

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 532.612

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ТРОЙНЫХ СИСТЕМ

© 2023 г. Р. Х. Дадашев^{a, c}, Д. З. Элимханов^{a, b, *}, З. Л. Хазбулатов^{a, b}

^aЧеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, ул. А. Шерипова, 32, Грозный, 364024 Россия

^bАкадемия наук Чеченской Республики, ул. В. Алиева, 19а, Грозный, 364051 Россия

^cКомплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН,
ул. В. Алиева, 21а, Грозный, 364051 Россия

*e-mail: edzhabrail@mail.ru

Поступила в редакцию 08.12.2022 г.

После доработки 21.02.2023 г.

Принята к публикации 03.03.2023 г.

Проведен сравнительный анализ полуэмпирических методов прогноза, поверхностного натяжения (ПН) тройных систем, базирующихся на моделях Колера, Бонье, Тупа. Расчеты концентрационной зависимости ПН проведены в системах индий–олово–свинец и индий–олово–галлий. Тройная система индий–олово–свинец характеризуется тем, что изотермы избыточного ПН всех боковых двойных расплавов имеют симметричную форму относительно эквимоллярного состава, такие системы называют симметричными. В тройной системе индий–олово–галлий изотермы избыточного ПН боковых двойных систем индий–галлий и олово–галлий характеризуются ярко выраженной асимметрией относительно эквимоллярного состава, такие системы называют асимметричными. Показано, что метод, основанный на модели Колера, достаточно точно описывает концентрационную зависимость поверхностного натяжения симметричных тройных систем. При этом этот метод не прогнозирует концентрационную зависимость поверхностного натяжения асимметричных систем. Выявлено, что концентрационную зависимость ПН асимметричных трехкомпонентных систем с сильной асимметрией изотерм избыточного ПН двух боковых двойных систем, независимо от степени сложности изотерм ПН, в пределах суммарной погрешности эксперимента, могут прогнозировать модели Бонье и Тупа.

Ключевые слова: прогноз поверхностного натяжения, многокомпонентные системы, эквимоллярный состав, модели Бонье, Тупа

DOI: 10.31857/S0015323022601866, EDN: VIBXBN

ВВЕДЕНИЕ

Свойства поверхности существенно отличаются от свойств объемной фазы, что, возможно, является одной из основных причин формирования уникальных свойств у наноматериалов, отличительной особенностью которых является наличие огромной площади поверхности и доминирование свойств поверхности над свойствами объемной фазы. Поэтому исследование свойств поверхностного слоя систем различной природы, в их числе и жидких фаз, имеет научное и практическое значение.

В отличие от твердых тел, у жидкостей наиболее точно измеряемым свойством поверхности является поверхностное натяжение (ПН). Фундаментальные термодинамические уравнения, полученные для избыточных величин сначала Гиббсом [1], а затем в методе слоя конечной толщины

голландскими физиками Гугенгеймом, Адамом [2] и Русановым [3], позволяют найти важные физико-химические свойства поверхностного слоя, если известна зависимость ПН от температуры и состава сплава.

К настоящему времени разработаны надежные методы и приборы [4–7] для экспериментального изучения ПН чистых металлов и двухкомпонентных расплавов, что позволило получить надежные экспериментальные данные по ПН чистых веществ и бинарных расплавов. На этом фоне заметно отстает как теоретическое, так и экспериментальное изучение ПН многокомпонентных систем. В широкой области концентрации в настоящее время экспериментально изучены температурная и концентрационная зависимость ПН более сорока тройных и нескольких четырехкомпонентных систем.

Критический анализ литературных источников показывает, что в последнее время заметно снизилось количество работ, посвященных экспериментальному изучению зависимости ПН многокомпонентных систем от состава и температуры. Экспериментальные исследования ПН, проведенные в последние годы, посвящены в основном измерению поверхностного натяжения отдельных сплавов технического назначения и контактного угла смачивания ими твердых поверхностей [8–12]. Обусловлена такая ситуация, прежде всего многократным увеличением объема и трудоемкости экспериментального исследования концентрационной зависимости ПН многокомпонентных систем. Такая практическая направленность экспериментальных исследований, несмотря на важность и актуальность, не способствует успешному развитию теории поверхностных явлений. И это при том, что существующие к настоящему времени теоретические уравнения изотерм поверхностного натяжения многокомпонентных систем во многих случаях даже качественно не описывают концентрационную зависимость поверхностного натяжения, а в более общие уравнения входят физические величины, экспериментальное определение которых встречает огромные трудности.

В условиях отсутствия достоверных экспериментальных данных и строгих теоретических уравнений для описания концентрационной зависимости ПН многокомпонентных систем возрастает значение и роль полуэмпирических методов прогноза поверхностного натяжения этих систем на базе уже имеющихся экспериментальных данных. Как будет показано ниже, при разработке методов прогнозирования ПН многокомпонентных систем можно опираться на физико-химические свойства как чистых металлов, так и расплавов боковых двойных систем. Развитию подобных методов способствуют и то, что к настоящему времени накоплено достаточно большое количество надежных экспериментальных данных по ПН и плотности чистых веществ и подавляющего большинства бинарных расплавов [13–15].

Полуэмпирические методы прогноза объемных свойств многокомпонентных растворов по данным о боковых двойных системах разрабатываются и успешно применяются для оценки избыточной энthalпии смешения, избыточного термодинамического потенциала Гиббса, коэффициентов термодинамической активности компонентов, молярных объемов и т.д. [16–18]. Представляет научный и практический интерес разработка и апробация подобных методов для прогноза концентрационной зависимости ПН многокомпонентных систем.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗОТЕРМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

Как отмечено выше, к настоящему времени в широкой области составов экспериментально изучена концентрационная зависимость ПН и плотности около сорока тройных и нескольких систем с большим числом компонентов. Критический обзор этих результатов дает основание для вывода о том, что с увеличением числа компонентов в расплаве наблюдается тенденция к сглаживанию особенностей на концентрационной зависимости ПН [19]. Действительно, анализ результатов исследований концентрационной зависимости ПН и молярных объемов трех и четырехкомпонентных систем показывает, что экстремумы (максимум, минимум или точка перегиба) на изотермах поверхностного натяжения боковых двойных систем проявляются на изотермической поверхности ПН тройных систем в виде “складки” или “впадины”. С увеличением содержания в расплаве компонентов, не составляющих двойную систему, эти особенности постепенно сглаживаются и при определенной концентрации этих компонентов исчезают [19]. При этом качественно новые особенности, не прогнозируемые изотермами ПН боковых двойных расплавов, ни в одной из экспериментально исследованной многокомпонентной системе не обнаружены.

Эти выводы легли в основу разработанного авторами [20, 21] полуэмпирического метода прогноза ПН многокомпонентных систем по свойствам чистых металлов и боковых двойных систем. В основе разработанного метода лежит выражение, полученное Колером для объемных свойств. Расчеты концентрационной зависимости ПН тройных и четверных систем, проведенные по этому методу, показали достаточно высокую точность и надежность разработанного метода. Однако основным недостатком, сдерживающим широкое применение предложенного метода, является то, что до настоящего времени не определены критерии, которые могли бы предварительно определить класс многокомпонентных систем, для которых этот метод дает достоверные результаты. Поэтому остановимся подробнее на этих методах.

Как отмечено в [19], полуэмпирические выражения, полученные для прогноза избыточных величин растворов, не могут быть использованы непосредственно для определения концентрационной зависимости поверхностного натяжения многокомпонентных растворов, потому что значения избыточных величин для чистых компонентов равны нулю, а ПН чистых веществ не может равняться нулю. Для решения этой проблемы в работе [20] условно было введено понятие “из-

быточное поверхностное натяжение”, которое определяется выражением:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{\text{ид}}, \quad (1)$$

где σ и $\sigma_{\text{ид}}$ — поверхностное натяжение реальных и идеальных растворов.

В качестве уравнения изотерм ПН идеального раствора можно использовать любое известное выражение, вплоть до аддитивной функции [19]. Главными требованиями, предъявляемыми к этой функции, являются: непрерывность во всем концентрационном интервале, математическая простота и отсутствие в ней неизвестных или трудно определяемых физических величин. В работах [20, 21] для этих целей было использовано уравнение, полученное авторами [22] для трехкомпонентных систем. Это уравнение удовлетворяет перечисленным выше требованиям и записывается в следующем виде:

$$\sigma_{\text{ид}} = \sigma_1 - \frac{RT}{\omega} \times \ln \left[x_1 + x_2 \exp\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{RT} \omega\right) + x_3 \exp\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{RT} \omega\right) \right], \quad (2)$$

где $\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i$ — усредненная по всем компонентам молярная площадь, σ_i — поверхностное натяжение чистых компонент, x_i — молярные доли i -го компонента.

Следует отметить, что существует множество приближенных методов расчета избыточных объемных свойств многокомпонентных растворов по данным о боковых двойных системах. Введение понятия избыточного поверхностного натяжения позволяет разработать на основе этих моделей методы расчета поверхностного натяжения многокомпонентных растворов.

В работах [19, 20] ограничились использованием для этих целей полуэмпирического выражения, полученного на базе модели Колера. Анализ результатов, полученных для четверной системы индий—олово—свинец—висмут и 16 тройных металлических систем, показал, что если в расплавах ртуть—свинец—висмут и железо—марганец—кремний, со сложной изотермической поверхностью ПН, предложенный метод только качественно описывает концентрационную зависимость ПН, то в системах с гладкими изотермами ПН вычисленные изотермы совпадают с экспериментальными в пределах суммарной погрешности измерения ПН. Под суммарной ошибкой измерения ПН подразумевается сумма погрешностей измерения ПН двойных и тройных расплавов, если эти измерения проведены разными авторами. Как правило, при расчетах ПН тройных систем исследователь сталкивается с ситуацией, когда значения ПН боковых двойных и тройных расплавов полу-

чены разными авторами, а зачастую, разными методами, что существенно повышает погрешности прогнозирования. Поэтому целесообразно сравнивать погрешности прогнозирования с суммарной ошибкой измерения ПН.

Однако, несмотря на определенные успехи, использование разработанного авторами [20] полуэмпирического метода прогноза для практических расчетов заметно тормозится из-за отсутствия критериев предварительной оценки степени точности и достоверности результатов, которые могут быть получены при прогнозировании свойств новой системы. Исследователь заранее не может оценить, насколько точно этот метод позволит найти концентрационную зависимость ПН той или иной многокомпонентной системы. От успешного решения этой проблемы зависит возможность использования этого метода в практической деятельности. В связи с этим нами были продолжены исследования, направленные на усовершенствование имеющихся и разработку новых методов прогноза концентрационной зависимости ПН многокомпонентных систем [19–21, 23, 24]. Были проведены расчеты ПН экспериментально изученных тройных систем.

Результаты расчетов ПН показали, что метод прогноза ПН, основанный на модели Колера, в пределах суммарной ошибки эксперимента, описывает экспериментальные данные большинства изученных систем. Однако, как показали экспериментальные исследования и теоретические расчеты, проведенные нами [25], этот метод даже качественно не описывает концентрационную зависимость ПН тройных растворов диоксан 1,4—ацетон—вода, хотя согласно полученным экспериментальным данным, концентрационная зависимость ПН этой системы характеризуется гладкой кривой без экстремумов. Анализ причин расхождения вычисленных значений от экспериментальных показал, что отличительной особенностью концентрационной зависимости ПН этой системы является наличие сильной асимметрии относительно среднего состава на кривых изотерм избыточного ПН двух боковых двойных систем ацетон—вода и диоксан 1,4—вода. Исходя из этих результатов, нами сделано предположение о том, что метод прогноза ПН, основанный на модели Колера, не описывает концентрационную зависимость ПН систем, у которых наблюдается сильная асимметрия изотерм избыточного ПН боковых двойных систем. Согласно выдвинутой гипотезе критерием предварительной оценки достоверности результатов, полученных рассматриваемым методом прогноза, могут быть изотермы избыточного ПН боковых двойных систем.

Таким образом, сравнение вычисленных значений ПН с экспериментальными данными показали, что одним из основных критериев пред-

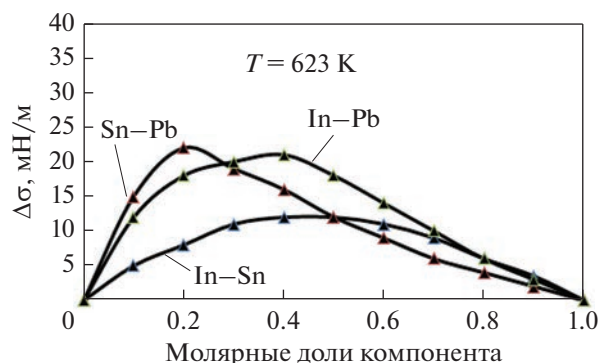


Рис. 1. Избыточное поверхностное натяжение расплавов индий—олово, индий—свинец и олово—свинец.

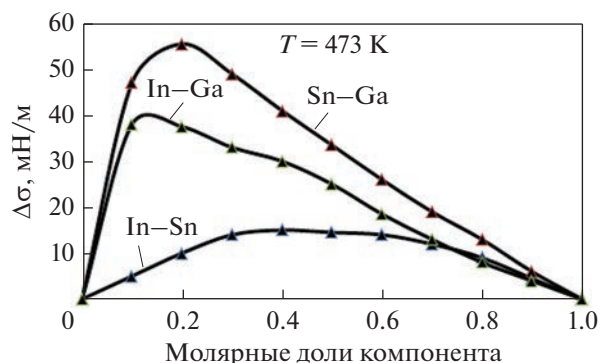


Рис. 2. Избыточное поверхностное натяжение расплавов индий—олово, индий—галлий и олово—галлий.

варительной оценки достоверности результатов прогнозирования свойств многокомпонентных растворов могут выступать изотермы избыточного ПН боковых двойных систем, а именно: при наличии сильной асимметрии на этих изотермах полуэмпирический метод прогноза ПН, основанный на модели Колера, может привести к большим погрешностям определения изотерм ПН. Однако этот вывод был сделан на основании результатов вычислений ПН только одной тройной системы, что диктует необходимость продолжения этих исследований на других, экспериментально изученных тройных системах.

Следует отметить, что кривые изотерм избыточной энтальпии смешения, избыточного термодинамического потенциала Гиббса и молярных объемов двойных систем, как правило, симметричны или очень близки к симметричным относительно эквимоларного состава. В отличие от них изотермы избыточного ПН большинства двойных систем имеют асимметричный вид относительно эквимоларного состава. Как подчеркнуто выше, именно сильная асимметричность изотерм избыточного ПН может оказать существенное влияние на точность прогноза ПН многокомпонентных систем.

В связи с изложенным выше, нами проведены расчеты концентрационной зависимости ПН тройных систем индий—олово—галлий и индий—олово—свинец, поверхностное натяжение и плотность которых экспериментально изучены авторами [19, 26].

Необходимые для таких расчетов данные по концентрационной зависимости избыточного поверхностного натяжения в боковых двойных системах вычислены по выражениям (1) и (2), используя имеющиеся экспериментальные данные по ПН боковых двойных систем. В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены некоторые из полученных изотерм избыточного ПН. Если изотермы избыточного ПН в двойных системах индий—

олово [27], индий—свинец [28] и олово—свинец [28] рис. 1 близки к симметричным, то изотермы избыточного ПН в двойных системах олово—галлий и индий—галлий [29] (рис. 2) имеют явно выраженный асимметричный вид. Согласно сделанному нами выводу, метод прогноза, основанный на модели Колера, может описать концентрационную зависимость ПН тройной системы индий—олово—свинец, так как изотермы избыточного ПН всех трех боковых двойных систем симметричны. При этом обсуждаемый метод дает большие погрешности при описании концентрационной зависимости ПН тройной системы индий—олово—галлий, так как изотермы избыточного ПН в боковых двойных системах имеют заметные отклонения от симметричности.

Для проверки выдвинутой гипотезы нами вычислены изотермы ПН этих систем по наиболее распространенным полуэмпирическим методам Колера [30], Бонье [31] и Тупа [32].

Модель Колера:

$$\Delta\sigma = [\Delta\sigma_{12}]_{x_2} (x_1 + x_2)^2 + [\Delta\sigma_{23}]_{x_3} (x_2 + x_3)^2 + [\Delta\sigma_{13}]_{x_3} (x_1 + x_3)^2. \quad (3)$$

Модель Бонье:

$$\Delta\sigma = \left[\frac{x_1}{1-x_2} \Delta\sigma_{12} + \frac{x_3}{1-x_2} \Delta\sigma_{23} \right]_{x_2} + [\Delta\sigma_{13}]_{x_3} (1-x_2). \quad (4)$$

Модель Тупа:

$$\Delta\sigma = \left[\frac{x_1}{1-x_2} \Delta\sigma_{12} + \frac{x_3}{1-x_2} \Delta\sigma_{23} \right]_{x_2} + [\Delta\sigma_{13}]_{x_3} (1-x_2)^2, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma$ — избыточное поверхностное натяжение тройного расплава; $\Delta\sigma_{ij}$ — избыточное поверх-

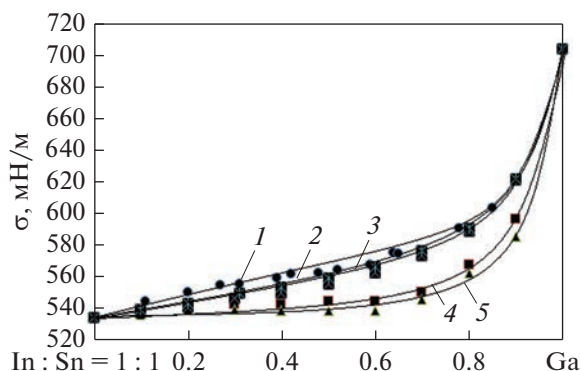


Рис. 3. Поверхностное натяжение расплавов индий-олово-галлий $\text{In} : \text{Sn} = 1 : 1$ при $T = 473 \text{ K}$: 1 – экспериментальные данные; 2 – метод Бонье; 3 – метод Тупа; 4 – метод Колера идеальное; 5 – метод Колера аддитивное.

ностное натяжение соответствующего расплава боковой двойной системы, x_i -молярные доли компонента в тройной системе.

Для облегчения дальнейшего изложения нам представляется целесообразным ввести некоторые понятия. Тройные системы, у которых хотя бы две боковые двойные системы характеризуются симметричными кривыми изотерм избыточного ПН, предложено назвать симметричными, а тройные системы, у которых хотя бы две боковые двойные системы характеризуются сильной асимметрией кривых изотерм избыточного ПН – асимметричными тройными системами.

Следует отметить, что введенные понятия “симметричные и асимметричные тройные системы” отличаются от используемых в литературе понятий “симметричные и асимметричные методы прогноза”. Методы прогноза свойств тройных систем подразделяются также на симметричные и асимметричные. При этом, согласно мнению автора [33], в симметричных моделях все компоненты системы являются равнозначными, а “в асимметричных моделях результаты расчетов зависят от принятого расположения компонентов относительно лучевого разреза, вдоль которого ведется расчет” [33].

В связи с изложенным в работе представлены результаты расчетов ПН систем индий-олово-свинец и индий-олово-галлий по методам прогноза ПН, которые базируются на моделях Колера, Бонье и Тупа. Концентрационная и температурная зависимости ПН и плотности расплавов индий-олово-галлий и индий-олово-свинец методом максимального давления в капле была изучена авторами [19, 25].

Выбор этих систем в качестве объектов исследования не является случайным. Эти системы отличаются друг от друга видом кривых изотерм из-

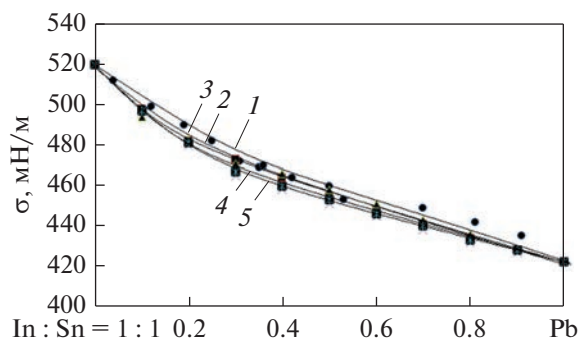


Рис. 4. Поверхностное натяжение расплавов индий-олово-свинец $\text{In} : \text{Sn} = 1 : 1$ при $T = 473 \text{ K}$: 1 – экспериментальные данные; 2 – метод Бонье; 3 – метод Тупа; 4 – метод Колера идеальное; 5 – метод Колера аддитивное.

быточного поверхностного натяжения в боковых двойных системах. Изотермы избыточного ПН в боковых двойных системах индий-свинец и олово-свинец близки к симметричным относительно эквимолярного состава, а в расплавах индий-галлий, олово-галлий изотермы избыточного ПН характеризуются сильной асимметрией. Следовательно, тройную систему индий-олово-свинец следует отнести к симметричным, а система индий-олово-галлий является асимметричной.

Полученные результаты представлены на рис. 3, 4. Для наглядности на рисунках представлены изотермы ПН по лучевым сечениям концентрационного треугольника. Как видно из рисунков, вычисленные по методу Колера изотермы ПН в пределах погрешности эксперимента (1%) совпадают с экспериментальными в симметричной тройной системе индий-олово-свинец, и качественно передают концентрационную зависимость ПН тройной системы индий-олово-галлий, которая характеризуется небольшими отклонениями изотерм ПН от симметричности.

Расчеты ПН тройных систем проводились нами как с использованием в качестве уравнения изотерм ПН идеального раствора аддитивной функции, так и теоретического выражения (2). Как видно из рис. 3, 4, результаты, полученные при использовании теоретического уравнения (2), ближе к экспериментальным данным, чем значения ПН, полученные в предположении аддитивности концентрационной зависимости ПН.

Как отмечено выше, в качестве уравнения изотерм ПН идеального раствора можно использовать любое известное выражение, вплоть до аддитивной функции [19]. Однако результаты проведенных расчетов показали, что на практике предпочтительнее использование для этих целей уравнения (2). Обусловлено это тем, что это уравнение имеет ясный физический смысл, и его использование повышает точность прогнозирования

ния концентрационной зависимости ПН тройных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

По форме изотерм избыточного поверхностного натяжения боковых двойных расплавов тройные системы можно разбить на две группы. Это — симметричные и асимметричные тройные системы.

Критерием предварительной оценки достоверности результатов прогнозирования свойств многокомпонентных растворов могут выступать изотермы избыточного ПН боковых двойных систем. Метод, основанный на модели Колера, в пределах суммарной погрешности измерения ПН прогнозирует как простые, так и сложные (с особенностями в виде минимума, максимума) изотермы поверхностного натяжения тройных расплавов, у которых изотермы избыточного ПН боковых двойных систем симметричны относительно эквимольного состава (симметричные). Однако при наличии сильной асимметрии на изотермах избыточного ПН двух боковых двойных систем (асимметричные тройные системы) результаты расчетов могут даже качественно отличаться от экспериментальных данных. Если асимметрия на изотермах избыточного поверхностного натяжения наблюдается только в одной боковой двойной системе, то метод Колера, качественно описывает экспериментальные изотермы ПН.

Концентрационную зависимость поверхностного натяжения асимметричных трехкомпонентных систем (с сильной асимметрией изотерм избыточного ПН двух боковых двойных систем) с достаточной точностью прогнозируют методы, основанные на моделях Бонье и Тупа. В изученной нами асимметричной тройной системе индий—олово—галлий вычисленные значения ПН в пределах суммарной погрешности эксперимента совпадают с экспериментальными.

При определении избыточного поверхностного натяжения в выражении (1) в качестве уравнения изотерм поверхностного натяжения идеального раствора предпочтительнее использовать выражение (2), так как оно имеет ясный физический смысл и его использование при проведении расчетов повышает точность получаемых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 582 с.
2. Гуггенгейм Е. А. Современная термодинамика, изложенная по методу Гиббса. Л.: ГНТИ хим. лит.-ры, 1941. 188 с.
3. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления Л.: Химия, 1967. 388 с.
4. Алчагиров Б. Б., Афаунова Л. Х., Горчханов В. Г., Дадашев Р. Х., Дышекова Ф. Ф., Таова Т. М. Прибор для совместного измерения поверхностного натяжения и работы выхода электрона жидкометаллических систем с участием компонентов с высокой упругостью пара // Изв. РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 76. № 13. С. 33–36.
5. Алчагиров Б. Б., Дадашев Р. Х., Хоконов Х. Б., Дышекова Ф. Ф., Кясова О. Х., Лесев В. Н., Таова Т. М. Внедрение в научные исследования и учебную практику новых изобретений и патентов. Ч. 2. Приборы и методы для измерения поверхностного натяжения жидкометаллических расплавов // Изв. Кабардино-Балкарского государственного ун-та. 2019. Т. 9. № 3. С. 66–76.
6. 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 Академии наук Чеченской Республики. 2016. № 4(33). С. 10–15.
7. Патент на изобретение RU 2511277 C2, МПК G01N 13/02 (2006.01) Прибор для совместного измерения поверхностного натяжения и работы выхода электрона жидкометаллических систем с участием компонентов с высокой упругостью насыщенного пара металлов и сплавов 2012115798/28; заявлено 19.04.2012; опубликовано 10.04.2014 Бюл. № 10 / Алчагиров Б. Б., Альбердиева Д. Х., Архестов Р. Х., Горчханов В. Г., Дадашев Р. Х., Дышекова Ф. Ф., Таова Т. М.; заявитель КБГУ им. Х. М. Бербекова. 11 с.
8. Дадашев Р. Х., Кутуев Р. А., Созаев В. А. Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия М.: Наука, 2016. 208 с.
9. Камболов Д. А., Кашежеев А. З., Кутуев Р. А., Понезеев М. Х., Созаев В. А., Шерметов А. Х. Политермы плотности и поверхностного натяжения расплава цинк—алюминий—молибден—магний // Изв. РАН. Сер. физическая. 2014. Т. 78. № 8. С. 1016–1018.
10. Елекоева К. М., Касумов Ю. Н., Кутуев Р. А., Манукянц А. Р., Понезеев М. Х., Созаев В. А., Хасцаев Б. Д. Политермы углов смачивания цинком и сербской бронзой вольфрам—кобальтовых подложек // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 12. С. 62–65.
11. Moser Z., Gasior W., Bukat K., Pstrus J., Kisiel R., Sitek J., Ishida K., Ohnuma I. Pb-Free Solders: Part III. Wettability Testing of Sn—Ag—Cu—Bi Alloys with Sb // JPE-DAV. 2007. P. 433–438.
12. Fima P. Surface tension and density of liquid Sn—Ag—Cu alloys // Intern. J. Mater. Research. 2012. V. 103. № 12. P. 1455–1461.
13. Еременко В. Н., Василю М. Н. Классификация жидких металлических систем по типам изотерм поверхностного натяжения // Укр. хим. журн. 1972. Т. 38. № 2. С. 118–121.
14. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): справочник. М.: Металлургия, 1981. 208 с.

15. *Попель С.И.* Поверхностные явления в расплавах. М.: Металлургия, 1994. 440 с.
16. *Gao S., Jiao K., Zhang J.* Review of viscosity prediction models of liquid pure metals and alloys // *Philosoph. Magazine.* 2019. V. 99. P. 853–868.
17. *Belashchenko D.K.* Computer simulation of liquid metals // *Usp. Fiz. Nauk, Russian Academy Sci.* 2013. V. 56. № 12. P. 1176–12163.
18. *Laffitte M., Bros J.-P., Bergman C.* Enthalpies de formation des alliages ternaires liquides etain-gallium-indium Bull // *SOC. Chim. Belges.* 1972. V. 81. P. 163–169.
19. *Дадашев Р.Х.* Термодинамика поверхностных явлений. М: Физматлит, 2007. 278 с.
20. *Дадашев Р.Х., Ибрагимов Х.И., Саввин В.С.* Прогноз поверхностного натяжения многокомпонентных систем // *Поверхностные свойства расплавов.* Киев: Наукова думка. 1982. С. 7–11.
21. *Дадашев Р.Х.* Прогнозирование физико-химических свойств многокомпонентных металлических расплавов // *Расплавы.* 1994. № 6. С. 72–84.
22. *Офицеров А.А., Жуховицкий А.А., Пугачевич П.П.* Поверхностное натяжение тройных идеальных металлических растворов // *Изв. Вузов. Черная металлургия.* 1966. № 9. С. 5–10.
23. *Дадашев Р.Х., Хоконов Х.Б., Ибрагимов Х.И., Элимханов Д.З., Кутуев Р.А.* Поверхностное натяжение и молярные объемы тройных расплавов щелочных металлов / *Материалы Всероссийской научной конференции. Комплексный научно-исследовательский институт РАН.* 2003. С. 105–114.
24. *Дадашев Р.Х., Элимханов Д.З.* Сравнительный анализ методов прогноза поверхностного натяжения многокомпонентных металлических расплавов // *Вестник Академии наук Чеченской Республики.* 2021. № 1(52). С. 23–28.
25. *Джамбулатов Р.С., Дадашев Р.Х., Элимханов Д.З.* Теоретические модели для прогноза поверхностного натяжения растворов диоксан 1.4-ацетон-вода // *Вестник Академии наук Чеченской Республики.* 2015. № 1(26). С. 5–8.
26. *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. № 11. С. 1734–1737.
27. *Дадашев Р.Х., Ибрагимов Х.И., Юшаев С.М.* Поверхностные свойства расплавов индий–олово и таллий–висмут // *Изв. вузов. Цветная металлургия.* 1984. № 1. С. 121–122.
28. *Ибрагимов Х.И., Паскачева Б.Х.* Теплофизические свойства металлических и полимерных расплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 287 с.
29. *Алчагиров Б.Б.* Поверхностные свойства щелочных металлов и бинарных металлических систем диссертация доктора физико-математических наук. Кабардино-Балкарский госуниверситет. Нальчик, 1992. 275 с.
30. *Kohler F.* Zur Berechnung der thermodynamischen Daten eines ternären Systems aus den zugehörigen binären Systemen // *Monatsch. Chem.* 1965. P. 1228–1251.
31. *Boinnier E., Caboz R.* The estimation of free energy of mixing certain ternary liquid metals alloys // *Compt. Rend.* 1960. V. 250. P. 527–529.
32. *Toop G.* Predicting ternary activities using binary data // *Trans. Metal. Soc. AIME.* 1965. V. 233. P. 850–854.
33. *Морачевский А.Г., Фирсова Е.Г.* Физическая химия. Гетерогенные системы: Учебное пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Изд. “Лань”, 2015. 192 с.