8] для случая отрицательной кривизны поверхности (примером может служить пузырек пара в жидкой или твердой матрице макроскопического размера).

Отметим, что при диспергировании (дезинтеграции) одной из сосуществующих фаз (α) внутри другой фазы (β) в двухфазной системе изменяется также температура фазового равновесия (T зависит от r). Представляет интерес изучение размерной зависимости поверхностного натяжения с учетом влияния размера на температуру равновесия дисперсной частицы, находящейся в дисперсионной среде (матрице) в равновесных условиях.

В работе [9] было получено дифференциальное уравнение по размерной зависимости поверхностного натяжения с учетом влияния размера на температуру фазового равновесия дисперсной частицы сферической формы, находящейся в дисперсионной среде (матрице). При этом предполагалось, что изменение размера не влияет на давление в макроскопической фазе ($P^{(\beta)} = P^{(matr)} = const$). Это уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{\sigma} \left(\frac{d\sigma}{dr} \right)_{P^{(matr)}} = \frac{\frac{2\delta}{r^2} \left[1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{v^{(\alpha)}}{\omega\delta} (\rho_v - \rho_s) \right]}{1 + \frac{2\delta}{r} \left[1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{v^{(\alpha)}}{\omega\delta} (\rho_v - \rho_s) \right]}, \quad (2)$$

где $\rho_v = (v^{(\sigma)} - v^{(\alpha)}) / (v^{(\beta)} - v^{(\alpha)})$, $\rho_s = (S^{(\sigma)} - S^{(\alpha)}) / (S^{(\beta)} - S^{(\alpha)})$, S , v и ω – молярные значения энтропии, объема и поверхности дисперсной частицы произвольного, в том числе нанометрового размера. Верхние индексы α , β и σ относятся, соответственно, к сосуществующим фазам и межфазному слою. При решении уравнения (2) в [9] последние слагаемые в квадратных скобках в числителе и знаменателе считались независимыми от размера. Расчеты в этом случае приводят к немонотонной зависимости поверхностного натяжения сферических нанокпель жидких металлов σ от радиуса поверхности натяжения r . Кривая зависимости σ от r в этом случае характеризуется наличием максимума.

Представляет интерес решение уравнения (2) с учетом зависимости безразмерной величины $B = \frac{v^{(\alpha)}}{\omega\delta} (\rho_v - \rho_s)$ от размера, фигурирующей в этом уравнении. Оценочные расчеты показывают, что разность относительных величин в этом выражении слабо зависит от размера, и можно принимать $\frac{v^{(\sigma)} - v^{(\alpha)}}{v^{(\beta)} - v^{(\alpha)}} - \frac{S^{(\sigma)} - S^{(\alpha)}}{S^{(\beta)} - S^{(\alpha)}} \approx \frac{v_{\infty}^{(\sigma)} - v_{\infty}^{(\alpha)}}{v_{\infty}^{(\beta)} - v_{\infty}^{(\alpha)}} - \frac{S_{\infty}^{(\sigma)} - S_{\infty}^{(\alpha)}}{S_{\infty}^{(\beta)} - S_{\infty}^{(\alpha)}}$. В этих выражениях индекс « ∞ » указывает на принадлежность величин к макроскопическому состоянию. В таком случае эту разность можно вычислять в виде:

$$\rho_{v,\infty} - \rho_{s,\infty} \approx \frac{\omega_\infty}{S_{\infty}^{(\beta)} - S_{\infty}^{(\alpha)}} \frac{d\sigma_\infty}{dT}. \quad (3)$$

Для установления зависимости от размера последнего слагаемого в квадратных скобках в (2) воспользуемся соотношениями:

$$\rho(r) = \rho_{\infty} (1 + 2\chi_{\infty} \sigma_{\infty} / r + \dots), \quad (4)$$

$$\omega(r) = \frac{N_0^{1/3}}{n} (v^{(\sigma)})^{2/3}, \quad (5)$$

где ρ – плотность (число молей в единице объема $\rho = 1/v$), χ – изотермическая сжимаемость; n – число монослоев в переходном слое; N_0 – число Авогадро. Для средней плотности поверхностного слоя $\rho^{(\sigma)}$ можно использовать выражения [1]:

$$\rho^{(\sigma)} \approx \frac{\rho_{\infty}^{(\alpha)} \tau_{\rho}^{(\alpha)} + \rho_{\infty}^{(\beta)} \tau_{\rho}^{(\beta)}}{\tau_{\rho}^{(\alpha)} + \tau_{\rho}^{(\beta)}}, \quad (6)$$

$$\tau_{\rho}^{(\alpha)} / \tau_{\rho}^{(\beta)} \approx (\rho_{\infty}^{(\alpha)} \chi_{\infty}^{(\alpha)} / \rho_{\infty}^{(\beta)} \chi_{\infty}^{(\beta)})^{1/3}, \quad (7)$$

где $\tau_{\rho}^{(\alpha)}$ и $\tau_{\rho}^{(\beta)}$ – толщины частей поверхностного слоя, расположенных по обе стороны от разделяющей поверхности ($\tau_{\rho} = \tau_{\rho}^{(\alpha)} + \tau_{\rho}^{(\beta)}$); τ_{ρ} – толщина поверхностного слоя, определяемая по плотности. Для оценки можно воспользоваться различными выражениями, в том числе выражением [10]:

$$2\chi_{\infty} \sigma_{\infty} \approx \alpha_{V_{\infty}} T(v_{\infty})^{1/3} / N_0^{1/3}, \quad (8)$$

где $\alpha_{V_{\infty}}$ – коэффициент объемного расширения. В результате будем иметь:

$$v^{(\alpha)} \omega_{\infty} / \omega \approx \frac{v_{\infty}^{(\alpha)}}{\left(1 + \frac{2\chi_{\infty}^{(\alpha)} \sigma_{\infty}^{(\alpha)}}{r}\right)^{1/3}} \cdot v(r); \quad (9)$$

$$v(r) \approx \left(\frac{1 + v_{\infty}^{(\beta)} / v_{\infty}^{(\alpha)}}{1 + \bar{\xi} v_{\infty}^{(\beta)} / v_{\infty}^{(\alpha)}}\right)^{2/3}; \quad (10)$$

где

$$\bar{\xi} = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta D}{D}\right)_{\infty} 2\chi_{\infty}^{(\beta)} \sigma_{\infty}^{(\beta)} / (r + \chi_{\infty}^{(\beta)} \sigma_{\infty}^{(\beta)}), \quad (11)$$

где $\Delta D/D$ – скачок плотности при фазовом переходе $\alpha \rightarrow \beta$ в однокомпонентной системе. Расчеты показывают, что $\bar{\xi}$ слабо зависит от r и численно близка к единице (при изменении r от 0 до ∞ второе слагаемое в (11) изменяется от 0 до $\frac{2}{9} (\Delta D/D)_{\infty}$).

Уравнение (2) с учетом приведенных выше соотношений можно привести к виду:

$$\left(\frac{d\sigma}{\sigma}\right)_{r^{(\beta)}} = \frac{dr}{r} - \frac{r^2 dr}{r^3 + 2\delta dr^2 + 2\delta^2 fr + \frac{2}{3}\delta^3}, \quad (12)$$

где $d = 1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}$, $f = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right) \frac{a_v^{(\alpha)}}{\delta}$.

Перейдем к переменной $x = r/\delta$ и разложим знаменатель второго слагаемого в (12) на множители. В результате получим:

$$\left(\frac{d\sigma}{\sigma}\right)_{r^{(\beta)}} = \frac{dx}{x} - \frac{x^2 dx}{(x+a)(x^2 + bx + c)}; \quad (13)$$

где

$$a + b = 2d; \quad (14)$$

$$ab + c = 2f; \quad (15)$$

$$ac = 2/3. \quad (16)$$

При условии $4c > b^2$ решением (12) будет:

$$\sigma = A_P \sigma_\infty x \frac{\exp \left[A_{P_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{2x+b}{\sqrt{4c-b^2}} \right) \right]}{(x+a)^{n_0} \left(x^3 + 2dx^2 + 2fx + \frac{2}{3} \right)^n}, \quad (17)$$

где $A_{P_0} = \frac{2ac+bc-ab^2}{\sqrt{4c-b^2}(a^2-ab+c)}$, $A_P = \exp[-A_{P_0} \operatorname{arctg}(\infty)]$, $n_0 = m - n$, $m = a^2/(a^2 - ab + c)$, $n = (c - ab)/[2(a^2 - ab + c)]$.

В случае, когда $b^2 > 4c$ искомое выражение имеет вид

$$\sigma = \frac{\sigma_\infty x}{|(x+a)|^m \cdot |(x^2+bx+c)|^n} \left(\frac{2x+b-\sqrt{b^2-4c}}{2x+b+\sqrt{b^2-4c}} \right)^{B_{P_0}}, \quad (18)$$

где $B_{P_0} = \frac{1}{2} \frac{2ac+bc-ab^2}{\sqrt{b^2-4c}(a^2-ab+c)}$.

Значения a , b и c вычисляются по приведенным выше трем соотношениям (14–16) с использованием данных для индивидуальных веществ. При этом $\Delta\delta = \frac{v_\infty^{(\alpha)} \bar{T}_\infty}{\Delta H_\infty} \frac{d\sigma_\infty}{dT}$, $a_v^{(\alpha)} = 2\chi_\infty^{(\alpha)} \sigma_\infty^{(\alpha)} = \alpha_{v_\infty}^{(\alpha)} T \left(v_\infty^{(\alpha)} \right)^{1/3} / N_0^{1/3}$. Для параметра Толмена на плоской границе конденсированная фаза-пар предложен ряд приближенных соотношений, в том числе $\delta = 0,916 v_a^{1/3}$ [11, 12], где v_a – атомный объем.

В работах [13, 14] предпринимались попытки по расчету предельного значения параметра Толмена (т.е. для плоской поверхности) на различных границах (жидкость–пар, твердое тело–жидкость). В [14] такая задача решалась в локально-конфигурационном приближении. При этом принималось во внимание, что поверхностное натяжение на плоской поверхности не зависит от положения разделяющей, и для однокомпонентной системы с эквимолекулярной разделяющей поверхностью (следовательно, автоадсорбция Γ равна нулю) поверхностное натяжение численно совпадает с удельной поверхностной энергией \bar{f} [15]. Первое из них следует из уравнения Кондо:

$$\left(\frac{d\sigma_x}{dr_x} \right)^* + \frac{2\sigma_x}{r_x} = p^{(\alpha)} - p^{(\beta)}, \quad (19)$$

где r_x – радиус любой произвольно выбранной разделяющей поверхности; $p^{(\alpha)}$ и $p^{(\beta)}$ – давления в сосуществующих фазах (α , β). Второе утверждение вытекает для однокомпонентной системы из соотношения:

$$\sigma = \bar{f} - \sum_i \mu_i \Gamma_i, \quad (20)$$

где μ_i и Γ_i – химический потенциал и адсорбция i -го компонента. В таком случае, следуя [13], можно получить:

$$\sigma = \left(f_V^{(\beta)} - f_V^{(\alpha)} \right) \Delta z, \quad (21)$$

где $f_V^{(\alpha)}$ и $f_V^{(\beta)}$ – плотности свободной энергии в фазах α и β ; Δz – расстояние между эквимолекулярной разделяющей поверхностью (с декартовой координатой \mathbf{z}_e) и разделяющей поверхностью нулевой избыточной свободной энергии (с координатой \mathbf{z}_F). Для величины $\Delta z = z_e - z_F$ имеет место соотношение [13]:

$$\Delta z = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\rho(z) - \rho^{(\beta)}}{\rho^{(\alpha)} - \rho^{(\beta)}} - \frac{f_V(z) - f_V^{(\beta)}}{f_V^{(\alpha)} - f_V^{(\beta)}} \right] dz, \quad (22)$$

где $\rho(z)$ и $f_V(z)$ – плотности вещества и свободной энергии в переходном слое. Для плоской поверхности на границе с паром величина $\Delta z_{\infty} \equiv \Delta z = z_e - z_F$ в рамках приведенных выше соображений принимается равной предельному значению параметра Толмена, т.е. $\Delta z_{\infty} = \delta_{\infty}$, где $\delta_{\infty} \equiv \delta = z_e - z$; z – декартова координата поверхности натяжения. Отметим, что все эти разделяющие поверхности находятся в пределах переходного слоя, и что Δz_{∞} и δ_{∞} , следовательно, меньше толщины поверхностного слоя. Параметр Толмена на плоской поверхности однокомпонентной жидкости на границе с паром будет иметь вид:

$$\delta = \frac{\overline{\Delta n}}{n} \left(1 - \frac{\overline{\Delta n}}{n} \right) \overline{n}_s \frac{v}{N_0}, \quad (23)$$

где $\frac{\overline{\Delta n}}{n}$ и \overline{n}_s – средние значения относительного числа недостающих соседей у частицы на поверхности и числа атомов на единице поверхности соответственно. Если следуя [16, 17] рассчитать значения $\frac{\overline{\Delta n}}{n}$ и \overline{n}_s на основе статистических соображений, будем иметь $\delta = \xi v^{1/3}$, где параметр ξ равен $1,104 \cdot 10^{-9}$; $1,397 \cdot 10^{-9}$ и $1,617 \cdot 10^{-9}$ для ОЦК, ГЦК и ГПУ структур предплавления.

Численные расчеты с использованием приведенных выше соотношений проведены для жидких нанок капель олова при температуре плавления. Для этого металла расчеты с использованием (23) при $v_{\infty} = 17,18 \text{ см}^3$ дают $\delta = 0,029 \text{ нм}$, что на порядок меньше значения $\delta = 0,280 \text{ нм}$, получаемого при использовании соотношения $\delta = 0,916 v_a^{1/3}$ из [10, 11]. Расчеты показывают, что $\Delta \delta / \delta \approx -1,067$, $d = -0,067$, $f = 1,157$. При этом выполняется условие, и вычисления для $\sigma(r)$ можно проводить с использованием соотношения (17).

На рисунке ниже приведены результаты расчетов по размерной зависимости поверхностного натяжения жидких нанок капель олова.

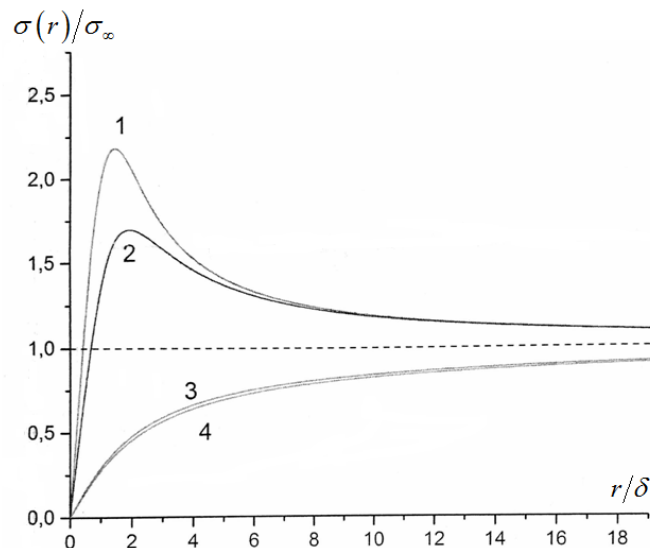


Рисунок. Размерная зависимость поверхностного натяжения жидких нанок капель олова на границе с паром (в безразмерных координатах)
 1 – $d \neq 1, f = 1, \delta = \delta_{\infty} = 0,029 \text{ нм}$; 2 – $d \neq 1, f \neq 1, \delta = \delta_{\infty} = 0,029 \text{ нм}$;
 3 – $d \neq 1, f = 1, \delta = \delta_{\infty} = 0,28 \text{ нм}$; 4 – $d \neq 1, f \neq 1, \delta = \delta_{\infty} = 0,28 \text{ нм}$.

Нетрудно видеть, что имеет место немонотонная зависимость поверхностного натяжения от размера (кривые 1 и 2). С уменьшением радиуса поверхности натяжения поверхностное натяжение вначале возрастает ($\sigma(r) > \sigma_\infty$), затем уменьшается ($\sigma(r) < \sigma_\infty$) и стремится к нулю. На графике имеется максимум, положение которого определяется условиями:

$$\left(\frac{r}{\delta}\right)_{\max} = -\frac{f}{2d} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{3} \frac{d}{f^2}}\right). \quad (24)$$

Учет зависимости слагаемого в квадратных скобках от размера в уравнении (2) приводит к смещению максимума в сторону больших значений радиуса поверхности натяжения (~13,1 %) и понижению значений поверхностного натяжения (17,6 %).

Анализ формулы (17) и результаты численных расчетов показывают, что при больших значениях параметра Толмена (например, вычисленных по формуле $\delta = 0,916v_a^{1/3}$ [11, 12]), имеет место монотонное уменьшение поверхностного натяжения при уменьшении размера дисперсной частицы (кривые 3 и 4).

Интересно отметить, что для сферических наночастиц, находящихся в твердом состоянии, даже при больших (положительных) значениях параметра Толмена на плоской поверхности (десяти доли нанометра) может иметь место наличие максимума поверхностного натяжения в области средних значений радиуса поверхности натяжения (ближе к малым размерам). Такая ситуация связана со сравнительно (относительно жидкого состояния) большими значениями температурного коэффициента поверхностного натяжения на плоской поверхности в твердом состоянии, который особенно велик вблизи температуры плавления [18].

В заключение отметим, что возможность существования двух основных типов зависимости поверхностного натяжения от радиуса кривизны поверхности разрыва (монотонная и немонотонная с максимумом) следует из теории фазовых равновесий в дисперсных системах с учетом поверхностных явлений [1], что подтверждается приведенными выше результатами, полученными в настоящей работе.

Библиография

1. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. М.: Химия, 1967. 388 с.
2. Tolman R.C. The effect of droplet size on surface tension // Journal of Chemical Physics. 1949. V. 17, No 3. P. 333–337.
3. Быков Т.В., Щекин А.К. Поверхностное натяжение, длина Толмена и эффективная константа жесткости поверхностного слоя капли с большим радиусом кривизны // Неорганические материалы. 1999. Т. 35, № 6. С. 759–763.
4. Самсонов В.М., Чернышева А.А., Сдобняков Н.Ю. О размерной зависимости поверхностной энергии и поверхностном натяжении металлических наночастиц // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 6. С. 768–771.
5. Львов П.Е., Светухин В.В. Термодинамика образования наноразмерных выделений вторых фаз с протяженной межфазной границей // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. Вып. 9. С. 1825–1833.
6. Шебзухов З.А., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Межфазное натяжение на границах с положительной кривизной в однокомпонентных системах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 11. С. 102–106.
7. Нанонаука и нанотехнологии / под ред. О.О. Аваделькарим, Чуньли Бай и С.П. Капицы. М.: Магистер-Пресс, 2011. 1040 с.
8. Шебзухов З.А., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Межфазное натяжение на границах с отрицательной кривизной в однокомпонентных системах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 12. С. 94–98.
9. Шебзухов З.А., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Поверхностное натяжение и поверхностная энергия металлических наночастиц // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2010. № 1. С. 17–58.
10. Байдов В.В., Кунин Л.Л. К вопросу о связи скорости звука с поверхностным натяжением металлов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик: КБГУ, 1965. С. 89–93.

11. Vogelsberger W.J., Marx G. Zur Krümmungshängigkeit der Oberflächenspannung kleiner Tropfen // Zeitschrift für physikalische Chemie. 1976, V. 257, N 3. P. 580–586.

12. Vogelsberger W.J., Sonnefeld J., Rudakoff G. Some general consideration on a curvature dependent surface tension in the capillarity of liquids // Z. Phys. Chem. 1985. V. 226, No 2. P. 225–238.

13. Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Параметр Толмена для жидких металлов на плоской границе с паром // Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы: тр. Межд. симп. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ, 2013. Вып. 3. С. 231–236.

14. Шебзухова М.А., Шебзухов З.А., Шебзухов А.А. Параметр Толмена, автоадсорбция и поверхностное натяжение на плоских и искривленных поверхностях жидких металлов // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74, № 5. Вып. 3. С. 231–236.

15. Русанов А.И. Лекции по термодинамике поверхностей. М.: Лань, 2013. 240 с.

16. Задумкин С.Н. Приближенный расчет поверхностного натяжения металлов // ДАН СССР. 1957. Т. 112, № 3. С. 453–456.

17. Задумкин С.Н. Современные теории поверхностной энергии чистых металлов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик: КБГУ, 1965. С. 12–29.

18. Гладких Н.Т., Дукаров С.В., Крышталь А.П., Ларин В.И., Суков В.Н. Капиллярные свойства островковых пленок и малых частиц. Харьков: ХНУ им. В.Н. Карамзина, 2015. 212 с.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ

Кузамишев А.Г., *Шебзухова М.А., Шебзухов А.А.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

*sh-madina@mail.ru

Получены новые соотношения по размерной зависимости изобарного коэффициента термического расширения наночастиц сферической формы. Проведены численные расчеты для наночастиц олова в твердом состоянии. Установлено повышение коэффициента объемного расширения с уменьшением радиуса поверхности натяжения частицы.

Ключевые слова: наночастица, тепловое расширение, размерные эффекты.

SIZE INFLUENCE ON THERMAL EXPANSION OF NANOPARTICLES

Kuzamishev A.G., Shebzukhova M.A., Shebzukhov A.A.

Kabardino-Balkarian State University

New relationships from the size dependence of the isobaric thermal expansion coefficient of spherical nanoparticles are obtained. Numerical calculations were performed for tin nanoparticles in the solid state. An increase in the coefficient of volume expansion is established with a decrease in the radius of the surface tension particle.

Keywords: nanoparticle, thermal expansion, size effects.

В общем случае можно ожидать, что смещение среды в наночастице с изменением температуры будут иными по сравнению с макроскопическим веществом. Линейный коэффициент термического расширения в кристалле пропорционален отношению γ/β^2 , где β и γ – коэффициенты, характеризующие гармоническую и ангармоническую составляющие квазиупругой силы взаимодействия. Уменьшение координационного числа в кристалле и связанное с этим уменьшение энергии сцепления в расчете на атом, видимо, будут приводить к изменению указанных выше силовых постоянных и, в конечном итоге, к изменению коэффициента термического расширения дисперсной частицы.

В настоящее время практически отсутствуют систематические исследования по размерной зависимости коэффициента теплового расширения наночастиц. Имеющиеся данные малочисленны и относятся чаще всего к консолидированным наноматериалам, где размерные эффекты могут маскироваться другими факторами, в том числе, неравновесностью состояния [1–3].

В настоящей работе предпринята попытка рассмотрения влияния размера на объемный коэффициент термического расширения наночастицы сферической формы (α_V), находящейся в равновесии с окружающей средой (примером может служить наночастица в собственном паре макроскопического размера). Термическое расширение количественно характеризуется объемным коэффициентом $\alpha_V = \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dT} \right)_P$, где v – молярный объем; T и P – температура и давление. В случае равновесия дисперсной частицы сферической формы (фаза α) и дисперсионной среды (фаза β) в однокомпонентной системе давления по обе стороны от разделяющей поверхности отличаются друг от друга и связаны между собой уравнением Кондо [4]. В случае выбора поверхности натяжения в качестве разделяющей поверхности они связаны соотношением:

$$P^{(\alpha)} = P^{(\beta)} + \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение; r – радиус поверхности натяжения. При нахождении коэффициента теплового расширения имеет смысл зафиксировать давление в матрице ($P^{(\beta)} = P^{(matr)} = const$). Можно рассматривать также зависимость α_V от размера при условии постоянства давления в дисперсной частице ($P^{(\alpha)} = P^{(nano)} = const$), но на практике трудно обеспечить это условие при варьировании размера дисперсной частицы (в принципе это возможно).

Состояние внутреннего равновесия рассматриваемой однокомпонентной системы описывается уравнением:

$$dG = -SdT + VdP, \quad (2)$$

где G – термодинамический потенциал Гиббса; S – энтропия. Переходя к мольным величинам, из (2) получаем:

$$dP^{(\alpha)} = \rho^{(\alpha)} d\mu, \quad (3)$$

где $\rho = 1/v$; ρ – плотность; μ – химический потенциал. Наиболее часто для размерной зависимости поверхностного натяжения используется формула Толмена:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\infty}}{1 + 2\delta/r}, \quad (4)$$

где σ_{∞} – поверхностное натяжение на плоской поверхности; δ – предельное значение параметра Толмена при $r \rightarrow \infty$ (для плоской поверхности на границе α - и β -фаз). Отметим, что это соотношение следует из дифференциального уравнения Гиббса – Толмена – Кенига – Баффа при условии независимости параметра Толмена от размера ($r \gg |\delta|$) [5]. При этих условиях воспользуемся следующими разложениями [6]:

$$\rho(r) \approx \rho_{\infty} + \left. \frac{\partial \rho}{\partial c} \right|_{c=0} \cdot \frac{1}{r} + \dots, \quad (5)$$

$$\mu(r) \approx \mu_{\infty} + \left. \frac{\partial \mu}{\partial c} \right|_{c=0} \cdot \frac{1}{r} + \dots, \quad (6)$$

где $c = 1/r$ – кривизна поверхности.

Из приведенных выше соотношений можно получить:

$$d\left(\frac{2\sigma_{\infty}}{r} - \frac{4\sigma_{\infty}\delta}{r^2}\right) = \left(\rho_{\infty} + \left. \frac{\partial \rho}{\partial c} \right|_{c=0} \cdot \frac{1}{r}\right) d\left(\mu_{\infty} + \left. \frac{\partial \mu}{\partial c} \right|_{c=0} \cdot \frac{1}{r}\right). \quad (7)$$

Из последнего следует:

$$\left. \frac{\partial \mu}{\partial c} \right|_{c=0} = \frac{2\sigma_{\infty}}{\rho_{\infty}}. \quad (8)$$

В соответствии с определением коэффициента изотермической сжимаемости имеем уравнение:

$$K_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \mu} \right)_T, \quad (9)$$

которое можно записать для рассматриваемого случая в виде:

$$K_T = \frac{1}{\rho_{\infty}^2} \left(\left. \frac{\partial \rho}{\partial c} \right|_{c=0} ; \left. \frac{\partial \mu}{\partial c} \right|_{c=0} \right). \quad (10)$$

Из (10) с учетом (8) получаем:

$$\left. \frac{\partial \rho}{\partial c} \right|_{c=0} = 2\sigma_{\infty} K_{\infty} \rho_{\infty}, \quad (11)$$

где в целях упрощения опущен индекс «Т».

Из (11) и (5) получаем для размерной зависимости молярного объема дисперсной частицы:

$$v(r) = v_{\infty} / (1 + 2K_{\infty} \sigma_{\infty} / r). \quad (12)$$

Выражение для коэффициента термического расширения с использованием (12) будет иметь вид:

$$\alpha_V(r) = \frac{(1+2a_v/r)}{v_\infty} \frac{d}{dT} \left(\frac{v_\infty}{1+2a_v/r} \right), \quad (13)$$

где $a_v = K_\infty \sigma_\infty$. После несложных преобразований будем иметь следующее выражение для размерной зависимости коэффициента объемного расширения наночастицы:

$$\alpha_V(r) = \alpha_{V_\infty} \beta(r), \quad (14)$$

$$\beta(r) = \left[1 - \frac{2}{\alpha_{V_\infty}(r+2a_v)} \frac{da_v}{dT} \right] / \left[1 - \frac{2}{3} \frac{a_v}{(r+2a_v)} \right]^{-1}. \quad (15)$$

где

Если пренебречь температурной зависимостью коэффициента изотермической сжимаемости

имеем:

$$da_v/dT \approx K_T d\sigma_\infty/dT.$$

При $r \rightarrow \infty$, как следует из (14) и (15), $\beta \rightarrow 1$ и $\alpha_V \rightarrow \alpha_{V_\infty}$. При практическом использовании соотношения (14) необходимо иметь в виду, что нижняя граница по размеру дисперсной частицы соответствует области применения формулы Толмена для поверхностного натяжения. Отметим также возможность изменения характера зависимости α_V от r при учете влияния температуры на коэффициент изотермической сжимаемости. С использованием (14) проведены численные расчеты для наночастицы сферической формы олова в твердом состоянии. При этом использованы значения

$$\sigma_\infty^{(me)} = 572 \text{ мДж/м}^2 \text{ при } T = 500 \text{ К} \quad [7]; \quad \frac{d\sigma_\infty^{(me)}}{dT} = -2 \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{К)} \text{ при } T = 500 \text{ К} \quad [7];$$

$$\alpha_{V_\infty} = 81,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \quad [8]; \quad v_\infty = 16,72 \text{ см}^3/\text{моль} \quad [9]; \quad K_\infty = 1,07 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{эрг} \quad [10].$$

Результаты расчетов приведены на рис. 1. Нетрудно видеть, что $\left(\frac{d\alpha_V}{dr} < 0 \right)$. С уменьшением радиуса поверхности натяжения увеличивается объемный коэффициент теплового расширения.

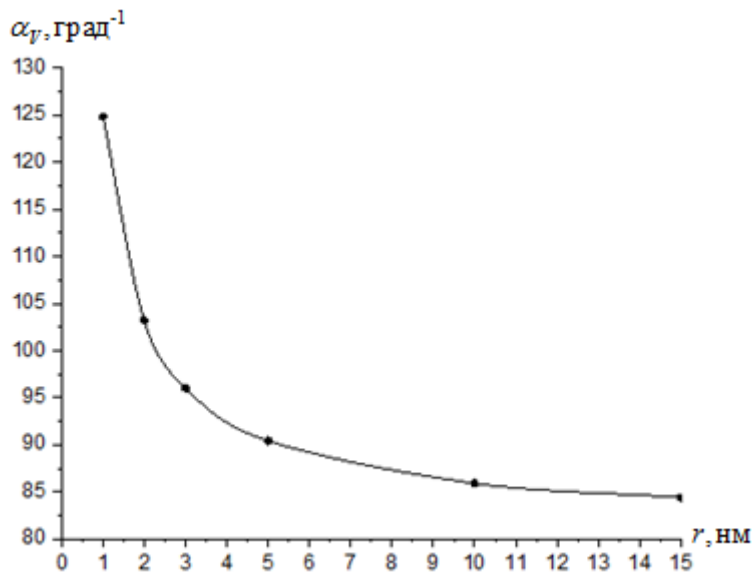


Рис. 1. Размерная зависимость изобарического коэффициента объемного расширения наночастицы сферической формы олова в твердом состоянии

Более строгое рассмотрение зависимости коэффициента теплового расширения наночастицы от ее размера можно провести на основе теории фазового равновесия в дисперсных системах с последовательным учетом поверхностных явлений. Коэффициент теплового расширения обычно определяется как изменение объема с температурой при постоянном давлении $\left(\alpha = \alpha_V = \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dT} \right)_P \right)$.

Исходя из определения изобарического коэффициента поверхностного натяжения $\left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{P(\beta)}$ можно получить:

$$\alpha_{V_{P^{(\beta)}}} = \frac{1}{v^{(\alpha)}} \left(\frac{dv^{(\alpha)}}{dr} \right)_{P^{(\beta)}} = \frac{3}{r} \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{P^{(\beta)}} \cdot \left(\frac{d\sigma}{dr} \right)_{P^{(\beta)}}^{-1}. \quad (16)$$

Здесь $v^{(\alpha)}$ – молярный объем дисперсной частицы.

Это соотношение можно записать в виде (в целях упрощения опущен индекс « $P^{(\beta)}$ » для коэффициента теплового расширения:

$$\alpha_V = \Lambda_\alpha \frac{1}{\sigma} \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{P^{(\beta)}}. \quad (17)$$

Интересно отметить, что подобного рода соотношения между α_∞ и $\frac{1}{\sigma_\infty} \frac{d\sigma_\infty}{dT}$ в макроскопическом случае ($r \rightarrow \infty$) были получены в ряде работ с различными значениями множителя Λ_∞ , в том числе $-3/20$ [12], $-3/5$ [13] и $-3/11$ [14]. При наличии искривленной границы между фазами, как не трудно видеть из (16), величина Λ_∞ зависит от кривизны поверхности.

Производные в этом выражении можно рассчитать и таким образом установить влияние размера на коэффициент теплового расширения. Для этого можно использовать соотношения, полученные последними двумя авторами настоящей работы [11]:

$$\left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{P^{(\beta)}} = \frac{S_{\alpha\beta} \delta}{v^{(\alpha)}} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right), \quad (18)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{dr} \right)_{P^{(\beta)}} = \frac{2\delta\sigma}{r^2} \frac{\left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right)}{\left[1 + \frac{2\delta}{r} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) \right]}, \quad (19)$$

где

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = (\rho_v - \rho_s) \frac{v^{(\alpha)}}{\delta\omega}; \quad (20)$$

$\rho_v = (v^{(\sigma)} - v^{(\alpha)}) / (v^{(\beta)} - v^{(\alpha)})$, $\rho_s = (S^{(\sigma)} - S^{(\alpha)}) / (S^{(\beta)} - S^{(\alpha)})$, $S_{\alpha\beta} = S^{(\beta)} - S^{(\alpha)}$, S и ω – энтропия и площадь (на моль); δ – параметр Толмена.

Поверхностное натяжение наночастицы в зависимости от ее размера, в соотношении (19), можно вычислить, пользуясь уравнением, полученным в работе [11].

Дифференциальное уравнение (19) является аналогом уравнения Гиббса – Толмена – Кенига – Баффа (ГТКБ) при условии постоянства давления в матрице, и оно получено в работе [11]. Фундаментальное уравнение ГТКБ описывает в дифференциальной форме зависимость поверхностного натяжения при условии постоянства температуры в двухфазной системе. Соотношения (18) и (19) не имеют аналогов в теории плоских поверхностей, и их использование в расчетах (особенно при больших размерах частицы) сопряжено с определенными трудностями. Так, вычисление производной $(d\sigma/dr)_{P^{(\beta)}}$ по уравнению (19) при $r \rightarrow \infty$ с необходимой точностью, в силу асимптотического характера ее зависимости от переменной, требует особой тщательности.

С учетом этих трудностей нами с использованием системы уравнений, описывающих равновесие в рассматриваемой системе, полученных в работе [11], выведено следующее соотношение для размерной зависимости коэффициента объемного расширения дисперсной частицы:

$$\alpha_V(r) = \frac{3S_{\alpha\beta} \cdot r}{2v^{(\alpha)} \sigma_{P^{(\beta)}}} \left[1 + \frac{2\delta}{r} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) \right], \quad (21)$$

где $\sigma_{P^{(\beta)}}$ – поверхностное натяжение при условии $P^{(\beta)} = const$.

При больших значениях радиуса поверхности натяжения (область размеров, где размерные зависимости поверхностного натяжения и температуры равновесия описываются формулами Толмена и Гиббса – Томсона соответственно) из (21) получаем:

$$\alpha_V(r) = \tilde{\alpha}_V(r) \approx \frac{3\tilde{S}_{\alpha\beta} \cdot r}{2\tilde{v}^{(\alpha)} \tilde{\sigma}_{p^{(\beta)}}}, \quad (22)$$

где верхний индекс (\sim) указывает на значения величин при сравнительно больших размерах дисперсной частицы. Воспользуемся известным приближением Грюнайзена (тем самым допускается выполнение закона Грюнайзена при малой кривизне поверхности):

$$\tilde{\alpha}_V(r) \cdot T(r) = const, \quad (23)$$

где $A_\alpha = const$; $T(r)$ – температура равновесия частицы со своим насыщенным паром. В макроскопическом случае ($r=const$) постоянная, A_α равна 0,066 [15]. В области больших размеров

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{p^{(\beta)}} \approx \frac{2\tilde{\sigma}_{p^{(\beta)}} \tilde{v}^{(\alpha)}}{r\tilde{S}_{\alpha\beta\infty}}. \quad (24)$$

Интегрирование (24) при предельных значениях $\tilde{\sigma}_{p^{(\beta)}}$, $\tilde{v}^{(\alpha)}$ и $\tilde{S}_{\alpha\beta}$ приводит к выражению:

$$\tilde{T}(r) \approx T_\infty - \frac{2\sigma_\infty v_\infty^{(\alpha)}}{rS_{\alpha\beta\infty}}. \quad (25)$$

Величины, отмеченные нижним индексом « ∞ », относятся к значениям при $r \rightarrow \infty$. Для системы твердое тело–жидкость формула (25) называется уравнением Томсона или Гиббса – Томсона [5]. Из соотношений (21)–(25) получаем для искомой зависимости:

$$\alpha_V(r) = \alpha_{V\infty} \cdot \frac{\left[1 + \frac{2\delta}{r} \left(1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} + \frac{\Delta\delta}{\delta}\right)\right]}{\left(1 - \frac{2\sigma_\infty v_\infty^{(\alpha)}}{r \cdot \Delta H_\infty}\right)}. \quad (26)$$

Значение постоянной в (23) найдено из условия $\alpha_V = \alpha_{V\infty}$ при $r = \infty$.

С использованием (26) проведены численные расчеты для сферических наночастиц олова, находящихся в твердом состоянии. При этом в качестве входных данных использованы значения $S_{\alpha\beta\infty} = 242,2 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ [16]; $\Delta H_{\alpha\beta\infty} = 72,2 \text{ ккал}/(\text{моль})$ [16]; $T_\infty = 505 \text{ К}$ [9]; $v_\infty^{(\alpha)} = 16,716 \text{ см}^3$ [8]; $\sigma_\infty = 712,5 \text{ эрг}/\text{см}^2$ [7]; $\frac{d\sigma_\infty}{dT} = -0,5 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$ [7], $\delta = 0,28 \cdot 10^{-7} \text{ см}$ [17, 18].

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

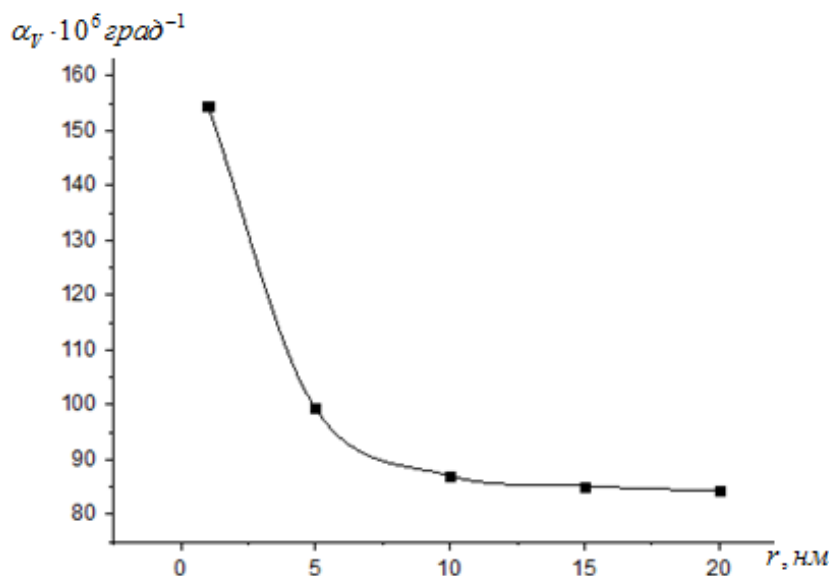


Рис. 2. Размерная зависимость коэффициента объемного расширения наночастицы сферической формы олова в твердом состоянии

Таким образом, нетрудно видеть, что с уменьшением размера наночастицы имеет место повышение коэффициента теплового расширения.

Библиография

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
2. Нагаев Э.Л. Малые металлические частицы // Успехи физических наук, 1992. Т. 162, № 9. С. 49–124.
3. Зубов В.И. Некоторые размерные эффекты и свойства ультрадисперсных систем // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева, 1991. Т. 36, № 2. С. 133–137.
4. Оно С., Кондо С. Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях. М.: Иностранная литература, 1963. 284 с.
5. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. М.: Химия, 1967. 388 с.
6. Русанов А.И. О растворимости и давлении пара частиц полидисперсной системы // Коллоидный журнал. 1987. Т. XLIX, № 5. С. 932–938.
7. Гладких Н.Т., Дукаров С.В., Крышталь А.П., Ларин В.И., Суков В.Н., Богатыренко С.И. Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках. Харьков: ХНУ им. В.Н. Карамзина, 2004. 276 с.
8. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Плотность сплавов системы олово-свинец в твердом и жидком состояниях // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 3. С. 393–400.
9. Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): справочник. М.: Металлургия, 1981. 208 с.
10. Байдов В.В., Кунин Л.Л. К вопросу о связи скорости звука с поверхностным натяжением металлов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик. Изд-во КБГУ, 1965. С. 89–93.
11. Шебзухов З.А., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. Поверхностное натяжение и поверхностная энергия металлических наночастиц // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2010. № 1. С. 17–58.
12. Демченко В.В. К теории поверхностного натяжения // Журнал физической химии. 1963. Т. 37. Вып. 10. С. 2299–2300.
13. Белогуров Б.В. Теория поверхностного натяжения // Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии. Киев: Академия наук УССР, 1963. С. 19–29.
14. Рыков В.И., Яковлева Г.С., Слоновский Л.Ф., Шейнфельд А.А. Применение термодинамического метода для изучения поверхностных свойств жидкостей и их взаимосвязи с другими свойствами // Поверхностные явления в расплавах. Киев: Наукова думка, 1968, С. 47–62.
15. Задумкин С.Н., Пугачевич П.П. Температурная зависимость поверхностного натяжения металлов // Доклады АН СССР. 1962. Т. 146, № 6. С. 1363–1366.
16. Глазов В.М., Лазарев В.Б., Жаров В.В. Фазовые диаграммы простых веществ. М.: Наука, 1980. 276 с.
17. Vogelsberger W.J., Marx G. Zur Krümmungshängigkeit der Oberflächenspannung kleiner Tropfen // Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1976. V. 257, No 3. P. 580–586.
18. Vogelsberger W.J., Sonnefeld J., Rudakoff G. Some general consideration on a curvature dependent surface tension in the capillarity of liquids // Z. Phys. Chem., 1985. V. 226. No 2. P. 225–238.

ИСТОРИЯ

Уважаемые читатели!

В научном журнале «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета» наряду с основными разделами «Физика» и «Химия» могут быть представлены материалы и по актуальным вопросам других научных специальностей. Подобные публикации позволяют знакомить читателей, например, с некоторыми многоаспектными исследованиями ученых Юга России. В этом номере журнала обширные материалы научных исследований представлены в разделе «История».

Редколлегия журнала

УДК 522

АНТРОПОЛОГИЯ СОВЕТСКОСТИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ МУЗЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Губжоков М.Н.

Адыгейский республиканский институт гуманитарных исследований им. Т.М. Керашева

Впервые в широкий научный оборот вводится «Тетрадь отзывов Адыгейского областного историко-краеведческого музея за 1927–1938 гг.», которая содержит более чем сотни записей представителей интеллектуальной элиты.

Ключевые слова: антропология, черкесы, архив, музейный источник, тетрадь, национальный, культура, отзыв.

ANTHROPOLOGY OF SOVIETNESS THROUGH THE PRISM OF MUSEUM SOURCES

Gubzhokov M.N.

Adyghe Republican Institute for Humanitarian Research

For the first time, the Notebook of reviews of the Adyghe Regional Museum of Local Lore for 1927–1938, which contains more than hundreds of records of representatives of the intellectual elite, is introduced into wide scientific circulation.

Keyword: anthropology, circassians, archive, museum source, notebook, national, kul-tura, review.

Каждая эпоха, уходя в прошлое и становясь частью истории, не исчезает бесследно. Будучи отлита в металле технических достижений, обрамлена монументальными постройками современного ей стиля, одухотворена гениями «высокой» культуры, воплощена в перечне знаковых персон и событий, она навсегда остается в анналах минувшего.

Но главным вместилищем информации о былом является, конечно, человеческая память, хранящая воспоминания о людях, «населявших» не только прошедшее время, но и, зачастую, уже иную страну – подобно тому, как наши рожденные в СССР современники ностальгируют по канувшей в Лету поздней советской империи.

Иное дело, когда речь идет о событиях, отдаленных от нас многими десятилетиями. Так, послеоктябрьская эпоха, утратившая своих живых свидетелей, продолжает жить в документах той поры, хранящихся в личных архивах или музейных коллекциях, и порой достаточно заглянуть в старый семейный альбом, раскрыть дневник или прочитать письмо, чтобы ощутить прежде неуловимую атмосферу, аромат

времени, прочувствовать многообразные реалии противоречивой и трагической эпохи, погрузиться в ту самую антропологию или этнографию советскости, об утрате которой как предмета исследования сокрушаются специалисты [1].

Одним из таких вместилищ материализованной памяти является Национальный музей Республики Адыгея, экспозиция и фонды которого в полной мере отражают особенности национально-культурного строительства раннесоветской эпохи.

И пусть Музей с момента основания не раз поменял свое местопребывание, сменив даже город (переехав из Краснодара в Майкоп после переноса административного центра Адыгейской автономной области), его сотрудники бережно сохраняют не только предметы, но и сами традиции и даже особый дух музея, образованного в далеком 1925 г.

Долгие годы национальный музей был недостижимой мечтой адыгской интеллигенции предреволюционной поры. Однако только с началом автономизации, ставшей одним из столпов большевистской национальной политики после победы Октября, эту мечту удалось воплотить в жизнь.

Создание областного музея стало зримым символом становления молодой Адыгейской автономии. Организатором и бессменным директором музея стал Ибрагим Асланбекович Наврузов (1884–1943) – легендарная личность, разносторонняя деятельность которого давно уже заслуживает монографического исследования.

Потомок адыга, плененного в годы Кавказской войны и высланного вглубь России, Ибрагим Наврузов в 1921 г. возвращается на родину, горя желанием внести посильный вклад в возрождение своего народа. Адыгская интеллигенция с готовностью принимает в свои ряды хорошо образованного, энергичного и патриотически настроенного соплеменника. И вполне закономерно, что именно Ибрагим Наврузов в последующие годы неоднократно представлял интересы черкесов бывшей Кубанской области, будучи делегирован на форумы самого высокого уровня, на которых решалась в т.ч. и проблема самоопределения адыгов Западного Кавказа.

Тем самым, его смело можно отнести к славной плеяде фактических отцов-основателей Адыгейской (Черкесской) автономной области.

Однако в историю Адыгеи он вошел не только как политик. Его имя неразрывно связано с Адыгейским областным музеем (Далее – АОМ).

Именно на посту его директора раскрылись все разносторонние дарования Наврузова-ученого: историка, фольклориста и этнографа, энтузиаста полевой работы и архивиста, библиографа и источниковеда.

Блестящий организатор музейного дела, в полной мере осознававший значимость его детища для формирования исторического самосознания соплеменников, И. Наврузов прилагает поистине героические усилия для формирования экспозиции и пополнения фондов музея экспонатами. Его обширные знания, упорство и фанатичная преданность любимому делу позволили уже в первые годы существования областного музея сделать его подлинным центром краеведения и превратить его в мощный научно-просветительский центр, известный далеко за пределами Адыгеи.

Будучи визитной карточкой области и Краснодарского края, музей не только решал просветительские задачи, но и выполнял функцию презентации Адыгеи и адыгского народа. Все это значительно расширяло круг лиц, для которых посещение музея было продиктовано не досужим любопытством, а их профессиональными интересами.

И зримым свидетельством этого является уникальный источник – Тетрадь отзывов Адыгейского областного историко-краеведческого музея за 1927–1938 гг. [2], до сих пор фактически не вводившаяся в широкий научный оборот.

Несколько отзывов из этой Тетради были в свое время приведены в брошюре «Адыгский областной музей» (1929) [3] и газетной статье А. Пономарева [4–6]. Впоследствии надолго выпав из поля зрения специалистов, этот документ лишь недавно вновь стал использоваться биографами И. Наврузова [5, 7 (с. 21–29), 8 (с. 56–65)].

Практически целиком на материалах Тетради был построен наш доклад «Научное краеведение Адыгеи и Абхазии 1930-х гг.: человеческое измерение истории» на конференции, посвященной 70-летию В.Г. Ардзинба (Сухум, 14–17 мая 2015 г.). Однако до сих пор этот своеобразный источник так и не стал предметом специального исследования.

Авторами более чем сотни записей являются в основном представители интеллектуальной элиты – находившиеся в экспедициях и творческих командировках в Адыгее ученые (главным образом те, чья деятельность была так или иначе связана с Кавказом), писатели, художники, музейные работники,

журналисты, преподаватели, активисты общественных организаций, военные. Особую категорию составляет черкесская интеллигенция – выходцы из среды как западных, так и восточных адыгов. Ряд отзывов принадлежит иностранцам, как промышленным специалистам и профессуре, так и делегациям «рабочей молодежи».

Учитывая, что через музей в год проходило множество людей (так, например, с 1 октября 1927 г. по 1 октября 1928 г. музей посетил 7931 чел.) [3, с. 10], ясно, что возможность оставить свой отзыв носила более чем избирательный характер, будучи регулируема самим И. Наврузовым.

На первый взгляд, Тетрадь отзывов – свидетельство сугубо внутренней жизни музея, хроника его развития, успехов и повседневных трудностей, отражение восприятия его экспозиции посетителями. Для самого И. Наврузова эти записи могли служить руководством к действию, а для контролирующих организаций – быть свидетельством выполнения музеем возложенных на него пропагандистских функций.

Однако для нас, антропологов и историков XXI века, этот уникальный документ раскрывает биографию не только самого музея, и даже не только Адыгеи в целом. Эта небольшая тетрадь подобна увеличительному стеклу, при помощи которого можно увидеть всю советскую эпоху во всех ее многообразных проявлениях.

Думается, что публикация полного текста Тетради, являющейся своеобразной летописью научной жизни за целое десятилетие, произвела бы немало сенсаций в сообществе исследователей минувшего, и в первую очередь – историков науки.

Прежде всего, повышенный интерес вызывает причудливый список организаций (которые были представлены авторами отзывов), уже сам по себе отражающий динамику отечественной науки, в первые послеоктябрьские десятилетия искавшей «оптимальные варианты объединения научных сил, организационных форм научной деятельности», максимально соответствующие новым задачам, которые перед учеными ставила большевистская власть. «Основной приметой времени в этом отношении было функционирование многочисленных институтов, научных комитетов, комиссий, ассоциаций <...> хотя одновременно исследовательская работа продолжалась и в старых научных центрах, функционировавших еще до революции» [10]. К числу крупнейших научных центров, созданных в этот период, можно отнести, в частности, Российскую Академию истории материальной культуры (*само название «история материальной культуры», появившееся в противовес «буржуазным» археологии и этнографии, также отражает эпохальные перемены в отечественной науке*) (РАИМК, с 1926 г. – ГАИМК) и Центральный Музей народоведения, помимо прочего занимавшихся и кавказской проблематикой. Их сотрудники, так же как и хранители получившего статус государственного музея Эрмитажа, посещали Адыгейский областной музей. Характерной приметой эпохи стало создание по всей стране музеев, отражающих новейшую историю страны – таковыми стали, в частности, Музей Октябрьской революции, открывшийся в Зимнем дворце (Ленинград), и Северо-Кавказский краевой Музей революции (Ростов-на-Дону), сотрудники которых высоко оценивали экспозицию АОМ с точки зрения профессиональных пропагандистов.

По свидетельствам очевидцев, уже с момента своего основания Адыгейский музей заметно выделялся на общем фоне. «Я осмотрел на Северном Кавказе ряд музеев, – отмечал в своем отзыве выдающийся кавказовед Л.И. Лавров, 29 ноября 1937 г. посетивший Краснодар, – Ингушский, Северо-Осетинский, Кабардино-Балкарский, Черкесский, Карачаевский, Армавирский, Майкопский (*под Майкопским музеем в данном случае понимается существовавший с 1909 г. в этом городе районный краеведческий музей природы, с которым впоследствии (после переноса в 1936 г. административного центра Адыгеи из Краснодара в Майкоп) был объединен Адыгейский историко-краеведческий музей И. Наврузова*)), Сочинский, и должен сказать, что Адыгейский музей, несмотря на то, что он моложе некоторых других музеев, является лучшим» (*здесь и далее орфография текстов отзывов сохранена в авторской редакции. Здесь и далее, при цитировании текстов отзывов, во избежание большого числа ссылок, мы ограничились указанием дат их написания*). К этому перечню можно добавить и Абхазский музей, директор которого, И.Е. Адзинба, оставил свой отзыв 16 октября 1936 г.

Этот обширный список свидетельствует о том, что Адыгейский музей был лишь одним из множества таковых, повсеместно возникавших в молодых автономиях. Кавказская интеллигенция четко осознавала значимость местных музеев как одной из важнейших составляющих процесса нациестроительства. Показательна цитата из отзыва грузинского лингвиста С. Джанашиа: «Пусть растет это значительное и симпатичное учреждение, которое, несомненно, будет одной из главных лабораторий в деле осуществления народного идеала – создания собственной национально-культурной системы» (14.05.1929).

Научное сопровождение этого процесса, направлявшегося и контролировавшегося советскими властями, должно было обеспечиваться не только столичными учреждениями, но и региональными

краеведческими институтами. К числу последних относился Северо-Кавказский институт краеведения (позднее в связи со свертыванием краеведческого движения преобразованный в Северо-Кавказский горский НИИ), научные сотрудники которого, как свидетельствует Тетрадь отзывов, были частыми гостями Адыгейского музея. Кстати, аналогичные процессы имели место и в Абхазии, где Абхазский НИИ краеведения был реорганизован в Институт абхазской культуры им. Марра в составе грузинского филиала Академии наук СССР (само название института свидетельствует о ярко выраженной специфике не только научных, но и политических реалий Абхазии); зав. историческим сектором этого института А.В. Фадеев приехал в Краснодар 20 декабря 1936 г.

Названные имена – лишь малая толика тех, кто заслуживает упоминания в настоящем исследовании, кто оставил свой след в истории страны – и отнюдь не только написав несколько строк в музейной тетради.

Их имена вызывают священный трепет – ведь многие из них являлись корифеями в своих областях, знаковыми фигурами, без которых невозможно представить историю не только науки, но и общества, и государства того времени в целом.

Но в этой портретной галерее мы видим не только тех, чьи образы вырисованы с максимальной полнотой; лики некоторых только намечены контуром, и их имена сейчас ничего не скажут даже узким специалистам. Однако они тоже достойны того, чтобы здесь прозвучали их имена – «маленькие люди», они честно исполняли свой долг перед страной.

Биографии всех этих людей соответствуют «крутым маршрутам», которыми прошла наша страна. Будучи причастны к тем сферам, которые особо контролировались властью, они трудились под жестким прессингом тоталитарного государства, бесцеремонно и властно вторгавшегося в их жизни, ломая карьеры, коверкая судьбы, а зачастую отнимая и само право на существование.

Ведь Тетрадь отзывов, кроме своих многочисленных ипостасей, является еще и мартирологом жертв сталинских репрессий, волны которых периодически прокатывались по стране.

Так, выдающийся археолог, этнолог и музеевед, исследователь древностей Кавказа и Подонья, руководитель северокавказской экспедиции ГАИМК А.А. Миллер (1875–1935), посетивший Адыгейский областной музей в 1930 г., был арестован по т.н. «делу славистов», или «делу Русского музея», сотрудникам которого инкриминировали участие в деятельности «контрреволюционной фашистской организации» «Российская национальная партия»; отправленный в ссылку, он умер в Карлаге [11 (с. 198), 12 (с. 187–188)]. Примечательно, что об этих репрессиях первой половины 1930-х гг. (с, указанием фамилий их жертв) в 1936 г. рассказал в одной из своих публикаций финский исследователь А.М. Тальгрэн – «одна из ключевых фигур археологии Старого Света первой трети XX в.» [14]. Этот благородный жест в защиту советских коллег моментально сделал его невездным. И визит 1935 г., когда он оставил свой отзыв в Тетради Адыгейского музея, был для него последним посещением нашей страны, хотя до этого, будучи тесно связан с российской археологией еще с дореволюционных времен, проф. Тальгрэн неоднократно и беспрепятственно посещал СССР [13].

Печальный перечень репрессированных продолжает С.Г. Мамсуров (1882–1937) – участник установления Советской власти на Северном Кавказе, соратник С. Кирова, С. Орджоникидзе и И. Джугашвили, в момент приезда в Краснодар в 1928 г. находившийся на пике своей партийно-политической карьеры (зам. пред. Исполнительного комитета Северо-Кавказского краевого Совета), в 1935 г. был арестован по обвинению в троцкизме и впоследствии расстрелян. Крылатое выражение о «революции, пожирающей своих детей», может быть отнесено не только к С. Мамсурову, но и к С.П. Колышко (1881–1937) – ветеран революционного движения и участник гражданской войны, он в 1929 г. являлся одним из членов Общества политкаторжан и ссыльнопоселенцев [14]; арестован и расстрелян по обвинению в «контрреволюционной деятельности».

В 1937 г. по абсурдному обвинению в подготовке покушения на И.В. Сталина был арестован и расстрелян «патриарх дореволюционной казачьей этнографии» 74-летний Г.М. Концевич (1863–1937), возродивший Кубанский казачий хор, а в последние годы жизни активно занимавшийся записью адыгского музыкального фольклора [12 (с. 189)]. Тогда же был арестован и в 1938 г. приговорен к высшей мере наказания краснодарский археолог, исследователь кубанских дольменов и городищ Н.А. Захаров (1883–1938) [12. с. 202]. В 1937 г. за участие в деятельности контрреволюционной организации был расстрелян Н.Т. Лихницкий (1897–1937), работавший зам. директора Северо-Кавказского горского НИИ и научным сотрудником Северо-Кавказского музея горских народов.

Самая трагическая по своим последствиям волна репрессий 1937–1938 гг. унесла жизни и целой плеяды представителей национальной кавказской интеллигенции. Все они были уничтожены по обвинению в «буржуазном национализме», участии в подпольных контрреволюционных организациях. В Тетради отзывов мы встречаем имена некоторых из них.

Это С.М. Ашхацава (1886–1937) – видный абхазский государственный деятель, просветитель, автор одного из вариантов абхазской письменности, писатель, историк, публицист и драматург. Т.А. Шеретлоков (1884–1937) – адыгский просветитель, автор первой кабардинской азбуки, фольклорист, литератор и лингвист. К.Ж. Батыров (1905–1937) – педагог, директор Кабардино-Балкарского НИИ в 1932–1933 гг., позднее – директор партийного издательства обкома ВКП(б). А.К. Тлюняев (1902–1938) – общественный и политический деятель, один из первых адыгских журналистов, возглавлял Северо-Кавказское отделение Комитета нового алфавита ВЦИК СССР, в 1935 г. являлся директором НИИ национальных культур Дагестана. И.А.-К. Хубиев (Ислам Карачайлы) (1896–1938) – видный общественно-политический деятель, прозаик и журналист (на момент посещения музея в 1929 г. являлся ответственным секретарем журнала «Революция и горец»).

Репрессии предвоенного времени, обескровившие Красную Армию, также нашли свое отражение в Тетради, один из отзывов в которой написан рукой впоследствии арестованного в 1937 г. батальонного комиссара С.М. Мелющева, военного комиссара 1-й авиационной эскадрильи авиабригады штурманов военной школы летчиков и летчиков-наблюдателей морской и сухопутной авиации имени Сталина (ныне – Ейское ВВАУ).

Среди авторов отзывов мы встречаем и тех, кто уцелел в жерновах репрессий, хотя и оказался временно или до конца жизни отлучен от профессии. Так, директор краснодарского музея А.Ф. Лещенко был арестован после 1931 г., возможно, был сослан. В начале войны он был эвакуирован в Челябинск, где остался преподавать на историческом факультете местного пединститута [12, с. 188].

Выдающийся ученый, наставник нескольких поколений отечественных археологов В.А. Городцов в начале 1930-х гг., по политическим мотивам был уволен со службы в РАНИОН, МГУ и Историческом музее и был вынужден уехать в Ленинград, где работал в Кунсткамере [11 (с. 194)]; в Москву вернулся только в 1934 г.; в этом же году, проводя исследования Елизаветинского меотского городища на Кубани, посетил Адыгейский музей.

Выдающийся кавказовед Л.И. Лавров неоднократно подвергался преследованиям в силу своего «непролетарского происхождения».

В 1931 г. был уволен из Северо-Кавказского горского НИИ А.Н. Дьячков-Тарасов как «неудовлетворяющий в методологическом отношении» [15].

12 лет провел в тюрьме и на поселении Г.И. Бройдо, в 1921–1923 гг. бывший заместителем наркома по делам национальностей И.В. Сталина; был одним из соредкторов первых восьми томов 1-го издания «Большой Советской энциклопедии», курируя статьи «по национальному вопросу»; впоследствии поднялся в высший эшелон власти советской партноменклатуры, заняв пост 1-го секретаря ЦК КП Таджикистана.

В числе специалистов, «побывавших в заключении, но сравнительно быстро выпущенных», А.А. Формозов называет С.Н. Замятнина (на момент посещения АОМ в 1928 г. сотрудника ГАИМК), А.А. Иессена (помощника хранителя эллино-скифского отделения Эрмитажа, во время приезда в Краснодар в 1928 г. изучавшего памятники медного и бронзового века в Прикубанье, в т.ч. и по музейным собраниям Северного Кавказа) и Б.В. Лунина [11 (с. 204)] (оставившего отзыв в 1937 г., когда он был уже в ранге ученого секретаря Общества изучения Азово-Черноморского края).

И, завершая этот трагический список, назовем и самого И.А. Наврузова – осужденный по «адыгейскому делу», маховик которого стал раскручиваться с осени 1937 г., он погиб в лагерях в марте 1943 г. [9, с. 165].

Можно только предполагать, каких высот могли бы достичь эти, в подавляющем большинстве неординарные личности, не попади они под безжалостный каток репрессивной системы.

Однако к жертвам советского строя можно отнести не только тех, кто был безвинно репрессирован или даже ненадолго попал в застенки ГПУ–НКВД. Жертвой системного насилия, заставлявшего людей идти на компромисс с аморальным и бесчеловечным режимом, было все население страны.

В Советском Союзе планомерно и поэтапно осуществлялся изощренный план тотального подавления инакомыслия и запугивания тех, кто потенциально был к нему способен. От преследований не был застрахован никто, от них не спасали ни искренняя (или хотя бы декларируемая) лояльность большевистской идеологии, ни уж тем более высочайший профессионализм и преданность людей своему делу, объективно работавшие на благо страны.

Кто-то искренне верил в риторику большевиков, ведь «социальный романтизм 1920-х годов увлек многих гуманитариев, <...> которые готовы были признать свою особую миссию» в переустройстве общества на более справедливых социальных законах [16]. К таковым главным образом относилась

молодая интеллигенция послеоктябрьского «призыва», но большинство просто смирялось и было вынуждено хоть как-то сосуществовать с советской властью, действия которой были заведомо непредсказуемы.

Будучи своеобразным полигоном общероссийских процессов, состояние музейного дела в Адыгее отражает все повороты государственной (и в первую очередь – национальной) политики – недостаток финансирования, постепенное свертывание национальных программ, разгром краеведческого движения, подавление инициативы и идеологический диктат партии в сфере науки и культуры.

Отзывы Тетради буквально вопиют, повествуя о бесплодной борьбе директора музея с костенеющим управленческим аппаратом. Так, выражением сочувствия и солидарности коллег являются многократные пожелания нового, более просторного помещения, а также сожаления о предстоящем переезде в Майкоп и ожидаемом в силу этого временном прекращении работы музея. Все это свидетельствует о безразличии органов власти к проблемам музея, о равнодушии и некомпетентности бюрократии, по воле которой музей четырежды (!) менял свое местопребывание в Краснодаре, а после переезда в Майкоп долго не мог обрести постоянное помещение.

Несмотря на то, что музей в полной мере выполнял возложенные на него обязанности, средств на его развитие выделялось крайне мало. И. Наврузов вынужден был в одиночку заниматься формированием экспозиции. Многие годы он являлся единственным сотрудником музея (для сравнения – Краснодарский краеведческий музей, по свидетельствам современников, значительно уступавший Адыгейскому музею, располагал четырьмя ставками) [3, с. 184], и только в апреле 1932 г. в его штате появилась еще одна единица (художника-оформителя). При переезде в Майкоп повторилась та же история: так, встречавшийся в этот период с И. Наврузовым экскурсовод Дома туриста «Аше» из Шапсугского района С.Н. Кизичев с негодованием отмечал, что «такому серьезному работнику нередко приходится отвлекаться от научной работы для выполнения работы чисто технической, например: мне приходилось наблюдать его за вколачиванием гвоздей» (11.05.1939) (*данный отзыв, не вписывающийся в хронологические рамки источника, содержится на отдельном листе, вложенном в музейную Тетрадь*).

Столь же постоянным сюжетом отзывов стало упоминание историографических трудов, подготовленных к печати И. Наврузовым, но так и не увидевших свет в силу отсутствия соответствующего финансирования.

Такова была циничная и лживая система, во многом выстроенная на откровенном эксплуатации энтузиазма людей, хотя последний в значительной степени стал угасать, сменяясь отрезвлением и разочарованием практическим воплощением «национального вопроса», отголоски чего в завуалированной форме можно обнаружить и на страницах исследуемой нами Тетради.

Напомним, что академическая атмосфера тех лет формировалась под влиянием общественно-политического климата, замешанного на полном разрыве с прошлым, отрицании и бичевании всего дореволюционного, в т.ч. и национальной политики империи. В исторической науке того времени безраздельно господствовала школа М.Н. Покровского, который в дореволюционной России «в соответствии с большевистской доктриной видел только империалистическое полицейское государство, «тюрьму народов» и по мере сил обличал ее колониальные захваты» [17]. Всячески подчеркивалась прогрессивная роль советской власти, уничтожившей национальный гнет и предоставившей народам бывшей империи право на сохранение самобытности и дальнейшее развитие национальных языков и культур.

И эта принципиально иная картина мира, созданная большевистскими идеологами, вступала в сложные процессы взаимодействия с прежними представлениями людей об истории и сегодняшнем дне, деформируя, вытесняя или отторгаясь последними в зависимости от множества привходящих моментов. При этом советская риторика, воспроизводимая тем или иным человеком в конкретной ситуации, далеко не всегда свидетельствовала о перекодировании его мышления и глубоком усвоении им новых ценностей, зачастую являясь средством социальной мимикрии.

И в этом отношении тексты музейной тетради, соотносимые с фактами биографий конкретных людей, дают определенное представление как о сложности процессов, протекавших в сознании людей раннесоветской эпохи, так и о факторах объективного и субъективного плана, ответственных за складывание многообразных вариантов их мировидения.

Примечательно, что отзывы, относящиеся к первым годам работы музея, несут на себе минимальный налет идеологии и еще вполне свободны от большевистской риторики.

Старая профессура, представленная главным образом кавказоведами с дореволюционным стажем работы, достаточно осведомленными о трагической судьбе черкесского народа, избегает давать событиям

прошлого какие-либо эмоциональные оценки. Поработавшие в лучших музеях страны, они фиксируют наличие в АОМ ценных экспонатов, но в центре их внимания – не политика, а методика формирования экспозиции, практическое воплощение теоретических положений музейной работы.

Таковы весьма лаконичные отзывы М.К. Мирама (2.04.1928), С.Н. Замятнина (14.09.1928), А.А. Иессена (20.09.1928), Н.А. Захарова (28.10.1928), А.А. Миллера (27.07.1930), Е.М. Шиллинга (2.08.1930), Ю.М. Соколова (27.08.1936). Первое упоминание авторитетным ученым «Советской власти», которая в будущем «даст возможность выявить всю силу дарований способного народа», относится к 1934 г. и принадлежит проф. В.А. Городцову. Д.Н. Лев ограничивается упоминанием «соцстройки» как заключительного этапа местной истории, освещаемого в экспозиции музея (17.07.1935). Л.И. Лавров, дав в обширном отзыве исключительно высокую оценку Адыгейскому областному музею, не использовал ни один из языковых оборотов и штампов советского новояза (29.11.1937).

Подобное интуитивное или сознательное избегание каких-либо упоминаний о политических реалиях эпохи весьма красноречиво и может быть расценено как некая скрытая форма оппозиции господствующему строю.

Однако со временем подобное умолчание могло объясняться уже принципиально иными факторами – усилением идеологического диктата и открытыми репрессиями в отношении ученых. Кажется, что авторы отзывов, уже ставшие свидетелями многочисленных «чисток» (а некоторые – и успев воочию познаться с карательным аппаратом), взвешивают каждое слово, прежде чем положить его на бумагу.

Вероятно, именно с непростыми жизненными коллизиями можно увязать замеченный нами удивительный факт сознательного искажения двойных фамилий, вероятно, вызывающих опасные ассоциации с дореволюционным прошлым и непролетарским происхождением: так, известный кавказовед А.Н. Дьячков-Тарасов в подписи оставил вторую часть своей фамилии, а историк Я.Н. Раенко-Туранский – первую.

К вышеупомянутым текстам ученых-гуманитариев по степени аполитичности их содержания примыкают отзывы специалистов, сфера научных интересов которых была весьма далека от общественных дисциплин: сотрудника Украинского института селекции (г. Одесса) А.И. Державина, выявлявшего «посевы многолетней ржи в Карачаевской и Черкесской области, которая в старину (100–200 лет) там культивировалась» (29.05.1934) и сотрудника Ботанического института АН СССР, докт. биол. наук В.П. Малеева, обратившегося в музей «за консультацией по специальному вопросу – истории сельскохозяйственного использования земель в предгорьях Краснодарского края при черкесах» (29.06.1938).

Совершенно иначе выглядят записи профессиональных пропагандистов (осевших в региональных НИИ научных работников, журналистов, писателей, активистов общественных организаций), демонстрирующих собой типичные образчики нового мышления и лексики. Принадлежащие им тщательно сработанные и идеологически выдержанные тексты дают представление о степени проникновения в их сознание основных мифологем советского общества.

«Адыгейский обл. национальный музей является одной из ярких иллюстраций того колоссального культурного подъема, который произошел в нацобластях в период диктатуры пролетариата в результате ленинской национальной политики. Музей имеет много ценных историкоэтнографических материалов, но главное его достоинство в правильно поставленной экспозиции, довольно четко отражающей смену общественноэкономических формаций, колониальную политику царизма, борьбу горцев черкесов за независимость», – пишет научный работник А.И. Иванов (9.12.1933). «Обследовав адыгейский краеведческий музей, благодарю зав. музеем за удовольствие увидеть, как правильное проведение в жизнь ленинско-сталинской национальной политики перетворило угнетенную колонию в национальную область, строящую с другими народами СССР социализм.

Богатые материалы музея должны стать достоянием трудящихся всего Советского Союза и иностранного пролетариата» (старший научный работник [нрзб], 6.02.1934). По мнению вышеобозначенной категории посетителей, музей успешно содействует осуществлению национальной политики партии в сфере коренизации, будучи «ценным подспорьем <...> в деле подготовки просвещенных кадров адыге» (ответственный секретарь Северо-Кавказского отделения Института повышения квалификации педагогов М.К. Костин, 15.06.1929) и являясь незаменимым «в деле поднятия культурного уровня и национального самосознания населения области» (научный сотрудник Ставропольского музея Я.А. Миронов, 8.08.1929).

Вполне естественно, что подавляющее большинство высказанных пожеланий по совершенствованию экспозиции музея касалось отделов, материал которых имел выход на актуальную политическую практику. «Хорошо бы дать отдельный уголок Маркса – Энгельса – Ленина – Сталина о революционном]

национальном] движении на Кавказе» – советует Г.И. Бройдо (18.06.1933). «Больше представить конкретных фактов из истории классовой борьбы черкесского народа!», – восклицает замдиректора краевого Горского НИИ Н.Т. Лихницкий (24.04.1934).

«В самой экспозиции необходимо ярче оттенить роль партии и отдельных руководителей в перестройке быв. единоличного хозяйства», – советует директор Новочеркасского краеведческого музея И.П. Резников (10.05.1935), высказывая также пожелание «иметь побольше связи с партийными и иными организациями» и «в дальнейшем вести работу по пути, указанному вождями партии». «Значительно слабее отделы колониальной политики царизма и гражданской войны», – сокрушается научный работник крайистпарта Я.Н. Раенко и рекомендует «больше обратить внимание на борьбу с контрреволюцией] и на руководящую роль партии» (7.03.1936).

«Усилить показ Социалистической Адыгеи», – требует Б.В. Лунин (12.09.1937). Ужесточение с 1929 г. религиозной политики государства нашло свое отражение и в Тетради отзывов: активисты Союза воинствующих

безбожников, посетившие музей в 1930 и 1931 гг., предлагают развернуть в нем исламский антирелигиозный отдел, а И.П. Резников рекомендует «оттенить» роль религии, благословлявшей «слепое подчинение бекам и другим эксплуататорам». Еще один штамп советской эпохи использует оставшийся безвестным корреспондент ТАСС: «Нужен показ превращения женщины-черкешенки из рабы, безмолвно покорной, в женщину, сбросившую тысячелетнее иго рабства, женщину, которая наравне с мужчиной строит новое общество» (20.07.1935).

Здесь же присутствуют и весьма эмоциональные высказывания писателей, очевидно взволнованных ярким рассказом И. Наврузова и зрелищным материалом экспозиции. «Я давно мечтал побывать в Адыг. музее, посмотреть предметы той эпохи, портреты ее героев, портреты ее палачей (Бабыча, Евдокимова) – царских сатрапов» (П.Х. Максимов, 25.10.1935). «Рад был вновь ощутить и проверить в себе всю силу ненависти к старому миру, с таким человеконенавистничеством душившим все живое и своеобразное в прекрасных народах, населяющих наш Союз» (Л.М. Длигач, 22.05.1938).

Отдельным блоком можно выделить отзывы уроженцев Кавказа, чье восприятие реалий прошлого и настоящего, конечно, имело свою специфику. Сохраняя память о былой независимости и обстоятельствах ее утраты, они готовы были принять Советскую власть даже со всеми ее мучительными издержками (вроде уничтожения старой элиты), надеясь на возрождение культурной традиции, искусственно прерванной в период нахождения их народов в составе царской России. По мнению В.А. Шнирельмана, «угнетенные в прошлом народы разделяли общие ценности политического равенства и социальной справедливости, декларировавшиеся большевиками; они были согласны совместными усилиями строить новое общество, но при этом желали сохранить свои языки и культурные особенности» [18].

Отражением этих коллективных «иллюзий в условиях прозрачной свободы» (Шнирельман) и являются их отзывы. Характерными для них общими местами являются ритуальные восхваления Советской власти и упоминание классового и национального факторов в их неразрывной связи.

«Судьба черкесского народа ужасна. Для нас, горцев, она должна быть вседневным напоминанием о мерзости и жестокости царизма, постоянным кличем к борьбе с хищниками империализма, мечтающими о реставрации в бывшей России старых общественных отношений и национального гнета» (Дзахо Гатуев, 26.08.29).

«Только Советская власть призывает из небытия к новой жизни гибнущие маленькие народы, и только она поможет Черкессии внести в сокровищницу интернациональной социалистической культуры свою лепту» (Ислам Карачайлы, 30.10.1929).

«Музей показывает эксплуатацию феодалами безправных крепостных, историю классовой борьбы, небывалую в истории народов зверскую колонизацию края огнем и мечом шествовавшего капитализма, музей показывает мощный рост экономики и культуры в послеоктябрьский период и успешное социалистическое строительство в аулах» (Битлюстен Кoble, 24.05.35).

Естественно, чтобы продемонстрировать расцвет национальной культуры при большевиках, необходимо было либо принизить уровень ее развития в прошлом, либо отрицать сам факт ее наличия, хотя великолепная подборка И. Наврузовым этнографических материалов недвусмысленно опровергала этот постулат.

«Не вина Черкессии и черкесского народа, а их беда, их несчастье, их величайшая трагедия, что черкесы не смогли внести в сокровищницу человеческой культуры столько, сколько внесли англичане, французы и др. «великие», «исторические» народы. Борьба за место под солнцем, за право дышать

воздухом, борьба с гасителями живого духа не давала возможности черкесскому народу думать о чем-либо другом» (Ислам Карачайлы).

Апофеозом самоуничужения является отзыв «черкесского поэта» Б. Кобле: «Прошлая история адыге такова, что о создании культуры и мечтать было нельзя. Только теперь, благодаря Октябрьским завоеваниям трудящиеся Автономной области получили возможность развивать свою культуру национальную по форме и социалистическую по содержанию».

Своеобразной отповедью тем, кто не замечал самодостаточность адыгской культуры и отбрасывал за ненадобностью ее дооктябрьские пласты, является отзыв выдающегося грузинского лингвиста Симона Джанашиа, написанный в исполненной внутреннего благородства манере: «С величайшим волнением ознакомился с фрагментами истории и культуры благородной черкесской расы. Тут еще раз можно почувствовать, какой героический дух и совершенный вкус имел народ, которому вандалы нового времени отрезали нормальные пути развития» (14.05.1929).

Примечательно, что среди самих адыгов тоже наблюдается весьма значительное расхождение в оценке политической действительности. И если на одном ее полюсе – восторженный энтузиаст послеоктябрьского поколения Б. Кобле, безусловно воспринявший ценности новой эпохи, то на другом – Таусултан Шеретлоков, интеллигент аристократического происхождения с еще дореволюционным опытом просветительской деятельности, в своем отзыве отказавшийся от славословий в адрес правящего режима и употребления лозунгов и языковых клише «пролетарского стиля».

Открытым вызовом системе можно считать употребление Т. Шеретлоковым терминов «единый адыг-черкесский народ» и «общенациональный Адыгейский музей», явно диссонирующие с официальным научным дискурсом и замыслами столичных архитекторов нациестроительства, взявших курс на создание четырех адыгских автономий и соответствующих им «разных» адыгских народов (т.н. адыгейцев, кабардинцев, черкесов и шапсугов) (*напомним также, что брошюра, являющаяся своего рода отчетом о проделанной работе, самим И. Наврузовым была озаглавлена «Адыгский областной музей», что вряд ли является случайным*). Напомним, что отстаивание идеи единства адыгского этноса (в т.ч. и сохранения общего этнического самоназвания) стало одной из причин преследований и последующего осуждения (в 1930 г.) другого адыгского просветителя – Сефербия Сиюхова (*похоже, что это было актуальным и для самого директора музея – так, на полях отзыва инженера Г. Казбекова (6.09.1928) рукой И. Наврузова внесено уточнение: «осетин»*) [19].

Терминологическая путаница переходного этапа национально-административной инженерии явственно прослеживается по текстам Тетради, в которых этноним «черкесы», в силу исторической инерции еще обозначающий титульное население Адыгейской автономии, по частотности употребления явно превалирует над термином «адыгейцы».

Особенность, которую невозможно не заметить в текстах уроженцев Кавказа – подчеркивание ими своей этнической принадлежности. Они выступают не только как представители организаций, направивших их в командировку в Адыгею, но прежде всего – как неотъемлемая часть своих народов (*похоже, что это было актуальным и для самого директора музея – так, на полях отзыва инженера Г. Казбекова (6.09.1928) рукой И. Наврузова внесено уточнение: «осетин»*), еще сохранивших в своей коллективной памяти образ черкесов.

Так, Шалва Сослани отмечает, что его всегда интересовала судьба черкесов как народа, близкого грузинам. Свой прочувствованный отзыв, полный восхищения Адыгеей, музеем и его руководителем («вдохновенным черкесом Ибрагимом Наврузовым»), он завершает адыгским «Орапсау» («Да здравствует!») и благопожеланием на грузинском языке.

На этом же языке (с последующим собственноручным переводом на русский) написаны отзывы грузинских лингвистов Симона Джанашиа (14.05.1929) и Георгия Рогава (8.09.1935). Посвященные музею и его творцу И. Наврузову, эти двуязычные тексты одновременно являются и неслышным гимном любви к собственной национальной культуре, на фоне которого отчетливее понимаешь всю степень глубокого уважения авторов к адыгам и их культуре.

На адыгском языке (полностью или частично) написаны отзывы кабардинских просветителей Магомета Дышекова (17.03.1931), Таусултана Шеретлокова (17.03.1931) (оба – на латинской графической основе) и Мухамеда Цагова (10.11.1936) (на кириллице), с гордостью демонстрирующих важнейшее приобретение советской эпохи – национальную письменность, которая, впрочем, в соответствии с поворотами эпохи культурной революции, за полтора десятилетия успела примерить на себя три графические системы.

Ряд отзывов за 1930–1935 гг. принадлежит иностранцам. Полная картина будет ясна только после окончательной расшифровки рукописных текстов (часть которых так и осталась в Тетради на языке

оригинала), однако уже сейчас можно четко отделить друг от друга сдержанные, лишенные идеологических штампов записи профессуры и промышленных специалистов и отзывы делегаций «рабочей молодежи», наполненные пропагандистскими клише о «пролетарской диктатуре, правильно разрешающей национальный вопрос» и др.

В целом, изучение текстов Тетради отзывов АОМ с точки зрения социолекта раннесоветской эпохи может стать предметом отдельного исследования. Нам же хотелось бы ограничиться только рядом самых общих замечаний.

Следует отметить, что основные характерные особенности языка первых десятилетий Советской власти, неоднократно описанные филологами [20], присутствуют и в анализируемом нами источнике.

Так, тексты музейной Тетради изобилуют множеством аббревиатур различных видов. Здесь мы можем встретить не только названия центральных и местных органов власти и партийных организаций, еще не забытые нашими современниками, но и уже давно вышедшие из употребления, либо изначально малоупотребительные ГАИМК (Государственная академия истории материальной культуры), ССП (Союз советских писателей), В.К. (Всесоюзный комитет), НКП (народный комиссариат просвещения), ТЭУ ВЦСПС (туристско-экскурсионное управление Всесоюзного центрального совета профессиональных союзов), а также «Азчериздат», Истпарт, нацкавполк, соцстроительство (соцстройка) и мн. др.

Еще одной особенностью того времени является повсеместная склонность к сокращениям (помимо аббревиатур), особенно хорошо заметная по подписям под отзывами: «Завед. отд. соц. культ. краевого горского института», «Пом. хран. Гос. Эрмитажа», «Зав. Куб. научн. Музеем», «Член Правл. Об-ва Изучения Ад. Обл.», «Хранитель Кавказ. Отд. Гос. Центр. Музея Народоведения», «Бригада Сев. Кав. Землячества» и мн. др. Встречаются такие сокращения и в основном поле отзывов: «Посетив ист. худ. нац. муз.

Адыг. нар я считаю...» (из текста «уполномоченного по делам музеев»). Примечательно, что подобный «шизофреническо-телеграфный стиль» (Курт Воннегут) менее всего характерен для «старой» интеллигенции.

Господствующая идеология перманентного противостояния внешним и внутренним врагам привела к тому, что даже повседневные реалии музейной жизни воспринимаются в категориях классовой борьбы. Например, Н.Т. Лихницкий призывает И. Наврузова «*по-большевистски драться* (курсив наш – М.Г.) за получение музеем» нового помещения (27.06.1932). Два года спустя, когда музей уже находился в новом здании, тот же Н.Т. Лихницкий советовал использовать его «для дальнейшего *наступления* (курсив наш – М.Г.) и превращения музея в лучший горский музей нацобластей».

Встречаются и великолепные примеры канцелярита: «Посещение музея обогатило мои знания о адыгейском народе и дало возможность пользоваться цифровым и историческим материалом необходимым для правильного освещения показа Адыгейской Автономной Области на Всесоюзной с-х выставке в г. Москве» (отв. секретарь Краснодарского краевого выставочного комитета Полупин, 18.06.1938).

Подобный тяжеловесный бюрократический стиль, осовремененный идеологическими вкраплениями в текст, приводивший в содрогание «старую» интеллигенцию, ею же нещадно высмеивался; невозможно не привести фрагмент письма Ибрагима Цея Симону Джанашиа (оба являются и авторами отзывов в исследуемой нами Тетради) от 6 января 1930 г.: «Будем утешаться надеждой, что ... диалектический ход событий (кажется, верно я выразился) и объективные условия примут благоприятное новой политической и хозяйственной конъюнктуре направление и Вы сможете высказать свое конкретное отношение к нашему желанию Вашего приезда к нам. Я искренне рад, что вы мои успехи в новом русском языке оценили...» [21].

Выше мы уже приводили типичные образчики советского социолекта из текстов отзывов – устойчивые сочетания, шаблонные выражения, восхваляющие национальную политику партии и рисующие успехи культурного строительства Адыгеи и черкесского народа.

В то же время подмеченная филологами тенденция на нарочитую брутальность речи, превращение языка советской эпохи в язык «инвективного пафоса и брани» [22] в исследуемых нами текстах не наблюдается, а метафорические эпитеты подобного рода («хищники империализма», «мерзость и жестокость царизма», «белогвардейщина», «белогвардейские зверства», «царские сатрапы») единичны. Вероятно, это объясняется спецификой исследуемого объекта, изначально не соответствующего стилистике и лексикону газетной статьи или публичного выступления. Свой отпечаток, без сомнения, наложил и достаточно высокий образовательный уровень авторов текстов музейной тетради (представленной главным образом «старой» и «новой» («красной») интеллигенцией), в принципе не позволяющий им опускаться до стилистической площадной брани.

Специфика отбора И. Наврузовым авторов записей в Тетради предопределила и достаточно высокий уровень грамотности. Откровенным исключением являются отзывы только начинающих изучать русский

язык студентов Ленинградского восточного рабфака и семьи рабочих Дорониных; последние, вероятно, совершенно случайно попали в число «избранных» посетителей музея. Примечательно, что в отзыве Дорониных встречается одно из трех (на 110 отзывов) упоминаний И.В. Сталина. Столь же редко, кстати, в Тетради упоминается и В.И. Ленин, по одному разу – К. Маркс и Ф. Энгельс. Всего лишь трижды цитируется в Тетради знаковая сталинская фраза о культуре «национальной по форме, социалистической по содержанию». Другие ритуальные цитаты и отсылки отсутствуют.

Обращает на себя внимание и уровень эрудиции авторов, в т.ч. и среди представителей кавказской интеллигенции. Так, Ислам Карачайлы свой отзыв начал стихотворными строками В.А. Жуковского, а Дзахо Гатуев привел известное высказывание П.К. Услара о «кладбище народов». Латинские выражения использованы дважды: «Vivat, crescat, floreat» (А.Н. Дьячковым–Тарасовым и в совместном отзыве иностранных профессоров А.М. Тальгрена и Г.А. Моора) и «status quo» (поэтом Т. Чурилиным).

Однако дух времени может быть не только передан посредством стилистических особенностей текста, но и содержаться в других, не менее колоритных, мелочах.

Так, в Тетради отзывов нашла свое отражение и новая служебная иерархия, сменившая дореволюционную табель о рангах. Авторы текстов практически всегда, зачастую с плохо скрываемой гордостью, указывают свое положение в структуре советского чиновничества – ведь «громкие» должности ответственных работников, постоянные или присвоенные на время командировки, определяли их статус и доступ к соответствующим привилегиям.

Иногда, при наличии разностатусных должностей и / или званий, автор фиксирует только то из них, которое для него наиболее актуально («член Союза советских писателей», «заслуженный деятель искусства») или является претензией на особое положение («черкесский поэт»).

Примечательно, что прославленные ученые ограничиваются указанием своего профессорского звания, которое, будучи еще недевальвировано, в полной мере передает исключительно высокий статус своего владельца. Исключением является А.Н. Грен, подчеркнувший, что он не только «профессор истории Сухумского пединститута», но и «специалист по истории Кавказа, работающий над нею 47 лет»; вероятно, это был своеобразный выпад в адрес поколения «выдвиженцев» – зачастую профессионально малопригодных, но идеологически «правовверных» и в силу этого карьерно успешных молодых ученых (о таковых В.А. Шнирельман писал: «искренне уверенные, что следование «правильным» методологическим подходам может с лихвой компенсировать нехватку знаний об изучаемом предмете» [17, с. 55]).

Зачастую, при отсутствии у человека достойной должности в настоящее время, его подпись может отсылать нас к событиям минувшего, в которых он играл значимую роль, как, например, «бывший председатель армейского районного военно-революционного совета в 1918 г. и председатель 1-го фронтового съезда Кубанской революционной армии К. Ищенко».

Крайне редко встречается вариант, когда автор в развернутом виде фиксирует свой статус в основном поле очерка, как, например, сделал это поэт Тихон Чурилин, по воспоминаниям современников, отличавшийся своим непомерным тщеславием [23]: «завлит, автор текста оперы «Адыгея», член Горкома писателей, член Секции научных работников и ответственный работник Наркомпроса РСФСР и ГАБТа (подготовки новой революционной оперы), член экспедиции в Адыгею».

* * *

Учитывая, что данное исследование – фактически первое масштабное обращение к Тетради отзывов Адыгейского областного музея, неудивительно, что за скобками нашего повествования осталось множество любопытных нюансов, фактов, имен, а ведь только взятые в совокупности, они, сплетаясь воедино, и формируют цельное полотно – неповторимый облик страны Советов.

Не исключено, что расширение документальной базы (прежде всего – в плане персоналий), максимальный учет исторического контекста и использование иного, более тонкого методологического инструментария, позволят позднейшим исследователям дать собственную, отличную от нашей, интерпретацию событий, отраженных в изучаемом документе.

Однако уже нынешнее «прочтение» источника позволяет увидеть, что избирательный характер восприятия новых ценностей конкретным человеком зависел от целого ряда факторов – субъективного (этнической принадлежности, прежнего и нынешнего общественного статуса, образовательного уровня и даже опыта общения с карательным аппаратом) и объективного (исхода очередной научной дискуссии, успехов пропагандистских или репрессивных кампаний) плана. Тем самым тексты отражают постепенное

формирование нового советского образа мышления, сложные варианты переплетения этнической и надэтнической (советской социокультурной, классовой) идентичностей. Подобная многовариантность мировосприятия, угрожавшая основам советского строя и еще наблюдавшаяся в исследуемый период, неизбежно должна была исчезнуть (разделив судьбу многословности и многоукладной экономики), а доминировать должен был новый советский образ мышления. Однако до окончательного формирования базовых черт homo советикус было, конечно, еще очень далеко.

Библиография

1. Тишков В.А. Антропология российских трансформаций // III Конгресс этнографов и антропологов России: тезисы докладов. М., 1999. С. 13.
2. Тетрадь отзывов об Адыгейском областном историко-краеведческом музее [4.10.1927 – 13.07.1938] // Национальный музей Республики Адыгея. – Фонд письменных источников и фотографий. – НМРА-13221/1.
3. Адыгский областной музей. Краснодар, 1929. С. 25–26.
4. Пономарев А. Об Адыгейском областном музее // Адыгейская правда. – [?] августа 1938 г.
5. Фонд Ибрагима Наврузова. Т. 3. С. 65.
6. Архив Адыгейского республиканского института гуманитарных исследований им. Т.М. Керашева. – Фонд ценных материалов.
7. Кудай М.А. Адыгейский историко-этнографический музей и его первый директор – Наврузов Ибрагим Асланбекович // Сборник материалов, научных статей Национального музея Республики Адыгея. Вып. IV. Краснодар: Изд-во Солодовникова А.Н., 2013. С. 21–29.
8. Бузаров Аз.К., Губжоков М.Н. Наврузов Ибрагим Асланбекович (1884–1943) // Памятные даты по Республике Адыгея на 2014 г.: библиогр. указ. / Нац. б-ка Респ. Адыгея, Отд. краевед. и нац. лит. Майкоп, 2013. С. 56–65.
9. Бузаров Аз.К., Губжоков М.Н. Ибрагим Наврузов: портрет на фоне эпохи (к 130-летию со дня рождения) // Вестник науки Адыгейского республиканского института гуманитарных исследований им. Т.М. Керашева. Вып. 5 (29). Майкоп, 2014. С. 161–165.
10. Страницы отечественного кавказоведения. М.: Наука, 1992. С. 8.
11. Формозов А.А. Русские археологи и политические репрессии 1920–1940-х гг. // Российская археология. 1998. № 3. С. 198.
12. Кузнецов И.В. Генеалогии и конфигурации местной науки // «Войны памяти или примирение с прошлым»: экспертный доклад. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2013. С. 187–188.
13. «Надо торопиться жить, торопиться работать»: письма А.С. Лебедева А.М. Тальгрену / Составители С.В. Кузьминых, О.М. Мельникова, К.В. Ванюшева // Вестник Удмуртского университета. Серия «История и филология». 2008. Вып. 2. С. 171.
14. Политическая каторга и ссылка. Биографический справочник членов О-ва политкаторжан и ссыльно-поселенцев. М.: Изд-во Всесоюзного Общества политкаторжан и ссыльно-поселенцев, 1929. С. 255.
15. Темирболатова А.И. Проблемы языковой политики и языкового строительства на Северном Кавказе (на материале рукописей архивного фонда Р-1260 – ГАСК «Северо-Кавказский горский историко-лингвистический научно-исследовательский институт им. С.М. Кирова» (1926–1937)). Ставрополь: СГУ, 2012. С. 113.
16. Страницы отечественного кавказоведения. С. 20.
17. Шнирельман В.А. Злоключения одной науки: этногенетические исследования и сталинская национальная политика // Этнографическое обозрение. 1993. № 3. С. 52.
18. Шнирельман В.А. В поисках самобытности: у истоков советского мультикультурализма // Неприкосновенный запас. 2011. № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nlobooks.ru/node/1137>.
19. Бузаров Аз.К. Сиюхов Сефербий Хацуевич // Адыгская (черкесская) энциклопедия. М., 2006. С. 1039.
20. Селищев А.М. Язык революционной эпохи. Из наблюдений над русским языком последних лет (1917–1926). М., 1928.
21. Джанашиа С.Н. Черкесские дневники / пер. с грузинского Р. Джанашиа, Т. Уджуху. Тбилиси: Кавказский дом, 2007. С. 253.
22. Богданов К.А. Риторика ритуала. Советский социолект в этнолингвистическом освещении // Антропологический форум. 2008. № 8. С. 324.
23. Шу Ш.С. К истории неосуществленного замысла оперы «Адыгея» // Музыкальная академия. 1993. № 3. С. 187.

Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»

Для публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета» принимаются статьи на русском или английском языках, содержащие результаты актуальных фундаментальных и прикладных исследований, передовых наукоемких технологий, научных и научно-методических работ.

1. Основные документы, необходимые для публикации

1.1. Один экземпляр статьи в бумажном виде и на электронном носителе отдельным файлом (на диске); на наклейке диска (дискеты) (обязательно!) указываются фамилия автора (авторов) и название статьи.

1.2. Полные сведения об авторе (авторах) на русском и английском языках в бумажном виде и в электронном варианте, оформленном отдельным от статьи файлом, который включает в себя следующие данные:

- фамилия, имя, отчество (полностью) каждого автора;
- место работы (наименование организации), ученая степень, ученое звание, должность каждого автора;
- контактные телефоны, почтовый индекс и адрес, адрес электронной почты (e-mail) каждого автора.

1.3. Сопроводительное письмо на бланке учреждения, где выполнена работа.

1.4. Внешняя рецензия доктора наук (по желанию).

1.5. Акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати – для физико-математических, химических, биологических, технических, экономических наук и науки о земле.

1.6. Справка об учебе в аспирантуре или докторантуре для аспирантов и докторантов.

1.7. «Лицензионный договор» (один на авторский коллектив) в 2-х экз. Без Договора статья не будет опубликована. Текст Договора размещен на сайте журнала «Известия КБГУ».

2. Правила оформления статьи

2.1. Объем статьи – в пределах 15 страниц формата А4, интервал – 1,5, размер шрифта Times New Roman Cyr 14 пт; поля страницы: слева – 3 см, справа – 1 см, сверху – 2,0 см, снизу – 2,5 см.

Краткие сообщения – в пределах 4 машинописных страниц, включающих не более 2 рисунков и 2 таблиц.

2.2. Статья должна включать:

- индекс УДК (универсальная десятичная классификация) в верхнем левом углу;
- название статьи (на русском и английском языках);
- фамилия, имя, отчество автора (авторов) (на русском и английском языках);
- реферат статьи (до 500 знаков) (на русском и английском языках);
- ключевые слова (5–7 слов на русском и английском языках);
- текст статьи, отражающий цель исследования, методы работы, собственно исследования, конкретные выводы;
- Литература (в библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте; номер источника в тексте указывается в квадратных скобках – автоматическая нумерация ссылок не допускается);
- подпись автора (авторов).

2.3. Иллюстрации к статье (рисунки, фотографии) должны быть черно-белыми, четкими (разрешение не менее 300 dpi, расширение *.jpg) и вставлены в текст. Обычный размер иллюстраций – не более половины листа А4. Формулы и символы помещаются в текст с использованием редактора формул Microsoft Education. Таблицы вставляются в текст; ссылки на рисунки и таблицы обязательны; названия таблиц и подрисуночных подписей обязательны.

2.4. Нумерация страниц обязательна.

2.5. Тип файла в электронном виде – RTF.

Образцы оформления литературы:

книга

Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 210 с.

Интегральные схемы: Принципы конструирования и производства / под ред. А.А. Колосова. М.: Сов. радио, 1989. 280 с.

статья из книги, сборника, журнала

Петренко В.И., Доготь А.Я. Пневмогидравлический кавитационный процесс // Геодинамические основы прогнозирования нефтегазоносности недр: тезисы докладов 1-й Всесоюзной конференции. М., 1988. Ч. 3. С. 616–617.

Хлынов В.А. Общегосударственное планирование рыночной экономики: Опыт Японии // Экономист. 1994. № 4. С. 89–94.

Базаров А.Ж. О некоторых нелокальных краевых задачах для модельных уравнений второго порядка // Известия вузов. Математика. 1990. Т. 2, № 3. С. 11–15.

диссертации и авторефераты диссертаций

Ерков С.А. Формирование художественного восприятия произведений изобразительного искусства на уроках изобразительного искусства в 5, 6 классах средней общеобразовательной школы: дис... канд. пед. наук. М., 2006. 184 с.

Вахромов Е.Е. Психологические особенности самоактуализации подростков с отклоняющимся поведением: авторефер. дис... канд. психол. наук. М., 2003. 30 с.

При несоблюдении указанных правил редакция оставляет за собой право не публиковать статью.

3. Порядок рецензирования

3.1. Рукопись направляется на рецензирование ведущим специалистам в данной области (внешнее и внутреннее рецензирование).

3.2. Результаты рецензирования редакция сообщает автору по электронной почте.

3.2. По результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материала, о чем дополнительно сообщается автору.

Статьи представляются в редакционно-издательский отдел ИПЦ КБГУ.

Адрес ИПЦ КБГУ: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Контактный телефон: (8662) 72-23-13.

E-mail: rio@kbsu.ru, izvestia_kbsu@mail.ru. E-mail-адрес защищен от спам-ботов, для его просмотра у вас должен быть включен Javascript.

Ответственный секретарь редакции – **Долбин Игорь Викторович**.

После положительного решения редколлегии о публикации статьи в журнале «Известия КБГУ» автор (или авторы) статьи перечисляет на р. сч. КБГУ плату из расчета 350 руб. (в т.ч. НДС) за страницу рукописи.

Назначение платежа: редакционно-издательские услуги («Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1. В стоимость входят расходы по доставке журнала по территории России. Автор (или авторы) статьи получает 2 экземпляра журнала бесплатно.

Для выкупа дополнительных номеров журнала необходимо передать в редакцию (ИПЦ КБГУ) письмо-заявку с указанием номера и количества экземпляров журнала и перечислить на р. сч. КБГУ плату из расчета 25 руб. (в т.ч. НДС) за один экземпляр журнала с назначением платежа: редакционно-издательские услуги (за журнал «Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1.

Реквизиты КБГУ для платежей:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова» (КБГУ)

Почтовый и юридический адрес:

360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Телефон: 42-25-60,

Voice/fax: +7(495) 3379955

Телетайп: 257245 «Альфа»

E-mail: bsk@kbsu.ru

ОКПО 02069510

ОКОНХ 92110

ОГРН 1020700739234 от 22.07.11 г.

ОКОГУ 13240

ОКАТО 83401000000

ОКЭВД 80.30.1

ОКОПФ 72

ОКФС 12

Банковские реквизиты:

Получатель:

ИНН 0711037537/ КПП 072501001

Отдел № 1 УФК по Кабардино-Балкарской Республике (0401 КБГУ л/с 20046X17540)

Банк получателя:

ГРКЦ НБ Кабардино-Балкарск. Респ. Банка России г. Нальчика

БИК 048327001

Р/с 40501810100272000002

КБК 00000000000000000130

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

Стоимость журнала по подписке, согласно Каталогу «Пресса России», с учетом расходов по доставке журнала по территории России, составляет 378 руб. (в т.ч. НДС).

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

Авторский указатель Т. IX, 2019 г.

А

- Акимова Ю.Н.**, см. Сдобняков Н.Ю.
Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х., Хоконов Х.Б., Савинцев А.П., Таова Т.М. № 3, с. 5–18
Внедрение в научные исследования и учебную практику новых изобретений и патентов. Часть 1. Приборы и методы для измерения плотности жидкометаллических расплавов
- Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х., Хоконов Х.Б., Дышекова Ф.Ф., Кясова О.Х., Лесев В.Н., Таова Т.М.** № 3, с. 66–76
Внедрение в научные исследования и учебную практику новых изобретений и патентов. Часть 2. Приборы и методы для измерения поверхностного натяжения жидкометаллических расплавов
- Алчагиров Б.Б., Кясова О.Х., Дадашев Р.Х., Калажоков Х.Х., Хибиев А.Х., Элимханов Д.З.** № 4, с. 39–44
К вопросу о степени влияния атмосферы азота на поверхностное натяжение галлия
- Алчагиров Б.Б.**, см. Хоконов Х.Б.
Антонов А.С., см. Сдобняков Н.Ю.
Апеков А.М., см. Шебзухова И.Г.
Арефьева Л.П., см. Шебзухова И.Г.
Арчакова Т.И., см. Мусаев Ю.И.
Арчакова Т.И., см. Мусаев Ю.И.
Асхадуллин Р.Ш., см. Осипов А.А.
Афашагов А.А., см. Шебзухова М.А.
- Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Тамаев Т.Х., Хотова Л.В.** № 4, с. 45–49
Влияние щелочных добавок на фазообразование и кинетику в бинарных металлических системах на примере Sn–Pb, In–Zn и Sn–Zn, используемых в электронике
- Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Гуфан Ю.М., Лайпанов М.З.** № 2, с. 32–38
Влияние структурно-фазового состояния поверхности подложки переменного состава на растекание расплава и их связь с диаграммой состояния
- Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Лайпанов М.З., Созаев В.А.** № 3, с. 50–54
Влияние давления на температуру контактного плавления разрыхленных пленок и наночастиц
- Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Хотова Л.В., Лайпанов М.З.** № 1, с. 11–28
Состояние вопроса о влиянии внешних воздействий на процесс контактного плавления
- Ахкубекова С.Н.**, см. Ахкубеков А.А.
Ахкубекова С.Н., см. Ахкубеков А.А.
Ахкубекова С.Н., см. Ахкубеков А.А.
Ахкубекова С.Н., см. Ахкубеков А.А.
- Ахматов З.А., Сергеев И.Н., Хоконов А.Х., Тленкопачев М.Р.** № 3, с. 19–23
Смачивание микрокаплями галлия высокоориентированного графита, интеркалированного атомами калия
- Ахматов З.А.**, см. Сергеев И.Н.
Ахматов З.А., см. Таэр М.С.

Б

- Багов А.М.**, см. Ахкубеков А.А.
- Бажева Р.Ч., Хараев А.М., Инаркиева З.И., Султыгова З.Х., Барокова Е.Б., Бесланеева З.Л.** № 1, с. 52–58
Конденсационные мономеры для синтеза простых и сложных полиэфиров ...
- Байказиев А.Э.**, см. Мусаев Ю.И.
- Барагунова К.В.**, см. Калажоков З.Х.
- Барашев М.Н.**, см. Дышеков А.А.
- Барокова Е.Б.**, см. Бажева Р.Ч.
- Бесланеева З.Л.**, см. Бажева Р.Ч.
- Бжихатлов К.Ч.**, см. Кузамишев А.Г.
- Блиев А.П.**, см. Магкоев Т.Т.
- Богданов С.С.**, см. Сдобняков Н.Ю.
- Бориев А.А., Пшихачев А.Г., Тхакахов Р.Б.** № 4, с. 34–38
Особенности динамических и механических свойств модифицированного полиэтилена низкой плотности
- Борлаков Х.Ш., Эдиев Д.М., Борлакова А.Х.** № 2, с. 39–43
О возможности существования орбитального ферромагнетизма в ян-теллеровских кристаллах, содержащих T_{2g} -ионы
- Борлакова А.Х.**, см. Борлаков Х.Ш.
- Борукаев Т.А.**, см. Пшеноков А.Н.
- Борукаев Э.Т.**, см. Пшеноков А.Н.

Г

- Гавашели Ю.О.**, см. Савинцев А.П.
- Гангапшев А.М.**, см. Таэр М.С.
- Губжиков М.Н.** № 4, с. 64–76
Антропология советскости через призму музейных источников
- Гуфан Ю.М.**, см. Ахкубеков А.А.
- Гуфан Ю.М.**, см. Хасанов А.И.

Д

- Давыденкова Е.М.**, см. Сдобняков Н.Ю.
- Дадашева З.И.**, см. Дадашев Р.Х.
- Дадашева З.И.**, см. Джамбулатов Р.С.
- Дадашев М.Н.**, см. Дадашев Р.Х.
- Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А., Дадашева З.И., Талхигова Х.С., Дадашев М.Н.** № 3, с. 29–35
Особенности применения методов математического планирования эксперимента при изучении концентрационной зависимости поверхностного натяжения четырехкомпонентных систем
- Дадашев Р.Х.** см. Алчагиров Б.Б.
- Дадашев Р.Х.**, см. Алчагиров Б.Б.
- Дадашев Р.Х.**, см. Алчагиров Б.Б.
- Дадашев Р.Х.**, см. Джамбулатов Р.С.
- Джамбулатов Р.С., Дадашев Р.Х., Дадашева З.И., Талхигова Х.С.** № 2, с. 48–52
Влияние некоторых факторов на изотермы поверхностного натяжения водных суспензий бентонита

Дохов М.П., Шериева Э.Х. № 1, с. 47–51

Смачивание вольфрама, молибдена и никеля расплавами системы индий–теллур и расчет их межфазных энергий

Дышеков А.А., Хапачев Ю.П., Барашев М.Н. № 1, с. 5–10

Тензор Грина для векторного волнового уравнения и модифицированное первое борновское приближение теории

рассеяния. I. Тензор Грина векторного уравнения Гельмгольца

Дышекова Ф.Ф., см. Алчагиров Б.Б.

Е

Ершов П.М., см. Сдобняков Н.Ю.

Ж

Жазаева Е.М., Шадов З.О., Тхакахов Р.Б. № 4, с. 26–29

Структурирование смесей на основе кристаллизующихся полимеров под действием термообработки

Жанимова Д.А., см. Калажоеков З.Х.

З

Зицерман В.Ю., см. Фокин Л.Р.

И

Ибаев Ж.Г., см. Муртазаев А.К.

Иванов А.А., см. Мусаев Ю.И.

Иванов А.А., см. Мусаев Ю.И.

Иванов К.Д., см. Осипов А.А.

Инаркиева З.И., см. Бажева Р.Ч.

К

Калажоеков З.Х., Шериева Э.Х., Барагунова К.В., № 3, с. 24–28

Реуцкая Н.С., Калажоеков Х.Х., Мусова Л.С.,

Жанимова Д.А., Таова Т.М., Хоконов Х.Л.

Аналитическое описание экспериментальных изотерм поверхностного натяжения бинарных систем с широким минимумом

Калажоеков Х.Х., см. Алчагиров Б.Б.

Калажоеков Х.Х., см. Калажоеков З.Х.

Кассан-Оглы Ф.А., см. Муртазаев А.К.

Колосов А.Ю., см. Сдобняков Н.Ю.

Комаров П.В., см. Сдобняков Н.Ю.

Кузмишев А.Г., Бжихатлов К.Ч., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. № 4, с. 50–56

Размерная зависимость поверхностного натяжения наночастиц

Кузмишев А.Г., Шебзухова М.А., Шебзухов А.А. № 4, с. 57–63

Влияние размера на термическое расширение наночастиц

Кулямина Е.Ю., см. Фокин Л.Р.

Кутуев Р.А., см. Дадашев Р.Х.

Кясова О.Х., см. Алчагиров Б.Б.

Кясова О.Х., см. Алчагиров Б.Б.

Л

Лайпанов М.З., см. Ахкубеков А.А.

Лайпанов М.З., см. Ахкубеков А.А.

Лайпанов М.З., см. Ахкубеков А.А.

Лепихин С.А., см. Насыров А.А.

Лесев В.Н., см. Алчагиров Б.Б.

М

- Магкоев Т.Т., Блиев А.П., Хубежов С.А., Тваури И.В., Силаев И.В., Такаев А.А.** Фотохимия молекул на поверхности металлических и металлооксидных систем № 2, с. 58–60
- Муртазаев А.К., Кассан-Оглы Ф.А., Ибаев Ж.Г.** Исследование декорированных систем на квадратной решетке методами Монте-Карло № 2, с. 61–65
- Мусаев Ю.И., Мусаева Э.Б., Арчакова Т.И., Иванов А.А., Санакоева М.О.** Синтез реакцией гетероциклизации ароматического дикетоксима, содержащего два пиррольных цикла № 1, с. 62–64
- Мусаев Ю.И., Мусаева Э.Б., Иванов А.А., Арчакова Т.И., Байказиев А.Э.** Модификация промышленного полиэфирсульфона универсальным модификатором, содержащим оксиматные группы № 1, с. 59–61
- Мусаева Э.Б., см. Мусаев Ю.И.**
- Мусаева Э.Б., см. Мусаев Ю.И.**
- Мусова Л.С., см. Калажоков З.Х.**
- Мясниченко В.С., см. Сдобняков Н.Ю.**
- Мясниченко В.С., см. Сдобняков Н.Ю.**

Н

- Насыров А.А., Чиглинцев И.А., Лепихин С.А.** К вопросу разложения газогидрата в куполе-сепараторе, предназначенном для отбора выбросов углеводородов в шельфовой зоне № 1, с. 35–41
- Новосадов В.С.** Самосогласованная модель строения жидкости в объеме и пограничном слое. Почему жидкость не выдавливается из капиллярного зазора № 3, с. 55–61

О

- Осипов А.А., Асхадуллин Р.Ш., Иванов К.Д.** К вопросу о составе плюмбоферритных фаз в расплаве свинца № 2, с. 44–47

П

- Пшеноков А.Н., Борукаев Э.Т., Шаов А.Х., Борукаев Т.А.** Пластичные материалы на основе ПММА, предназначенные для изготовления базисов зубных протезов № 1, с. 65–71
- Пшихачев А.Г., см. Бориев А.А.**

Р

- Реуцкая Н.С., см. Калажоков З.Х.**

С

- Савинцев А.П., Гавашели Ю.О.** Анализ тепловых явлений, возникающих при облучении хлорида натрия лазерными импульсами высокой интенсивности № 1, с. 29–34
- Савинцев А.П., см. Алчагиров Б.Б.**
- Саламов А.Х.** Методы синтеза полиэфиркетонов и полиэфирэфиркетонов № 1, с. 72–76
- Санакоева М.О., см. Мусаев Ю.И.**

Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Богданов С.С., Соколов Д.Н., Колосов А.Ю., Акимова Ю.Н. Выбор оптимального потенциала для моделирования плавления и кристаллизации наночастиц никеля	№ 4,	с. 5–9
Сдобняков Н.Ю., Мясниченко В.С., Давыденкова Е.М., Антонов А.С., Комаров П.В., Ершов П.М. О структурных превращениях в наночастицах титан–алюминий	№ 4,	с. 13–16
Сергеев И.Н., Хоконов А.Х., Ахматов З.А. Капиллярные свойства эвтектических сплавов галлия в различных средах, при магнитных и электростатических воздействиях	№ 4,	с. 17–25
Сергеев И.Н., см. Ахматов З.А. Силаев И.В., см. Магкоев Т.Т. Созаев В.А., см. Ахкубеков А.А. Соколов Д.Н., см. Сдобняков Н.Ю. Старцев Ю.К. Новые приемы синтеза стекол как следствие изучения процессов фазового разделения в оксидных расплавах	№ 4,	с. 10–12
Старцев Ю.К. От исследования химической стойкости стекла в XX веке к широкому применению биоситаллов в текущем столетии	№ 4,	с. 30–33
Султыгова З.Х., см. Бажева Р.Ч.		

Т

Такаев А.А., см. Магкоев Т.Т. Талхигова Х.С., см. Дадашев Р.Х. Талхигова Х.С., см. Джамбулатов Р.С. Тамаев Т.Х., см. Ахкубеков А.А. Таова Т.М., см. Алчагиров Б.Б. Таова Т.М., см. Алчагиров Б.Б. Таова Т.М., см. Калажоков З.Х. Таова Т.М., см. Хоконов Х.Б. Таэр М.С., Гангапшев А.М., Хоконов А.Х., Ахматов З.А. Исследование поверхности Ферми металлов и углеродных материалов методом спектроскопии доплеровского уширения аннигиляционного пика в низкофоновых условиях	№ 3,	с. 43–49
Тваури И.В., см. Магкоев Т.Т. Тленкопачев М.Р., см. Ахматов З.А. Тхакахов Р.Б., см. Бориев А.А. Тхакахов Р.Б., см. Жазаева Е.М.		

Ф

Фокин Л.Р., Кулямина Е.Ю., Зицерман В.Ю. Энтропийный парадокс в условиях экстремального сжатия твердого тела	№ 2,	с. 27–31
--	------	----------

Х

Хапачев Ю.П., см. Дышеков А.А. Хасанов А.И., Хоконов Х.Л., Шхануков М.Х., Гуфан Ю.М. Политермы углов смачивания конструкционных реакторных сталей жидкими свинцом и висмутом при высоких температурах	№ 2,	с. 53–57
Хараев А.М., см. Бажева Р.Ч. Хоконов Х.Б., Таова Т.М., Алчагиров Б.Б. Поверхностная энергия и поверхностное натяжение металлов и их бинарных сплавов в твердом состоянии	№ 2,	с. 5–19

Хоконов Х.Б., см. Алчагиров Б.Б.
Хоконов Х.Б., см. Алчагиров Б.Б.
Хоконов Х.Б., см. Шебзухова И.Г.
Хоконов А.Х., см. Ахматов З.А.
Хоконов А.Х., см. Сергеев И.Н.
Хоконов А.Х., см. Таэр М.С.
Хоконов Х.Л., см. Калажоков З.Х.
Хоконов Х.Л., см. Хасанов А.И.
Хоконов Х.Л., см. Шебзухова М.А.
Хотова Л.В., см. Ахкубеков А.А.
Хотова Л.В., см. Ахкубеков А.А.
Хубежов С.А., см. Магкоев Т.Т.
Хибиев А.Х., см. Алчагиров Б.Б.

Ц

Ципинова А.Х. № 1, с. 42–46
 Механизм размножения электронных возбуждений
 в микрокристаллах галогенида серебра при формировании
 центров скрытого изображения фотографических пленок

Ч

Чиглинцев И.А., см. Насыров А.А.

Ш

Шадов З.О., см. Жазаева Е.М.
Шаов А.Х., см. Пшеноков А.Н.
Шебзухов А.А., см. Шебзухова М.А.
Шебзухов А.А., см. Кузамишев А.Г.
Шебзухов А.А., см. Кузамишев А.Г.
Шебзухова И.Г., Апеков А.М., Хоконов Х.Б. № 2, с. 20–26
 Зависимость межфазной энергии металлов на границе
 с органическими жидкостями от атомного номера
Шебзухова И.Г., Арефьева Л.П. № 3, с. 36–42
 Анизотропия поверхностной энергии и работы выхода
 электрона IV-металлов
Шебзухова М.А., Афшагов А.А., Хоконов Х.Л., Шебзухов А.А. № 3, с. 62–65
 Межфазное натяжение на границе раздела двух
 несмешивающихся жидких растворов
Шебзухова М.А., см. Кузамишев А.Г.
Шебзухова М.А., см. Кузамишев А.Г.
Шериева Э.Х., см. Дохов М.П.
Шериева Э.Х., см. Калажоков З.Х.
Шхануков М.Х., см. Хасанов А.И.

Э

Эдиев Д.М., см. Борлаков Х.Ш.
Элимханов Д.З., см. Алчагиров Б.Б.

**ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**PROCEEDINGS OF THE
KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY**

ТОМ IX, № 4, 2019

Редактор *Т.П. Ханиева*
Компьютерная верстка *Е.Л. Шериевой*
Корректор *Т.П. Ханиева*

В печать 11.12.2019. Формат 60x84 ¹/₈.
Печать трафаретная. Бумага офсетная.
9,30 усл.п.л. 9,0 уч.-изд.л.
Тираж 1000 экз. Заказ № 8768.
Дата выхода в свет 25.12.2019.

Адрес издателя: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет.

Адрес типографии: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет.
Издательство КБГУ.