

«Утверждаю»

Директор ОИВТ РАН

академик РАН О. Ф. Петров



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) на диссертацию Хайрулина Андрея Рашидовича «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность диссертационной работы. Жидкие сплавы бинарных систем щелочных металлов со свинцом и висмутом относятся к достаточно редкому классу так называемых ионно-металлических расплавов. В таких расплавах из-за значительной разницы в электроотрицательности компонентов наряду с металлическим типом межатомного взаимодействия в значительной степени проявляется и ионная связь, что приводит к нетипичному для металлических жидкостей поведению различных свойств, чувствительных к изменению структуры. Основное практическое применение таких систем аналогично примеру некоторых сплавов натрия и калия со свинцом, которые рассматриваются в качестве теплоносителей для ядерных реакторов на быстрых нейтронах нового поколения. В термоядерной энергетике одними из основных кандидатов для применения в качестве материала blankets являются чистый литий и сплавы системы литий—свинец. Имеющиеся в литературе данные по энтальпии и теплоемкости расплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом разрозненны. В ряде работ использовались экспериментальные методики, обладающие сравнительно низкой точностью. Все это затрудняет развитие теоретических представлений об ионно-металлических расплавах и осложняет практическое применение таких систем.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и трех приложений,

содержит 144 страницы текста, включая 72 рисунка и 58 таблиц. Список литературы содержит 136 наименований.

Во **введении** диссертации изложена актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, перечислены полученные результаты, указана их степень новизны, а также научная и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору имеющихся в литературе представлений о структуре жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом, а также наиболее значимых экспериментальных данных по теплофизическим и электрофизическим свойствам жидких сплавов рассматриваемых систем. Автором было показано, что имеющиеся в литературе данные по энтальпии и теплоемкости расплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом достаточно фрагментарны. Кроме того, в ряде работ использовались экспериментальные методики, обладающие сравнительно низкой точностью измерений. Это подтверждает актуальность проведенного исследования, результаты которого изложены в диссертационной работе.

Вторая глава посвящена теоретическим основам и методике проведения экспериментов, описанию экспериментальной установки, описанию процедур приготовления образцов, проведения экспериментов и обработки данных, оценке неопределенности измерений и верификации используемой установки и методики. Экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе, были выполнены методом массивного изопериболического калориметра. Расширенная неопределенность получаемых данных с коэффициентом охвата равным 2 составляет 0.3—0.5 % по энтальпии и 1—2 % по теплоемкости.

В **третьей главе** изложены результаты экспериментальных исследований калорических свойств жидких сплавов Li—Pb, Na—Pb, K—Pb, Cs—Pb, Rb—Bi и Cs—Bi, а также чистых Li и Pb. Для Li, Pb и ряда сплавов также приведены данные, полученные в твердом состоянии. Приведены значения температур фазовых переходов, полученные в ходе проведения термического анализа, а также теплоты фазовых переходов. Результаты обработки экспериментальных данных для исследованных сплавов представлены в виде таблиц, что упрощает их дальнейшее использование.

Четвертая глава посвящена построению и анализу температурных и концентрационных зависимостей калорических свойств исследованных жидких сплавов с целью выявления закономерностей в их поведении, связанных с предполагаемыми структурными особенностями. Для чистых металлов и ряда сплавов произведено сопоставление полученных результатов с имеющимися в литературе данными. Показано хорошее согласие с

результатами ряда работ. Для всех жидких сплавов проведено сопоставление теплоемкости с результатами расчетов по закону идеального раствора. Для ряда сплавов исследованных систем уточнены значения температуры ликвидуса, показаны неточности в имеющихся фазовых диаграммах. Автором было установлено, что у всех исследованных жидких сплавов наблюдается превышение теплоемкости над значениями, рассчитанными по правилу аддитивности для идеального раствора соответствующего состава. У некоторых расплавов отличие теплоемкости от аддитивной величины незначительно, в то время как у других расплавов теплоемкость превышает аддитивное значение более чем в 2 раза. Максимальные отклонения наблюдаются при температуре ликвидуса, с ростом температуры они уменьшаются, в качестве возможной причины чего диссертант указывает постепенное уменьшение вклада ионной составляющей в теплоемкость расплавов.

В **заключении** сформулированы наиболее важные результаты диссертационной работы.

В **приложениях** к диссертации приведены таблицы первичных экспериментальных данных по инкременту энтальпии исследованных металлов и сплавов, таблицы с результатами термического анализа, а также список основных публикаций автора по теме диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы связана с получением новых экспериментальных данных по калорическим свойствам ионно-металлических расплавов. В числе основных можно выделить следующие результаты.

1. Получены новые экспериментальные данные по энтальпии и теплоемкости сплавов Li—Pb, Na—Pb, K—Pb, Cs—Pb, Rb—Bi и Cs—Bi в интервале температур от ликвидуса до 1025—1175 К. Для ряда сплавов также получены данные для твердого состояния и определены изменения калорических характеристик при структурных переходах и плавлении. Значительная часть данных была получена впервые, 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 и 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 Na—Pb и K—Pb подтверждено наличие максимумов на концентрационных зависимостях теплоемкости изученных жидких систем. Показано, что полученные результаты согласуются с современными представлениями о структуре ионно-металлических расплавов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведенные в работе анализ и обобщение собственных и литературных данных по калорическим свойствам сплавов Li—Pb, Na—Pb, K—Pb, Cs—Pb, Rb—Bi и Cs—Bi, построенные температурные и концентрационные зависимости исследованных свойств, обнаруженные особенности в их поведении и установленные между ними корреляции являются основой для развития теоретических представлений об ионно-металлических расплавах.

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 рассматриваемых 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.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надежной и апробированной экспериментальной установки, высокоточных измерительных приборов, чистотой исследуемых расплавов, процедурой подготовки образцов, детальным анализом погрешностей измерений, поверкой калориметра и методики на эталонном материале, воспроизводимостью экспериментальных результатов и их согласием с литературными данными.

При изучении рукописи диссертации и обсуждении доклада автора, по диссертационной работе возникли следующие **замечания**.

1. Для системы Rb—Bi в работе исследован сплав одного состава, тогда как для системы Na—Pb исследованы сплавы шести различных составов. Остается непонятным, чем обусловлен выбор количества исследуемых сплавов для каждой системы, а также выбор соотношения компонентов этих сплавов.

2. Воспроизводимость параметров состояния исследуемого образца в конце каждого калориметрического опыта является необходимым условием для надежности получае-

мых данных. Требуется пояснение, контролировалось ли как-либо это условие во время экспериментов, результаты которых представлены в диссертации.

3. Погрешность получаемых данных по энтальпии и теплоемкости представлена в численном виде в соответствующих таблицах. Для удобства читателя погрешности измеряемых величин желательно также показывать и на соответствующих графиках.

Отмеченные замечания, которые в основном связаны с интерпретацией полученных результатов, не снижают научной и практической ценности рассматриваемой работы и не влияют существенным образом на ее общую положительную оценку. Диссертантом представлено серьезное и комплексное научное исследование с широким перечнем новых интересных и практически значимых научных результатов. Выводы и основные положения диссертации представляются обоснованными. Результаты диссертационной работы Хайрулина А.Р. могут быть рекомендованы к использованию в организациях атомной отрасли, занимающихся разработкой перспективных жидкометаллических теплоносителей для ядерной и термоядерной энергетики.

Результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, в том числе в 12 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Работа докладывалась на 14 научных конференциях. Рукописи диссертации и автореферата в целом хорошо оформлены, материал изложен достаточно ясно и четко.

Заключение. Таким образом, диссертация Хайрулина Андрея Рашидовича «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом» является законченной научно-квалификационной работой. В ней содержится решение задачи получения новых прецизионных экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости твердых и жидких сплавов систем щелочных металлов со свинцом и висмутом при вариации температуры и концентрации компонентов, что имеет существенное значение для развития теплофизики и атомной энергетики. По актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов диссертация полностью соответствует требованиям п. 9—14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника (отрасль науки — физико-математические) в части пунктов 1 и 2 направлений исследований. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Личный вклад Хайрулина А.Р. не вызывает сомнений.

Автор диссертации, Хайрулин Андрей Рашидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном заседании научного семинара ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова 26 августа 2026 г.

Отзыв составил

Зав. лаб. 16 ОИВТ РАН, к. ф.-м. н.



Хищенко Константин Владимирович

27 августа 2026 г.

Подпись Хищенко Константина Владимировича удостоверяю.

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д. ф.-м. н.



Киверин Алексей Дмитриевич

27 августа 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; <https://jiht.ru/>; тел. (495)484-24-83, e-mail: konst@ihed.ras.ru