

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТРЕТЬЕГО КОМПОНЕНТА НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ БИНАРНЫХ РАСПЛАВОВ

© Дадашев Райком Хасимханович (а), Элимханов Джабраил Зайндиевич (б), Джамбулатов Роман Суламбекович (с), Хазбулатов Зелимхан Лечиевич (д)

- (а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, отдел физико-математических исследований, главный научный сотрудник; Чеченский Государственный Университет им. А.А. Кадырова, доктор физико-математических наук, [raykom50@mail.ru](mailto:raykom50@mail.ru), г. Грозный.
- (б) Академия наук Чеченской Республики, директор Центра проблем материаловедения, кандидат физико-математических наук, [edzhabrail@mail.ru](mailto:edzhabrail@mail.ru), г. Грозный.
- (с) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, отдел физико-математических исследований, заведующий отделом, кандидат физико-математических наук, [asldezam@mail.ru](mailto:asldezam@mail.ru), г. Грозный.
- (д) Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, ассистент кафедры общей физики, [zelim\\_han9795@mail.ru](mailto:zelim_han9795@mail.ru), г. Грозный.

**Аннотация.** На основе критического анализа данных по поверхностному натяжению (ПН) сплавов In-Sn-Pb, In-Sn-Ga и Tl-Pb-Bi в жидком состоянии в работе найдены закономерности влияния 3-го компонента на ПН бинарных расплавов. Выявлено, что экстремумы изотерм ПН бинарных систем проявляются и оказывают заметное влияние на вид изотермических поверхностей поверхностного натяжения (ИППН) многокомпонентных систем. В частности, минимум на изотермах ПН расплавов In-Sn и Tl-Pb проявляется в виде впадины, которая распространяется от двойных систем In-Sn и Tl-Pb до вершины треугольника, соответствующей 3-ему компоненту. Однако по мере увеличения в расплаве содержания 3-го компонента (свинца, висмута и таллия) глубина впадины уменьшается, что приводит к сглаживанию рельефа ИППН. Выявленная особенность влияния 3-го компонента на экстремумы изотерм ПН бинарных систем носит общий характер, о чем свидетельствуют данные по ПН других, экспериментально изученных 3-х расплавов. Сделанный вывод имеет большое научное значение, так как может лечь в основу разработки новых полуэмпирических и теоретических моделей ПН многокомпонентных систем.

**Ключевые слова:** Поверхностное натяжение, металлические расплавы, многокомпонентные системы, изотермы поверхностного натяжения, бинарные и тройные расплавы, металлы.

## FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE THIRD COMPONENT ON THE SURFACE TENSION OF BINARY MELTS

© Dadashev Raikom Khasimkhanovich (a), Elimkhanov Jabarail Zaindievich (b), Dzhambulatov Roman Sulambekovich (c), Khazbulatov Zelimkhan Lechievich (d)

- (a) Kh. Ibragimov Complex Institute of Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Department of Physics and Mathematics Research, Chief Researcher. Chechen State

University named after. A.A. Kadyrov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, raykom50@mail.ru, Grozny.

(b) Academy of Sciences of the Chechen Republic of the Russian Federation, Director of the Center for Materials Science Problems, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, edzhabrail@mail.ru, Grozny.

(c) Kh. Ibragimov Complex Institute of Russian Academy of Sciences, Department of Materials Science, Department of Physics and Mathematics Research, Head of Department, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, asldzam@mail.ru, Grozny.

(d) Chechen State University named after. A.A. Kadyrova, assistant of the department of general physics, zelim\_han9795@mail.ru, Grozny.

**Annotation.** Based on a critical analysis of data on surface tension (ST) of In-Sn-Pb, In-Sn-Ga and Tl-Pb-Bi alloys in the liquid state, the work found patterns of the influence of the 3rd component on the ST of binary melts. It has been revealed that the extrema of ST isotherms of binary systems manifest themselves and have a noticeable effect on the appearance of isothermal surface tension surfaces (ISTS) of multicomponent systems. In particular, the minimum on the ST isotherms of In-Sn and Tl-Pb melts appears in the form of a depression, which extends from the In-Sn and Tl-Pb binary systems to the vertex of the triangle corresponding to the 3rd component. However, as the content of the third component (lead, bismuth and thallium) in the melt increases, the depth of the depression decreases, which leads to a smoothing of the IPP relief. The revealed feature of the influence of the 3rd component on the extrema of the ST isotherms of binary systems is of a general nature, as evidenced by the data on the ST of other experimentally studied 3 melts. The conclusion made is of great scientific importance, since it can form the basis for the development of new semi-empirical and theoretical models of PN of multicomponent systems.

**Keywords:** Surface tension, metal melts, multicomponent systems, surface tension isotherms, binary and ternary melts, metals.

## ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени поверхностное натяжение (ПН) чистых металлов и бинарных систем изучены относительно полно [1]. Получены достоверные данные, теоретические уравнения, а также разработаны строгие методы для вычисления по политермам и изотермам ПН различных вариантов адсорбции, энтропии, усреднённого состава, и толщины межфазного слоя [2,3].

При этом следует констатировать, что в начальной стадии находятся исследования межфазных (поверхностных) свойств систем с большим числом компонентов. До настоящего времени не разработана строгая теория поверхности многокомпонентных материалов, которая с допустимой погрешностью описывает зависимость ПН от основных параметров: молярных долей, давления и температуры. Отсутствуют так же методы вычисления свойств поверхности расплавов с большим числом компонентов. Причинами такой ситуации являются огромные сложности теоретического анализа процессов, протекающих на поверхности, а также тем, что экспериментальные изучения ПН металлов и сплавов связаны с большими трудностями, которые многократно увеличиваются при изучении многокомпонентных систем.

Вместе с тем, в практической деятельности мы чаще используем многокомпонентные материалы. В частности, к ним относятся: многокомпонентные расплавы, растворы, твёрдые сплавы и дисперсные системы. Существует мнение, что систематические исследования свойств многокомпонентных материалов позволит определить некоторые возможные пути решения глобальной проблемы получения материалов с заданными физическими свойствами. С другой стороны для решения многих теоретических и современных технологических проблем необходимо учитывать совместное влияние на физико-химические и поверхностные свойства материалов нескольких компонентов. Особую актуальность эти вопросы имеют при рассмотрении влияния поверхностно-активных компонентов, так как они даже при малом содержании могут оказать заметное влияние на состав  $\alpha$ , следовательно, и свойства границ раздела однородных многокомпонентных фаз [4]. Этим можно объяснить значительный интерес исследователей к изучению их физико-химических и поверхностных свойств [5-11]. Следовательно, исследования свойств систем с большим числом компонент задача важная и актуальная.

### ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ 3-Х СИСТЕМ

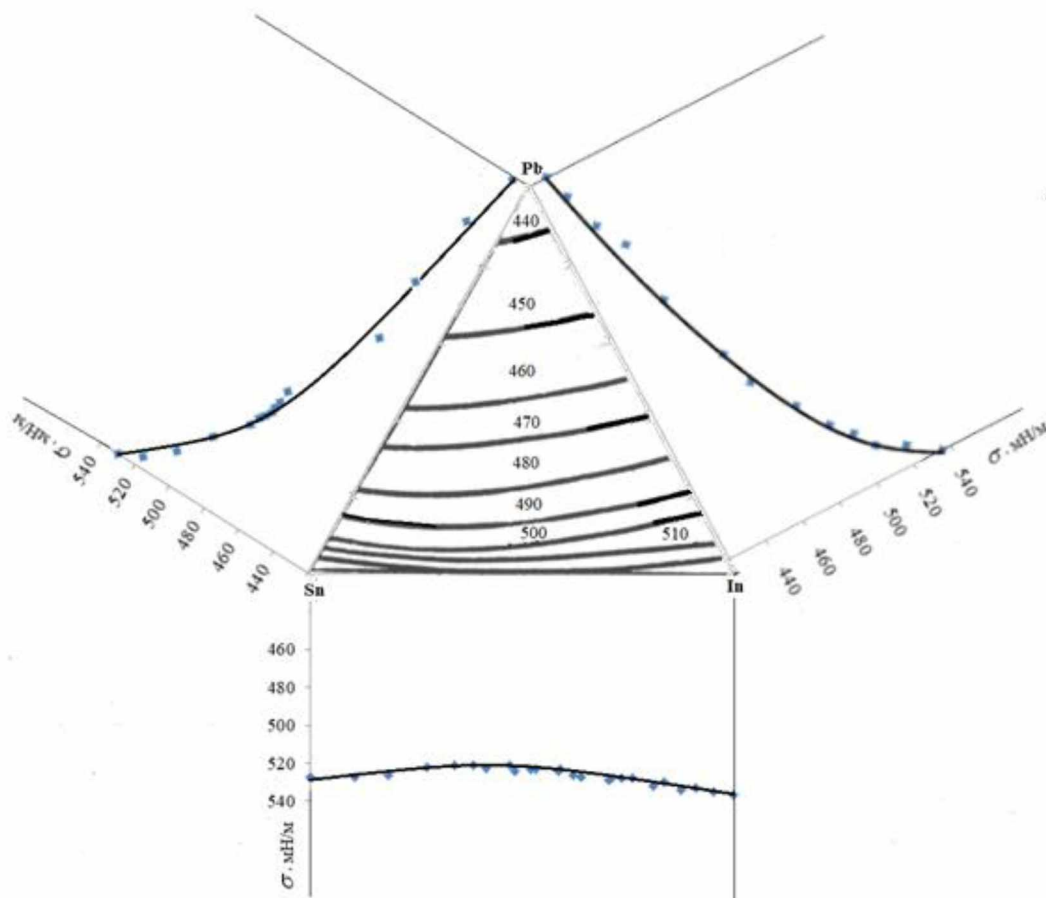
В условиях отсутствия экспериментальных данных и строгой теории особую актуальность приобретают полуэмпирические методы прогноза свойств многокомпонентных систем по свойствам чистых металлов и граничных двойных систем. В связи с этим для избыточных объёмных свойств разработаны и успешно применяются полуэмпирические методы прогноза свойств тройных систем по свойствам бинарных. В работах [12], была сделана первая попытка разработки подобных методов для прогноза ПН многокомпонентных систем. При этом были получены неплохие результаты. Однако для усовершенствования этих методов и разработки на этой основе более обоснованных теоретических моделей необходимо выявить и глубоко изучить влияния 3-го компонента на вид и форму изотерм ПН бинарной системы т.е. при увеличении в разрезе, заданной условием  $X_3 = \text{const}$ , молярных долей с третьего компонента  $X_3$ .

Исходя из этого нами, на основе критического анализа данных по ПН расплавов In-Sn-Pb [13], Tl-Pb-Bi [14-16], In-Sn-Ga [17] выявлены общие закономерности влияния третьего компонента на минимум, обнаруженный на изотермах ПН растворов In-Sn [18] и Pb-Tl [12]. Изотермические поверхности ПН обсуждаемых тернарных систем объединяет наличие минимума в одной из граничных систем (In-Sn и Pb-Tl). При этом, в качестве добавляемого компонента выступают: поверхностноактивные - свинец и висмут (в системах индий-олово-свинец и таллий-свинец-висмут) и инактивный галлий, который повышает ПН расплавов In-Sn. Такой выбор 3-го компонента позволяет сделать более общие и достоверные выводы.

Измерения ПН и плотности были проведены наиболее точными и надёжными методами [13]: ПН измерялось по гравитационной приборе П.П.Пугачевича, а плотность измерена ареометром, который был изготовлен из боросиликатного стекла. Методика измерения ПН в гравитационном приборе П.П. Пугачевича подробно описана в работе [13]. Согласно результатам расчёта погрешность измерения ПН – 0,8 %, а плотности – 0,2 %. Рассмотрим полученные результаты подробнее.

Отметим, что наиболее тщательно и полно исследованной, из рассматриваемых систем, является система индий-олово - свинец. Для достижения поставленной цели особое

внимание при этом уделялось области составов, прилегающей к стороне индий-олово. В общей сложности экспериментально изучено ПН более 100 расплавов, составы которых лежали по разрезам ( $x_{In}:x_{Sn}=1:4, 1:1, 3:1, 9:1, 1:1$ ;  $x_{In}:x_{Pb}=1:5, 2:3$   $x_{Sn}:x_{Pb}=13:1, 3$ , и  $x_{Pb}=0,0335$  мол. долей). Изменение состава по разрезу, заданному условием  $x_{Pb}=0,0335$  мол. долей на практике можно осуществить добавлением к двойному расплаву In-Pb ( $x_{Pb}=0,0335$  мол. долей) бинарного расплава с таким же содержанием свинца. Результаты измерения ПН по такому разрезу определить тенденцию изменения формы и размеров минимума на изотермах ПН двойной системы в присутствии третьего компонента. Для изменения состава по первому способу необходимо к бинарному сплаву нужного состава добавить 3-ий компонент.



**РИС. 1. Изотермы и изолинии поверхностного натяжения бинарных и тернарных расплавов при 723 К**

Полученные результаты в виде изолинии ПН представлены на рис. 1. Более тщательное изучение ПН расплавов с малым содержанием 3-го компонента позволило выявить, что изотермы ПН по разрезам, с постоянным содержанием 3-го компонента, характеризуются пологим минимумом. С увеличением молярных долей 3-го компонента глубина минимума уменьшается и при  $x_{Pb}=0,08$  мол. долей изотермы ПН передаются гладкими кривыми.

Таким образом присутствие в расплавах атомов свинца приводит к уменьшению вклада взаимодействия разноименных атомов индий и олова, о чем свидетельствует

уменьшение и исчезновение экстремума на изотермах ПН по разрезам  $X_{Pb} = \text{const}$  с увеличением в разрезе содержания 3-го компонента. Свинец и висмут, будучи поверхностно-активными выходят в поверхностный слой и играют доминирующую роль в адсорбционных процессах.

Изотермическая поверхность ПН в обсуждаемой тройной системе характеризуется "впадиной", которая берет начало на стороне концентрационного треугольника индий-олово, и распространяется в направлении третьего компонента – свинца. На изолиниях ПН эти особенности находят отражение в виде кривых, вогнутых к оси индий-олово.

Изолинии ПН наглядно демонстрируют особенности изотермической поверхности ПН. Однако при практических расчётах свойств поверхности тройных расплавов более удобными являются графические представления функциональной зависимости ПН при изменении молярных долей по различным сечениям концентрационного треугольника. Помимо этого эти кривые позволяют сделать сравнительный анализ изотерм  $\sigma$  в боковых двойных системах и по разрезам тройной системы. Поэтому на одном графике (рис.2) изображены зависимости ПН от состава расплавов In-Pb, Sn-Pb, а также по разрезу  $x_{In}:x_{Sn}=1:1$ . Как видно из рис. 2 предельная поверхностная активность свинца имеет наибольшие значения по абсолютной величине в расплавах олово-свинец, а наименьшее – при изменении состава по разрезу  $x_{In}:x_{Sn}=1:1$ .

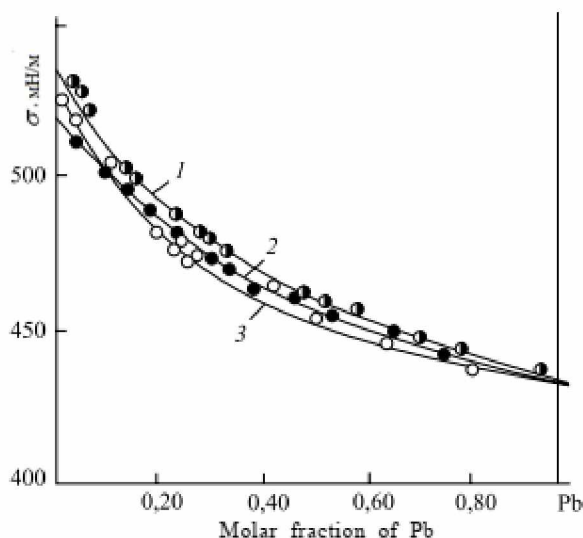


Рис.2. Поверхностное натяжение бинарных ( In-Pb (1), Sn-Pb (3) разрез по лучевому сечению  $x_{In}:x_{Sn}=1:1$  тройных расплавов (2))

В сильно разбавленных растворах изотерма ПН по разрезу тройной системы расположена несколько ниже изотерм ПН двойных систем. Однако при достижении 0,1 молярных долей свинца изотермы ПН пересекаются, что также свидетельствует о том, что изотермы ПН расплавов In-Sn и тройных разрезов  $X_{Pb} = \text{const}$ , в интервале от 0, до 0,1 мол. долей  $X_{Pb}$  характеризуются минимумом.

Таким образом, результаты исследования ПН расплавов In-Sn-Pb показывают, что зависимость ПН от состава, представленные графически в трёхмерном пространстве в виде поверхностей гладкие без угловых и тройных экстремальных точек. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что на зависимостях ПН от состава обсуждаемой системы

отсутствуют особенности, которые, в той или иной степени, не проявляются в бинарных системах.

### РАСПЛАВЫ ТАЛЛИЙ-СВИНЕЦ-ВИСМУТ

Зависимость ПН от состава в расплавах Tl-Pb и In-Sn имеет много общего. В особенности их объединяет наличие минимума в области эквимольной концентрации. Висмут поверхностно активен на 2-х сплавах во всем концентрационном интервале. Следовательно логичнее предположить что закономерности изменения ПН с составом у этих систем имеют много общего.

В обсуждаемой системе экспериментально изучены политермы ПН 90 расплавов различных составов. Составы изученных расплавов были выбраны таким образом, чтобы они удовлетворяли условиям: молярные доли  $X_{Pb}/X_{Tl} = 1/9, 1/3, 1/1, 3/1, 9/1$ .

Изотермы ПН по изученным сечениям гладкие без экстремальных точек. Висмут, как и предполагалось поверхностно активен, как на чистых (таллии и свинце), так и на сплавах (рис. 2). При этом ППА висмута на таллии больше, чем на свинце и увеличивается по мере замены в разрезе свинца таллием.

На изотермической поверхности ПН (ИППН) выявлена "впадина", которая проявляется в виде экстремума на изотермах ПН расплавов таллий-свинец. По мере приближения к вершине висмута минимум исчезает.

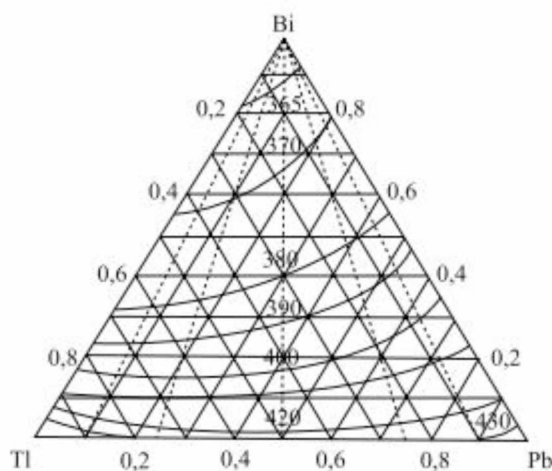


РИС. 2. Изолинии ПН расплавов Tl-Pb-Bi при 773 К

Закономерности изменения составов ППА свинца и таллия близки. Свинец понижает ПН таллия и инактивен на висмуте. По мере увеличения молярных долей висмута в 2-х сплавах абсолютная величина ППА свинца уменьшается. Подобно ведёт себя таллия в сплавах свинец-висмут.

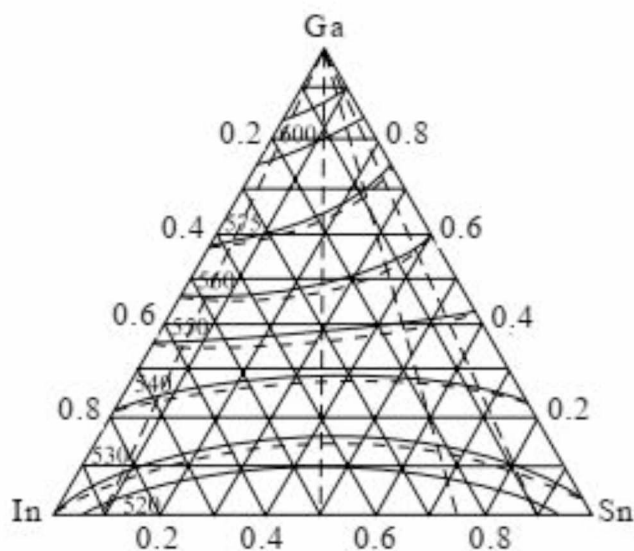
### СИСТЕМА ИНДИЙ-ОЛОВО-ГАЛЛИЙ

Основной особенностью ИППН расплавов In-Sn-Pb и Tl-Pb-Bi является наличие впадины, которая образует минимумы на изотермах ПН двойных расплавов In-Sn и Tl-Pb. При этом свинец (In-Sn-Pb) и висмут (Tl-Pb-Bi) понижают ПН расплава, т.е. – они поверхностно активны. Представляет научный интерес вопрос об особенностях влияния инактивного компонента на подобные особенности. Для решения этой проблемы подходят результаты по ПН расплавов In-Sn-Ga. В этих расплавах добавки галлия понижают ПН, т.е.

он инактивен как на чистых металлах, так и в расплавах. С другой стороны, немаловажное значение имеет тот факт, что изотермы ПН расплавов олово-галлий, характеризовались сложными кривыми (минимумом и максимумом) [18], что должно найти отражение на ИППН системы индий-олово.

Нами [15] экспериментально изучены политермы ПН 3-х расплавов, составы которых удовлетворяют условиям  $x_{In}:x_{Sn} = 1/9, 1/3, 1/1, 9/1$ .

На рис. 3, изображены изотермы ПН по разрезам  $x_{In}:x_{Sn} = 1/1$ , откуда видно, что изотермы ПН передаются гладкими кривыми. При этом изотермы (527 К) характеризуются точкой перегиба (0.6 мол. дол. Ga). С ростом температуры расплава точка перегиба исчезает (773 К).



----- теоретические значения  
 \_\_\_\_\_ экспериментальные данные

**Рис. 3** Изолинии ПН 773 К

Галлий вызывает повышение поверхностного натяжения как чистых металлов индий, олово, так и всех сплавов двойной системы индий-олово. При изменении состава по линиям, с  $X_{Ga} = \text{const}$ , что графически изображается линией параллельной стороне In-Sn, изотермы ПН (до  $X_{Ga} = 0,4$  мол. долей) практически совпадают с изотермами расплавов индий-олово. Дальнейшее увеличение содержания галлия приводит смещению минимума к стороне Ga-Sn и минимум постепенно сглаживается.

На рис. 3 изображены ИПН, которые дают более полное представление об ИППН. На ИППН 3-х расплавов наблюдается впадина, образующая минимумы на ИПН расплавов In-Sn. Отметим, что в обсуждаемой системе «впадина» на ИППН сохраняется до 0,4 мол. дол. галлия.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ экспериментальных данных по ПН расплавов In-Sn-Ga, Ti-Pb-Bi, а также In-Sn-Pb подтверждает сделанный нами вывод о том, что на изотермах ПН

тернарных систем отсутствуют особенности, не проявляющиеся на зависимости ПН в бинарных расплавах. Экстремумы на изотермах ПН бинарных систем оказывают существенное влияние на рельеф ИПН. Однако какими сложными не были изменения этого рельефа они предсказуемы по ПН бинарных систем. Немаловажным является выявленная закономерность согласно которой интенсивность процесса сглаживания рельефа находится в прямой зависимости от абсолютной величины и знака ППА третьего компонента. Так, согласно результатам эксперимента, минимум на изотермах ПН расплавов In-Sn и Tl-Pb исчезает при 0,1 свинца (In-Sn-Pb), 0,2 висмута (Tl-Pb-Bi), 0,4 галлия (In-Sn-Ga). Таким образом, чем выше ППА компонента, тем интенсивнее его влияние на минимум, то есть тем эффективнее его влияние на особенности изотерм ПН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.
2. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Гостехиздат, 1957. – 491 с.
3. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления – Л.: Химия, 1967. – 388 с.
4. Еременко В.Н. Физическая химия неорганических материалов: в 3 т. – Киев: Наукова думка, 1988. Т.2. – 192 с.
5. Wang, H. P., Luo, B. C., Qin, T., Chang, J., & Wei, B. (2008). Surface tension of liquid ternary Fe–Cu–Mo alloys measured by electromagnetic levitation oscillating drop method // *The Journal of Chemical Physics*. – N. 129(12). – Pp. 124706
6. J. Brillo, Y. Plevachuk, I. Egrý. Surface tension of liquid Al–Cu–Ag ternary alloys // *J Mater Sci*. – 2010. – N. 45: – Pp. 5150–5157. DOI 10.1007/s10853-010-4512-6
7. Tobias Dubberstein, Hans-Peter Heller, Jens Klostermann Rüdiger Schwarze, Jürgen Brillo. Surface tension and density data for Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–Ni, and Fe–Cr–Mn–Ni steels // *J Mater Sci*. – 2015. – N. 50. – Pp. 7227–7237.
8. Fima P. Surface tension and density of liquid Sn –Ag –Cu alloys // *Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.)*. – 2012. – N. 12 – Pp. 1455-1461
9. Moser Z., W. Gasior, K. Bukat, J. Pstrus, R. Kisiel, J. Sitek, K. Ishida and I. Ohnuma Pb-Free Solders: Part III. Wettability Testing of Sn-Ag-Cu-Bi Alloys // *ASM International with Sb Additions JPEDAV*. – 2007. N. 28: – Pp. 433–438.
10. Dubberstein, Tobias; Heller, Hans-Peter; Klostermann, Jens; Schwarze, Rüdiger; Brillo, Jürgen. Surface tension and density data for Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–Ni, and Fe–Cr–Mn–Ni steels. *Journal of Materials Science*. – 2015. – N. 50(22). – Pp. 7227–7237.
11. Морачевский А.Г., Фирсова Е.Г. Физическая химия. Гетерогенные системы: Учебное пособие. 2-е изд., стер. – СПб.: Изд. “Лань”, 2015. – 192 с.
12. Дадашев Р.Х. Прогнозирование физико-химических свойств многокомпонентных металлических расплавов // *Расплавы*. – 1994. – № 6. – С. 72–84
13. Р. Х. Дадашев Термодинамика поверхностных явлений: Изд. 2-е, испр. – Москва: Физматлит, 2008. – 278 с.



14. Дадашев Р.Х., Элимханов Д.З., Кутуев Р.А. Поверхностное натяжение и плотность системы таллий-свинец-висмут Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2012. –Т. 17. –№ 2. – С. 712-713.
15. Дадашев Р.Х., Элимханов Д.З. Концентрационная зависимость поверхностного натяжения расплавов таллий-свинец-висмут по лучевым сечениям (TL:PB=1:3, 3:1) Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. –2020. –Т. 10. – № 1. – С. 25-33
16. Дадашев Р.Х., Элимханов Д.З., Дадашева З.И. Поверхностные свойства и молярные объемы расплавов таллий–свинец–висмут Расплавы. – 2022. – № 4. – С. 395-407.
17. Dadashev R.Kh., Kutuev R.A., Elimkhanov D.Z., Bichueva Z.I. Surface tension of indium-tin-gallium melts // Russian J. Phys. Chem. A. – 2007. – Т. 81. – № 11. – С. 1734-1737.
18. Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А., Элимханов Д.З. Поверхностное натяжение и плотность расплавов индий - олово и их зависимость от состава и температуры Расплавы. – 2023. – № 1. – С. 78-88.

#### REFERENCE

1. Nizhenko V.I., Floka L.I. Surface tension of liquid metals and alloys. Reference book. – М.: Metallurgy, 1981. – 208 p.
2. Semenchenko V.K. Surface phenomena in metals and alloys. – М.: Gostekhizdat, 1957. –491 p.
3. Rusanov A.I. Phase equilibria and surface phenomena – L.: Khimiya, 1967. – 388 p.
4. Eremenko V.N. Physical chemistry of inorganic materials: in 3 vol. – Kiev: Naukova Dumka, 1988. Vol. 2. – 192 p.
5. Wang, H. P., Luo, B. C., Qin, T., Chang, J., & Wei, B. (2008). Surface tension of liquid ternary Fe–Cu–Mo alloys measured by electromagnetic levitation oscillating drop method // The Journal of Chemical Physics. – N. 129(12). – Pp. 124706
6. J. Brillo, Y. Plevachuk , I. Egry. Surface tension of liquid Al–Cu–Ag ternary alloys // J Mater Sci. – 2010. – N. 45: – Pp. 5150–5157.
7. Tobias Dubberstein, Hans-Peter Heller, Jens Klostermann Rüdiger Schwarze, Jürgen Brillo. Surface tension and density data for Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–Ni, and Fe–Cr–Mn–Ni steels // J Mater Sci. – 2015. – N. 50. – Pp. 7227–7237.
8. Fima P. Surface tension and density of liquid Sn –Ag –Cu alloys // Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.) – 2012. – N. 12 – Pp. 1455-1461
9. Z. Moser, W. Gasior, K. Bukat, J. Pstrus, R. Kisiel, J. Sitek, K. Ishida and I. Ohnuma Pb-Free Solders: Part III. Wettability Testing of Sn-Ag-Cu-Bi Alloys // ASM International with Sb Additions JPEDAV. – 2007. –N. 28: – Pp. 433–438
10. Dubberstein, Tobias; Heller, Hans-Peter; Klostermann, Jens; Schwarze, Rüdiger; Brillo, Jürgen. Surface tension and density data for Fe–Cr–Mo, Fe–Cr–Ni, and Fe–Cr–Mn–Ni steels. Journal of Materials Science. – 2015. – N. 50(22). – Pp. 7227–7237.
11. Morachevsky A.G., Firsova E.G. Physical Chemistry. Heterogeneous systems: Textbook. 2nd ed. – SPb.: Izd. "Lan", 2015. – 192 p.

12. Dadashev R.Kh. Prediction of physical and chemical properties of multicomponent metal melts // *Melts*. – 1994. – N. 6. – Pp. 72-84
13. Dadashev R. H. Thermodynamics of surface phenomena: 2nd edition, revised. – Moscow: Fizmatlit, 2008. – 278 p.
14. Dadashev R.H., Elimkhanov D.Z., Kutuev R.A. Surface tension and density of thallium-lead-bismuth system *Vestnik Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. – 2012. – V. 17. – N. 2. – Pp. 712-713.
15. Dadashev R.Kh., Elimkhanov D.Z. Concentration dependence of surface tension of thallium-lead-bismuth melts by beam sections (TL:PB=1:3, 3:1) *Proceedings of Kabardino-Balkarian State University*. – 2020. – V. 10. – N. 1. – Pp. 25-33
16. Dadashev R.Kh., Elimkhanov D.Z., Dadasheva Z.I. Surface properties and molar volumes of thallium-lead-bismuth melts *Melts*. – 2022. – N. 4. – Pp. 395-407.
17. Dadashev R.Kh., Kutuev R.A., Elimkhanov D.Z., Bichueva Z.I. Surface tension of indium-tin-gallium melts // *Russian J. Phys. Chem. A*. – 2007. – T. 81. – N. 11. – Pp. 1734-1737.
18. Dadashev R.Kh., Kutuev R.A., Elimkhanov D.Z. Surface tension and density of indium-tin melts and their dependence on composition and temperature *Melts*. – 2023. – N. 1. – Pp. 78-88.