



УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»

Саидов З.А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
«Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»

Диссертация Кутуева Руслана Азаевича «Поверхностные свойства двойных и многокомпонентных расплавов на основе легкоплавких металлов» выполнена на кафедре общей физики в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» (ЧГУ им. А.А. Кадырова). Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Дадашев Райком Хасимханович.

В период подготовки диссертации соискатель, Кутуев Руслан Азаевич, работал в ЧГУ им. А.А. Кадырова доцентом, деканом физического факультета, проректором по общим вопросам.

В 1991 г. окончил Чечено-Ингушский государственный университет им. Л.Н. Толстого по специальности «Физика».

В 2001 г. в диссертационном совете на базе Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника» на тему: «Термодинамические параметры поверхностного слоя двойных и многокомпонентных расплавов легкоплавких Р-металлов».

Диссертация Кутуева Р.А. «Поверхностные свойства двойных и многокомпонентных расплавов на основе легкоплавких металлов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук рассмотрена и обсуждена на расширенном заседании научного семинара кафедр общей физики, физической электроники и отдела физико-математических

исследований КНИИ РАН (г. Грозный) им. Х.И. Ибрагимова 01. 03. 2023 г., протокол № 1.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

Диссертация Кутуева Р.А. является законченной научно-исследовательской работой, посвященной актуальной теме – исследование поверхностных свойств расплавов двойных и многокомпонентных легкоплавких металлов (поверхностное натяжение, плотность, адсорбция, состав и толщина поверхностного слоя), а также смачиваемости ими твердых поверхностей, в том числе и реакторных сталей.

### **Актуальность исследования.**

Процессы технологического развития таких важных технологий, как литье, лужение и пайка, рафинирование металлов, металлизация, разработки жидкометаллических теплоносителей высокоэнергетических установок, получения новых композиционных материалов и сплавов диктуют необходимость дальнейшего изучения поверхностных свойств металлических расплавов.

К числу наиболее перспективных материалов для использования в качестве теплоносителей в ядерных реакторах относятся сплавы на основе свинца, висмута, с добавками индия, олова и щелочных металлов. Критический анализ экспериментальных данных, имеющих в научной литературе, показывает, что, несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных изучению поверхностных свойств металлов и сплавов, особенности температурной и концентрационной зависимостей поверхностного натяжения, плотности расплавов на основе легкоплавких металлов и угла смачивания ими реакторных сталей, изучены недостаточно полно.

Для определения и прогнозирования оптимальных составов этих сплавов, удовлетворяющих жестким требованиям ядерных технологий, необходимы всесторонние исследования их физико-химических и поверхностных свойств. Особенно это относится к исследованиям свойств и процессов, протекающих на границе раздела фаз, важнейшими характеристиками которой являются поверхностное натяжение (ПН) и краевой угол смачивания. Поверхностное натяжение является наиболее точно измеряемым свойством поверхностного слоя жидкости, температурная и концентрационная зависимости которого позволяют получить ценную информацию о строении и свойствах границы раздела фаз.

Отсутствие надежных методов определения свойств поверхности многокомпонентных расплавов существенно замедляет процесс накопления данных по свойствам этих расплавов, что затрудняет проведение анализа процессов, протекающих на границе раздела фаз, и тем самым тормозит, как развитие теории поверхностных явлений, так и использование этих сплавов на

практике. Поэтому разработка вышеуказанных методов для систем с неограниченным числом компонентов приобретает особую актуальность.

В связи с этим систематические исследования поверхностных свойств перспективных в плане использования в различных отраслях промышленности, а также и в атомной энергетике расплавов In - Sn, In - Tl, Sn - Tl, Ga - Bi, Pb - Bi, Pb - Na, Pb - Tl, Cu - Al, Zn - Al - Mo - Mg и In - Sn - Pb - Bi и угла смачивания ими твердых поверхностей в том числе и реакторных сталей, являются актуальной задачей.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Диссертант показал хорошую теоретическую подготовку и владение имеющейся в современной научной периодике информацией. Это видно из анализа полученных результатов, качества аргументации.

Выводы и положения, выносимые на защиту достаточно обоснованы. О надежности и достоверности выводов свидетельствует использование в работе надежных и точных методов исследования поверхностных свойств с применением в исследованиях современных программных комплексов.

Таким образом, полученные Кутуевым Р.А. результаты и выводы в достаточной степени обоснованы и достоверны, докладывались на 30 Всероссийских и Международных научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 60 работ, в том числе 27 в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus/WoS, и две монографии.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

### **Научная новизна, теоретическое и практическое значение работы.**

Соискателем определена зависимость расстояния между различными положениями разделяющей поверхности от состава экспериментально изученных двойных систем. Выявлено, что максимальное расстояние между положениями разделяющей поверхности, соответствующими различным вариантам определения адсорбции не превышает толщину нескольких атомных слоев, т.е. ни одна из рассматриваемых поверхностей при изменении состава бинарной системы не выходит за пределы физической границы раздела фаз.

Разработан метод для вычисления свойств межфазного слоя расплавов с неограниченным числом компонентов, который позволяет определить по изотермам поверхностного натяжения следующие величины: молярную поверхность, толщину и состав поверхностного слоя многокомпонентных растворов.

В широкой области концентрации экспериментально определены изотермы и политермы ПН и плотности расплавов: Ga - Bi, Pb - Tl, In - Sn, In - Tl, Sn - Tl, Cu - Al.

Полученные экспериментальные результаты показывают следующее:

– изотермы ПН двойных систем Pb - Tl, In - Sn характеризуются минимумом в области средних составов, а молярные объемы имеют небольшие отклонения от аддитивных значений (положительные в системе индий-олово и знакопеременные в расплавах таллий - свинец). С ростом температуры глубина минимума на изотермах ПН обеих систем уменьшается, а молярные объемы приближаются к аддитивным величинам;

– изотермы ПН двойной системы медь - алюминий при 0,38 мол. долей алюминия характеризуются точкой перегиба;

– концентрационные зависимости ПН двойных систем индий - таллий, олово - таллий и галлий - висмут передаются гладкими кривыми без экстремумов, а изотермы молярных объемов этих систем в пределах погрешности измерения совпадают с аддитивными прямыми;

– по полученным экспериментальным данным определены термодинамические параметры поверхностного слоя изученных двойных систем, что позволило выявить закономерности изменения с составом бинарного расплава различных вариантов адсорбции компонентов, усредненного состава поверхностного слоя, расстояния между различными положениями разделяющей поверхности Гиббса.

Экспериментально изучены температурные и концентрационные зависимости поверхностного натяжения и плотности четырехкомпонентной системы In – Sn – Pb - Bi. Выявлено, что на разрезах концентрационного тетраэдра с постоянным содержанием висмута (0,05 молярных долей) «впадина» на изотермической поверхности ПН исчезает. Аналогичное явление наблюдается также на разрезах четверной системы с постоянным содержанием свинца. Однако, в этом случае «впадина» исчезает только при содержании свинца, равном 0,1 молярных долей.

По разработанным методам, используя полученные экспериментальные данные, определены концентрационные зависимости термодинамических параметров поверхностного слоя четверных расплавов In-Sn – Pb - Bi.

Выявлено следующее:

– во всей области составов поверхностный слой четырехкомпонентных расплавов обогащён атомами висмута, т. е. висмут на всех расплавах этой системы адсорбируется положительно;

– адсорбционные процессы в расплавах индий-олово-свинец-висмут характеризуются такими явлениями, как концентрационная буферность и подавление адсорбции одного компонента другим;

– зависимость эффективной толщины поверхностного слоя расплавов от молярных долей висмута как в объеме, так и в поверхностном слое, передается аддитивной функцией;

Экспериментально измерена температурная зависимость ПН и плотности расплава сербской бронзы. Политерма поверхностного натяжения этого расплава при температуре  $820 \pm 10$  К характеризуется максимумом. Выявлено, что появление этого экстремума на политерме ПН связано с бесконтрольным образованием оксидной пленки на начальном этапе

плавления легкоплавкого металла.

Экспериментально определены температурные и концентрационные зависимости ПН и плотности свинца, висмута, висмутистого свинца (Bi – 10,6 масс. %) и разбавленных растворов Pb - Na. Температурные зависимости ПН чистых металлов (свинец, висмут), висмутистого свинца линейные.

Температурная зависимость поверхностного натяжения, плотности разбавленных растворов натрия в свинце изучена нами, как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения. При этом в интервале концентрации натрия от 0,0021 до 0,0024 мол. долей, как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения изотермы и политермы ПН и плотности характеризуются наличием точки перегиба. Локальными максимумами характеризуются и изотермы адсорбции натрия в этих расплавах.

Экспериментально изучены температурные зависимости краевых углов смачивания:

- сербской бронзой – меди, алюминия, стали 12X18H9T и твердых сплавов вольфрам – кобальт (WC - Co);

- цинком – поверхности твердых сплавов вольфрам - кобальт;

- висмутистым свинцом – реакторных сталей ЭК - 181, ЭП - 753А, ЭК - 173, ЭП - 753ТЮР и ЭК - 450;

- расплавами алюминий - медь с содержанием меди 0,207, 0,33 и 0,5 масс. долей подложек из Ni - Cr, Co - Cr, стали 25X18H9C2 и титана.

Впервые установлено следующее:

- температурная зависимость краевого угла смачивания сербской бронзой поверхности вольфрам - кобальтовых подложек имеет нелинейный характер. При этом, углы смачивания сербской бронзой вольфрам - кобальтовых подложек в интервале температур от 730 до 850 К ниже, чем значения углов смачивания этой же поверхности цинком;

- порогом смачивания характеризуются температурные зависимости краевого угла смачивания:

- сербской бронзой поверхностей меди (при 813 К), стали марки 12X18H9T (при 1050 К) и алюминия (при 780 К);

- висмутистым свинцом поверхностей сталей ЭК - 181, ЭП - 753А, ЭК - 450 в интервале от 900К до 1000К;

- расплавом медь - алюминий (0,5 масс. долей меди) поверхностей титана, стали 25X18H9C2, Ni - Cr при температурах 925К, 950К, 1025К, соответственно;

- линейной зависимостью характеризуются политермы краевого угла смачивания:

- висмутистым свинцом поверхностей стальных подложек ЭК - 173 и ЭП - 753ТЮР;

- расплавами алюминий - медь (0,207 и 0,33 масс. долей меди) твердых поверхностей Ni - Cr, Ti и стали 25X18H9C2;

- расплавом алюминий - медь (0,5 масс. долей меди) твердой поверхности Co - Cr.

– стальные подложки ЭК - 173, ЭП - 753ТЮР в изученном интервале температур практически не смачиваются висмутистым свинцом.

Морфология капли сербской бронзы и твердой поверхности меди, стали 12Х18Н9Т и алюминия после их взаимодействия исследована нами с помощью растрового электронного микроскопа PHENOMG2 Pure с разрешением 20 нм. Выявлено, что на твердых поверхностях, в результате воздействия на них сербской бронзой, образуются новые структурные образования различных форм (пирамидальные, сферические, пластинчатые), размеры которых колеблются от 0,5 до 4 мкм;

Сделанный в работе вывод о том, что ни одна из рассматриваемых разделяющих поверхностей Гиббса при изменении состава бинарной системы не выходит за пределы физической границы раздела фаз, доказывает равнозначность существующих вариантов определения адсорбции (относительная адсорбция Гиббса, N, M и V-варианты адсорбции по Гуттенгейму и Адаму), что имеет научное и практическое значение.

Разработанные автором методы позволяют определить по концентрационной зависимости ПН следующие термодинамические параметры поверхностного слоя многокомпонентных расплавов: молярные и парциально-молярные поверхности, эффективную толщину и усредненный состав поверхностного слоя.

Эти методы нашли применение при определении термодинамических параметров свойств поверхностного слоя и теоретическом анализе адсорбционных процессов в многокомпонентных растворах.

Результаты расчетов поверхностных свойств многокомпонентных систем и полученные в работе экспериментальные данные по температурной зависимости ПН, плотности жидких металлов и сплавов и угла смачивания ими твердых поверхностей расширяют базу данных по свойствам межфазной границы, что может служить экспериментальной основой для разработки новых теоретических моделей.

Данные по температурной зависимости поверхностного натяжения и плотности расплавов сербской бронзы и висмутистого свинца могут использоваться на заводе «Электроцинк» (г. Владикавказ).

Данные по температурной зависимости краевых углов смачивания расплавами Pb – 10,6 масс. % Bi новых реакторных сталей могут найти применение при разработке тяжелых жидкометаллических теплоносителей для высокоэнергетических ядерных установок.

Данные по взаимодействию цинка с вольфрам-кобальтовыми твердыми сплавами могут найти применение при получении микропорошков твердых сплавов, в частности на заводе «Победит» (г. Владикавказ).

Экспериментальные данные по ПН, плотности и смачиваемости расплавами медь-алюминий (дюралюминий, алюминиевые бронзы) твердых подложек могут быть необходимыми для решения целого ряда прикладных задач, так как эти сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В частности, они применяются при изготовлении ёмкостей

для жидкого кислорода и водорода, в авиапромышленности для изготовления некоторых деталей турбореактивных двигателей и в электротехнике. Расплавы этой системы нашли применение также в качестве высокотемпературных припоев для пайки титана, нержавеющей стали и твердых сплавов.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Работа соответствует паспорту специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

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

Личный вклад автора состоит в получении из фундаментального термодинамического уравнения метода слоя конечной толщины систем уравнений и разработке на этой основе новых методов расчета термодинамических параметров поверхностного слоя многокомпонентных растворов, в формулировке идей экспериментов, анализе и сравнении результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертационной работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Теоретические исследования адсорбционных процессов в многокомпонентных расплавах и часть трудоемких экспериментальных исследований были проведены совместно с соавторами научных публикаций.

Экспериментальные исследования температурной и концентрационной зависимости ПН и плотности двухкомпонентных систем индий - таллий, олово - таллий, свинец - таллий и четырехкомпонентных расплавов индий – олово – свинец - висмут проведены автором лично.

Экспериментальные исследования зависимости ПН и плотности расплавов сербской бронзы, двойных систем Ga-Bi, In-Sn, Pb-Bi, Cu-Al, Pb-Na и угла смачивания жидкими сплавами твердых подложек из различных материалов выполнены совместно с соавторами.

### **Заключение расширенного семинара.**

Диссертационная работа Кутуева Руслана Азаевича представляет собой завершенное исследование, имеющее важное теоретическое и практическое значение. Диссертация и автореферат изложены грамотным научным языком. Диссертация является законченной научной работой и отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук и рекомендуется к защите по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Заключение рассмотрено на расширенном заседании научного семинара кафедр общей физики, физической электроники и отдела физико-математических исследований КНИИ РАН (г. Грозный) им. Х.И. Ибрагимова.

Присутствовало на заседании 15 человек. Результаты голосования: «За»-15 чел., «Против»-0 чел., «Воздержалось»-0 чел., Протокол № 1 от 01.03.2023 г.

Присутствовали: д.ф.-м.н. Магомадов Р.М., д.ф.-м.н. Дадашев Р.Х., д.ф.-м.н. Умхаева З.С., канд.физ.-мат. наук Элимханов Д.З., канд.физ.-мат. наук Хасанов А.И., канд.физ.-мат. наук Хасбулатов С.В., канд.физ.-мат. наук Алероев М.А., к.п.н. Дадашева З.И., к.х.н. Акаева М.М, к.п.н. Талхигова Х.С., канд.физ.-мат. наук Алихаджиев С.Х., канд.физ.-мат. наук Джамбулатов Р.С., к.п.н. Магомадова Р.А., канд.физ.-мат. наук Садыков Х.А., к.п.н. Умарова Л.Х., канд.физ.-мат. наук Яндарбиев Ш.М., канд.физ.-мат. наук Алиев И.М., к.т.н. Хасамбиев И.В.

Председательствующий  
на расширенном научном семинаре  
зав. кафедрой физической электроники  
ЧГУ им. А.А. Кадырова, канд. физ.-мат. наук

А.И. Хасанов

Секретарь расширенного научного семинара  
доцент кафедры Общей физики  
ЧГУ им. А.А. Кадырова, канд. физ.-мат. наук

Д.З. Элимханов



Личную подпись *Хасанов А. И.*  
Заверяю: Начальник Общего отдела  
*Висо В. К. Рафиков*



Личную подпись *Элимханов Д. З.*  
Заверяю: Начальник Общего отдела  
*Висо В. К. Рафиков*