



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН
Маркович Дмитрий Маркович

« 3 » июня 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом» выполнена Хайрулиным Андреем Рашидовичем в Лаборатории термодинамики веществ и материалов № 3.3 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации с 2019 по 2025 год соискатель Хайрулин Андрей Рашидович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории термодинамики веществ и материалов в должностях инженера, инженера-исследователя, а с 2025 года по настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника. В 2021 году он окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «физика». Соискатель проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук с 2021 по 2025 год, научная специальность 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Кандидатские экзамены по научной специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника сданы во время обучения в аспирантуре, все оценки – «отлично».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Станкус Сергей Всеволодович, работает руководителем научного направления Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение:**

Цель работы

Получение новых высокоточных экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости твердых и жидких сплавов систем щелочных металлов со свинцом и висмутом в широких интервалах температур и концентраций, а также установление закономерностей изменения свойств расплавов от их состава.

Актуальность исследования

Жидкие сплавы щелочных металлов (ЩМ) со свинцом и висмутом относятся к достаточно редкому классу так называемых ионно-металлических расплавов, в которых кроме металлического типа химической связи в той или иной степени проявляется ионная связь. Это приводит к необычному изменению свойств в зависимости от температуры и состава. В частности, на концентрационных зависимостях удельного электросопротивления жидких систем «щелочной металл – свинец» и «щелочной металл – висмут» обнаружены гигантские максимумы при определенных стехиометрических соотношениях компонентов. Электросопротивление сплавов в районе этих максимумов превосходит соответствующие величины для чистых свинца и висмута в несколько и даже в несколько десятков раз. Аналогичные особенности наблюдаются на концентрационных зависимостях ряда других структурно-чувствительных свойств данных систем. Существующие теории этого явления связывают аномалии в поведении свойств с образованием в жидких сплавах ионных комплексов, которые состоят из аниона (или полианиона) свинца (висмута), окруженного катионами щелочного металла. Доля таких комплексов достигает максимума при определенных стехиометрических составах, и именно для этих составов наблюдаются наиболее ярко выраженные аномалии в поведении структурно-чувствительных свойств. Предлагаемые модели качественно объясняют положение экстремумов на концентрационных зависимостях свойств, но не позволяют количественно определить ни их форму, ни изменение свойств с температурой. Таким образом теория ионно-металлических расплавов еще далека от своего завершения. Во многом это связано с недостатком экспериментальных данных по структуре и структурно-чувствительным свойствам таких жидкометаллических систем. К числу наименее изученных относятся калорические свойства расплавов ЩМ-Pb и ЩМ-Bi (энтальпия, теплоемкость, энтальпия смешения), хотя эти свойства важны для разработки и верификации расчетных моделей, основанных на первых принципах. Так, прямые измерения энтальпии и теплоемкости в системах Rb-Pb и Cs-Pb проводились только для эквиатомных составов, а система Cs-Bi, по-видимому, вообще ранее не исследовалась. Энтальпия смешения и теплоемкость жидких сплавов легких щелочных металлов (литий, калий, натрий) со свинцом и висмутом исследовались в нескольких экспериментальных работах, однако в большинстве из них использовались косвенные экспериментальные методики, обладающие низкой точностью измерений.

Практический интерес к исследованию жидких сплавов литий-свинец, натрий-свинец и калий-свинец связан, в первую очередь, с возможностью их применения в ядерной и термоядерной энергетике. Так было показано, что жидкий сплав натрий-свинец, содержащий 10 ат. % свинца не горит на воздухе (вплоть до 700 °C) и менее взрывоопасен при контакте с водой по сравнению с чистым натрием, а небольшие добавки калия к свинцу уменьшают коррозионную активность теплоносителя. Важной частью разрабатываемых проектов термоядерного реактора является его бланкет, служащий для утилизации энергии нейтронов и воспроизведения трития. Одними из кандидатов для применения в качестве теплоносителя и материала бланкета термоядерного реактора являются литий и сплав литий-свинец эвтектического состава. Разработка эффективной и безопасной конструкции реакторов требует выполнения большого числа тепловых, гидравлических и прочностных расчетов. Для этого необходимы достоверные данные по целому комплексу теплофизических свойств жидкометаллического теплоносителя в широких интервалах температур, включая область тяжелых запроектных аварий. К числу важнейших теплофизических характеристик теплоносителя относятся и калорические свойства.

Исходя из всего вышесказанного, можно утверждать, что экспериментальные исследования калорических свойств жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и

висмутом в широких интервалах концентраций и температур актуальны как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Личный вклад автора

Автором подготовлены и проведены экспериментальные исследования инкремента энтальпии и теплоемкости сплавов систем Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi, а также чистых свинца и лития. Обработка и анализ данных, полученных в этих исследованиях, проведены автором лично. Обобщение и интерпретация результатов работы, а также подготовка статей для публикации в рецензируемых журналах выполнены автором совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. С.В. Станкусом.

Поставлены и решены следующие задачи

1. Выполнены модернизация и верификация методики измерения энтальпии методом смешения для исследования химически активных материалов с высоким давлением паров.
2. Получены достоверные экспериментальные данные по энтальпии и теплоемкости расплавов (до 1025–1175 К) и ряда твердых фаз систем Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi, а также чистых лития и свинца.
3. Уточнены фазовые диаграммы исследованных систем.
4. Разработаны справочные таблицы калорических свойств для научного и практического использования.
5. Установлены закономерности изменения теплоемкости сплавов исследованных систем в жидком состоянии от концентрации компонентов, которые сопоставлены с данными для других свойств, а также существующими представлениями о структуре данного класса расплавов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием надежной и апробированной экспериментальной установки и методики, высокоточных измерительных приборов, чистотой исследуемых металлов, процедурой подготовки образцов, детальным анализом погрешностей измерений, проверкой калориметра и методики на эталонном материале, проведением комплекса тарировочных экспериментов, воспроизводимостью результатов экспериментов, а также их сопоставлением с литературными данными.

Научная новизна

1. Получены новые экспериментальные данные по энтальпии и теплоемкости сплавов Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi в интервале температур от ликвидуса до 1025–1175 К. Для ряда сплавов также получены данные для твердого состояния и определены изменения калорических свойств при структурных переходах и плавлении. Значительная часть данных была получена впервые, и они остаются единственными, другие существенно уточняют существующие в литературе результаты исследований.
2. Впервые на основании прямых измерений калорических свойств построены концентрационные зависимости теплоемкости жидких систем Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi, а также концентрационные зависимости энтальпии смешения жидких систем Rb–Bi и Cs–Bi.
3. Уточнены температуры ликвидуса для исследованных расплавов систем щелочных металлов со свинцом и висмутом.
4. Впервые экспериментально обнаружены максимумы на концентрационных зависимостях теплоемкости жидких систем Cs–Pb, Rb–Bi и Cs–Bi, а также минимумы на концентрационных зависимостях энтальпии смешения жидких систем Rb–Bi и Cs–

Bi. Впервые непосредственными измерениями калорических свойств жидких сплавов Li–Pb, Na–Pb и K–Pb подтверждено наличие максимумов на концентрационных зависимостях теплоемкости данных жидких систем. Предложено объяснение обнаруженных аномалий на основе существующих представлений о структуре ионно-металлических расплавов.

Научная и практическая ценность

Проведенные в работе анализ и обобщение собственных и литературных данных по калорическим свойствам жидких сплавов Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi, построенные температурные и концентрационные зависимости исследованных свойств, обнаруженные на них особенности и корреляции с поведением других структурно-чувствительных характеристик расплавов являются основой для развития теории ионно-металлических расплавов.

Разработанные в ходе исследований таблицы рекомендуемых данных по калорическим свойствам металлов и сплавов (имеющих перспективы использования в качестве жидкометаллических теплоносителей) могут лечь в основу современных отечественных баз данных для использования в организациях атомной отрасли.

Надежные систематизированные данные по калорическим свойствам исследованных металлов и сплавов могут быть использованы для разработки и оптимизации технологий производства данных материалов.

Модифицированная методика измерений энтальпии материалов методом смешения (утвержденная, как методика ГСССД МЭ 282-2025) может быть использована в научных и метрологических организациях для расширения возможностей экспериментов и повышения точности получаемых данных.

Основные публикации автора по материалам диссертации

1. Khairulin A.R., Stankus S.V. Calorimetric Properties of Pure Lithium Investigated by High Temperature Drop Calorimetry // International Journal of Thermophysics. – 2026 – Vol. 47 Art. No. 1.
2. Агажанов А. Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Экспериментальные исследования энтальпии, теплоемкости и теплопроводности тройной жидкой эвтектики $Li_{13}K_4Pb_{83}$ // Атомная энергия. – 2026. – Т. 140, №.1. – С. 24–28.
3. Хайрулин А.Р., Станкус С.В. Энтальпия и теплоемкость жидких сплавов Cs–Bi // Теплофизика высоких температур. – 2024. – Т. 62, № 6. – С. 951–955.
4. Khairulin A. R., Stankus S. V. Enthalpy and Heat Capacity of Cs–Pb Alloys in Solid and Liquid States // International Journal of Thermophysics. – 2024. – Vol. 45. – Art. No. 67.
5. Хайрулин А. Р., Станкус С. В. Энтальпия и теплоемкость жидких сплавов $Na_{15}Pb_4$ и $Na_{50}Pb_{50}$ // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, №. 6. – С. 1223–1227.
6. Станкус С. В., Хайрулин А. Р., Яцук О. С. Энтальпия и теплоемкость свинца в конденсированном состоянии // Атомная энергия. – 2023. – Т. 134, №. 3–4. – С. 124–131.
7. Agazhanov A.Sh., Khairulin A.R., Abdullaev R.N., Stankus S.V. Thermophysical Properties of Liquid K–Pb Alloys // Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Vol. 30, No. 3. – P. 365–373.
8. Khairulin A. R., Savchenko I. V., Stankus S. V. Heat capacity of liquid $Cs_{80}Bi_{20}$ alloy with a partly ionic character of interatomic interaction // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1675. Art. No. 012100.
9. Khairulin A.R., Stankus S.V. Caloric properties of $Cs_{60}Bi_{40}$ alloy in the temperature range of 293-1125 K // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677. – Art. No. 012165.

10. Агажанов А. Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Теплофизические свойства эвтектического сплава К-Рв в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, №. 4. – С. 655-658.
11. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С., Хайрулин А.Р. Калорические свойства сплава RbBi₂ в конденсированном состоянии // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, №. 6. – Р. 958–960.
12. Stankus S.V., Savchenko I.V., Khairulin A.R., Yatsuk O.S. Enthalpy and heat capacity of Cs_{72.9}Bi_{27.1} alloy with a partly ionic character of interatomic interaction in the condensed state // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1382. – Art. No. 012190.

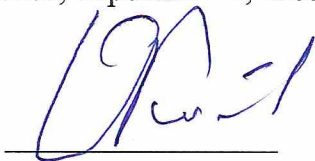
Апробация работы

Результаты работы докладывались на 58-ой, 59-ой Международных научных студенческих конференциях (Новосибирск, 2020, 2021); XXXV, XXXVI, XXXVIII, XL Всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2019, 2020, 2022, 2024); V Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых учёных «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2020); XVI Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020); XIII, XV Симпозиуме с международным участием «Термодинамика и материаловедение» (Новосибирск, 2020, 2023); XVI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16) (Махачкала, 2023).

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом» Хайрулина Андрея Рашидовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято 02.06.2026 г. на совместном заседании секций 3 и 4 Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством чл.-корр. РАН Кабова О.А. Присутствовало на заседании 27 чел., в том числе 1 чл.-корр. РАН, 13 докторов и 13 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 27 человек, «против» - 0, «воздерж.» - 0, протокол № 9-2026 от «02» июня 2026 г.



Председатель семинара
чл.-корр. РАН, г.н.с. ИТ СО РАН
Кабов Олег Александрович



Секретарь семинара
к.ф.-м., зав. лаб. 3.3 ИТ СО РАН
Абдуллаев Расул Нажмутдинович