

УТВЕРЖДАЮ:

И.В. проректора по НИР ФГБОУ ВО  
«Кабардино-Балкарский государственный  
университет им. Х.М. Бербекова»  
профессор С.Ю. Хаширова  
« 15 / 01. \_\_\_\_\_ 2024 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет  
им. Х.М. Бербекова»

Диссертационная работа Афашагова Анзора Артуровича  
«Термодинамические свойства плоской и искривленной границы раздела  
конденсированных фаз в бинарных металлических системах» выполнена в  
федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет  
им. Х.М. Бербекова».

В период подготовки диссертации Афашагов А.А. проходил обучение в  
аспирантуре в ФГОБУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный  
университет им. Х.М. Бербекова» по специальности 03.06.01 – Физика и  
астрономия. В настоящее время работает в должности старшего  
преподавателя кафедры электроники и цифровых информационных  
технологий КБГУ.

В 2019 г. Афашагов А.А. с отличием окончил магистратуру Кабардино-  
Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова по  
направлению подготовки 11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника с  
присуждением квалификации «Магистр».

В 2023 г. Афашагов А.А. году окончил аспирантуру Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова по специальности 03.06.01 – Физика и астрономия с присуждением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Справка № 0380 о сдаче кандидатских экзаменов выдана 16 февраля 2024 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Научный руководитель – Шебзухова Мадина Азметовна, доктор физико-математических наук, работает в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» в должности профессора кафедры физики наносистем.

По итогам обсуждения диссертационной работы принято следующее заключение:

Диссертационная работа Афашагова А.А. посвящена изучению термодинамических свойств (поверхностного и межфазного натяжения, составов и термодинамических активностей компонентов в объемных фазах и переходном слое) в зависимости от основных параметров состояния системы и размерного фактора на плоской и искривленной границе раздела в бинарных гетерогенных системах.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Получено новое уравнение межфазного натяжения в бинарных системах в случае плоской границы раздела конденсированных фаз в изотермических условиях с учетом составов контактирующих фаз.

2. Получены новые выражения для термодинамических свойств (составов и термодинамических активностей компонентов) границ раздела межфазного слоя и объемных фаз для бинарных растворов.

3. С использованием полученных соотношений в рамках различных моделей растворов проведены численные расчеты для основных



термодинамических характеристик плоских границ раздела – межфазного натяжения, составов контактирующих фаз и межфазного слоя, а также термодинамических активностей компонентов в объемных фазах и межфазном слое.

4. Получено новое уравнение размерной зависимости межфазного натяжения  $\sigma(r)$  на искривленной границе раздела дисперсной частицы с дисперсионной средой в изотермических условиях.

5. Выполнены численные расчеты межфазного натяжения  $\sigma$  в зависимости от температуры  $T$  и размера наночастиц  $r$  в бинарных металлических системах.

6. С использованием полученных соотношений проведены численные расчеты составов контактирующих фаз и построены макроскопические фазовые диаграммы состояния, а также рассчитаны взаимные растворимости в твердом состоянии с учетом наноразмерных эффектов для металлических бинарных систем.

#### **Личное участие автора в получении научных результатов**

Все научные результаты, а также результаты численные расчеты получены и проведены диссертантом самостоятельно. Задачи диссертационной работы были сформулированы научным руководителем, доктором физ.-мат. наук, Шебзуховой М.А. и обсуждались непосредственно с ее участием. Автор диссертационной работе принимал непосредственное участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов вместе со своими соавторами.

**Степень достоверности результатов диссертационной работы** обеспечивается следующими выводами:

1. Все соотношения, полученные в диссертационной работе для межфазного натяжения, состава, термодинамических активностей, удовлетворяют фундаментальным уравнениям А.И. Русанова в рамках термодинамики поверхностных и межфазных явлений в гетерогенных системах

2. Проведенный анализ полученных соотношений на предельные случаи, в частности уравнения изотермы межфазного натяжения наночастицы в дисперсионной среде на искривленных границах, подтвердил их справедливость в частных случаях совпадением с известными формулами и уравнениями классической термодинамики поверхности.

3. Рассчитанные в работе фазовые диаграммы состояния бинарных систем в макроскопическом случае полностью совпадают с экспериментальными диаграммами, имеющимися в литературе.

4. Совпадение полученных результатов по расчету размернозависимых фазовых диаграмм с имеющимися в литературе теоретическими и экспериментальными данными.

### **Научная новизна работы**

В ходе выполнения работы получены следующие результаты, обладающие признаками научной новизны:

1. Получено новое уравнение межфазного натяжения на границе двух бинарных конденсированных фаз в изотермических условиях в двух вариантах (точное и приближенное), которое в частных случаях переходит в уравнения других авторов и имеет достаточно широкое применение на практике.

2. Получены новые выражения, позволяющие находить термодинамические активности компонентов в контактирующих фазах и межфазном слое в концентрационном интервале от 0 до 100 ат. %.

3. Получены новые уравнения для размерных зависимостей составов контактирующих фаз и межфазного слоя на границе дисперсионная частица – дисперсионная среда.

4. С использованием новых соотношений, полученных в диссертационной работе, проведены численные расчеты важнейших термодинамических свойств плоских и искривленных границ раздела конденсированных фаз (поверхностного и межфазного натяжения, составов и термодинамических активностей в объемных фазах и межфазном слое) для



ряда бинарных металлических систем (In-Pb, In-Sn, In-Tl, Al-In, Fe-Cr, Cr-Ti, Zr-Nb и Mo-Ru), которые могут быть использованы для решения многих перспективных задач в области материаловедения и нанотехнологий.

5. В рамках термодинамического метода слоя конечной толщины и с использованием новых соотношений для составов сосуществующих фаз, полученных в представленной работе, построены макроскопические диаграммы состояния бинарных систем с разным типом диаграмм состояния Al-In и Ag-Bi, а также рассчитана взаимная растворимость молибдена и рутения в твердом состоянии в системе Mo-Ru, которая находит широкое промышленное применение, в том числе в ядерной энергетике.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Новые соотношения, полученные для нахождения основных термодинамических характеристик для плоской и искривленной границ раздела конденсированных фаз, могут быть использованы для описания фазового равновесия в двухкомпонентных системах и нахождения характеристик границ раздела разнородных контактов.

Результаты численных расчетов поверхностного натяжения в зависимости от состава на плоской границе раздела и размерной зависимости на искривленной границе для бинарных металлических систем, полученные в данной диссертационной работе, могут быть полезны при решении задач в области материаловедения и создания новых материалов с заранее заданными характеристиками.

Рассчитанные составы сосуществующих фаз и межфазного слоя, а также термодинамические активности компонентов могут быть приняты в качестве входных данных при построении макроскопических диаграмм состояния и нанодиаграмм для бинарных металлических систем.

#### **Полнота изложения материалов диссертации**

Представленные в диссертационной работе научные результаты опубликованы в 8-ми научных работах. Из них 5 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

1. М.А. Шебзухова, **А.А. Афашагов**, Х.Л. Хоконов, А.А. Шебзухов Межфазное натяжение на границе раздела двух несмешивающихся жидких растворов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2019. – Т.9. – №3. – С. 62-65.
2. М.А. Шебзухова, **А.А. Афашагов**, А.А. Шебзухов Межфазное натяжение на плоской границе раздела двух жидких растворов при разных температурах в бинарной системе Al-In // Университетский научный сборник №3. Сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, приуроченной к 85-летию со дня основания Кабардино-Балкарского государственного университета. – Нальчик. – 2019. – С.173-177.
3. **А.А. Афашагов**, М.А. Шебзухова, К.Ч. Бжихатлов Поверхностное натяжение в двухкомпонентных металлических системах // Современные методы исследования и диагностики поверхности. Материалы Международной научно-практической конференции. – Грозный. – 2021. – С.95-99.
4. **А.А. Афашагов**, М.А. Шебзухова Межфазное натяжение наночастиц на границе с матрицей в бинарной системе Fe-Cr // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы XII Международной научно-технической конференции. – Нальчик. – 2021.– С. 47-51.
5. **А.А. Афашагов**, М.А. Шебзухова, А.А. Шебзухов Термодинамические характеристики границы раздела конденсированных фаз в бинарных металлических сплавах // ФТТ. – 2022. – Т.64. –№10. – С. 1585-1590.
6. Р.М. Калмыков, А.М. Кармоков, Р.Ю. Кармокова, З.В. Шомахов, **А.А. Афашагов** Исследования изменения проводимости твердых растворов на основе PbTe с примесями CdSe // Прикладная физика. – 2023. – №1. – С. 57-61. (ВАК, К-1)
7. **А.А. Афашагов**, М.А. Шебзухова Точное и приближенное решения уравнения изотермы межфазного натяжения на плоской границе раздела конденсированных фаз // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2023. – Т.13. – №2. – С. 5-10.



8. **А.А. Афшагов**, М.А Шебзухова, К.Ч. Бжихатлов, А.Х. Ципинова  
Наноразмерная зависимость взаимной растворимости в твердом состоянии в  
металлической системе Mo-Ru // ФММ – 2023. – Т.124. – №10. С. 1–10.

Основные результаты, полученные в работе, докладывались и  
обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: Национальная  
университетская научно-практическая конференция, приуроченная к 85-  
летию со дня основания Кабардино-Балкарского государственного  
университета (г. Нальчик, 2019 г.); Международный междисциплинарный  
симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые  
переходы» (г. Нальчик - пос. Эльбрус, 2019 г.); XII Международная научно-  
техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике»  
(г. Нальчик, 2021 г.); Международная научно-практическая конференция  
«Современные методы исследования и диагностики поверхности»  
(г. Грозный, 2021 г.).

В диссертационной работе не содержатся заимствованные материалы,  
представленные без ссылки на авторов и источники публикаций.

Диссертация прошла проверку по программе «Антиплагиат».  
Уникальность составила 82,5 %.

Диссертационная работа «Термодинамические свойства плоской и  
искривленной границы раздела конденсированных фаз в бинарных  
металлических системах» представляет собой научно-квалификационную  
работу и соответствует требованиям, установленным для диссертаций на  
соискание ученой степени кандидата наук (ч. II «Положения о присуждении  
ученых степеней» утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября  
2013 г. №842, ред. от 01.10.2018). Тема и содержание диссертации  
соответствуют паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного  
состояния (пп.1, 2).

Диссертация Афшагова Анзора Артуровича «Термодинамические  
свойства плоской и искривленной границы раздела конденсированных фаз в  
бинарных металлических системах» рекомендуется к защите на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Заключение принято на совместном заседании кафедры физики  
наносистем и кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Присутствовало на заседании всего – 24 человека, в том числе:  
д.ф.-м.н. – 11 человек; к.ф.-м.н. – 6 человек.

Результаты голосования:

«за» - 24 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Протокол № 1 от «15» января 2024 г.

Председатель заседания

и.о. зав. кафедрой теоретической и экспериментальной физики,

д.ф.-м.н., профессор



А.П. Савинцев

