

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу 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

Диссертационная работа Хайрулина А.Р. «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом» посвящена получению новых экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости ряда сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом в широких интервалах температур и концентраций.

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена тем, что жидкие сплавы щелочных металлов со свинцом и висмутом относятся к редкому классу ионно-металлических расплавов. Согласно существующим представлениям, в данных расплавах наряду с металлическим типом связи существует и ионная связь, что приводит к нетипичному для жидкометаллических систем поведению различных теплофизических и электрофизических свойств. Практический интерес к исследованию данных систем (в частности, сплавов литий–свинец, натрий–свинец и калий–свинец) связан, в первую очередь, с перспективами их применения в ядерной и термоядерной энергетике. К сожалению, в настоящий момент достоверные данные по калорическим свойствам жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом практически отсутствуют, что, безусловно, затрудняет развитие теории ионно-металлических расплавов и осложняет их практическое применение. Таким образом, экспериментальные исследования калорических свойств жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом в широких интервалах концентраций и температур важны как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Структура и содержание диссертации

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** обоснована актуальность темы проводимых исследований, сформулирована цель и задачи исследования, обоснована новизна, научная и практическая ценность данной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** проведен обзор 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. Показан недостаток имеющейся в литературе надежной и систематизированной экспериментальной информации по энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом, что подтверждает актуальность проведенного исследования.

Вторая глава посвящена теоретическим основам метода, методике проведения экспериментов, описанию экспериментальной установки, описанию процедур приготовления образцов, проведения экспериментов и обработки данных, оценке неопределенности измерений и верификации используемой установки и методики. Измерения энтальпии и теплоемкости были выполнены с использованием массивного изопериболического калориметра спроектированного и созданного в ИТ СО РАН. Расширенная неопределенность (коэффициент охвата равен 2) получаемых на данной установке данных составляет 0,3...0,5 % по энтальпии и 1...2 % по теплоемкости, что, безусловно, является высокой точностью.

В Третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований калорических свойств жидких сплавов Li–Pb, Na–Pb, K–Pb, Cs–Pb, Rb–Bi, Cs–Bi, а также чистых Li и Pb. Для Li, Pb и ряда сплавов также приведены данные, полученные в твердом состоянии. Определены температуры фазовых переходов, полученные в ходе проведения термического анализа, а также теплоты фазовых переходов. Первичные данные по инкременту молярной энтальпии аппроксимировались степенными полиномами от температуры. Теплоемкость рассчитывалась путем аналитического дифференцирования температурной зависимости энтальпии. Результаты обработки экспериментальных данных (коэффициенты полиномов сглаживающих температурных зависимостей) вместе с оценкой их погрешностей приводятся в табличном виде.

Четвертая глава посвящена построению и анализу температурных и концентрационных зависимостей калорических свойств исследованных жидких сплавов с целью выявления особенностей в их поведении, связанных с предполагаемыми структурными особенностями ионно-металлических расплавов. Для чистых металлов и ряда сплавов проведено сопоставление полученных результатов с имеющимися в литературе данными. Установлено, что практически у всех исследованных жидких сплавов наблюдается превышение теплоемкости над значениями, рассчитанными по правилу аддитивности для идеального раствора соответствующего состава. На концентрационных зависимостях теплоемкости исследованных систем имеются выраженные максимумы при определенных концентрациях. Для жидких систем Rb–Bi и Cs–Bi были построены концентрационные зависимости энтальпии смешения, имеющие глубокий минимум, что свидетельствует о сильной межатомной связи.

В заключении обобщены результаты исследования. Сформулированы основные результаты работы.

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

Научная новизна диссертационной работы

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 получена впервые.
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 Na–Pb и K–Pb подтверждено наличие максимумов на концентрационных зависимостях теплоемкости данных жидких систем. Показано согласование полученных результатов 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, Cs–Bi, построенные температурные и концентрационные зависимости исследованных свойств, обнаруженные

особенности в их поведении и установленные между ними корреляции 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.

Степень достоверности 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, поверкой калориметра и методики на эталонном материале, воспроизводимостью результатов экспериментов, а также их сопоставлением с литературными данными.

При изучении диссертации возникли следующие **вопросы и замечания**:

1. В первой главе автор анализирует температурные зависимости электросопротивления жидких сплавов ЦМ-Pb и ЦМ-Bi по значениям температурного коэффициента сопротивления (ТКС), но сами зависимости в тексте диссертации не приведены. Это же относится к данным по плотности (молярному объему) и теплопроводности – нет политейм свойств.

2. Из текста диссертации неясно, как контролировалась гомогенность изучаемых образцов и их возможное взаимодействие с материалом ампул.

3. Большинство экспериментальных политейм энтальпии сплавов ЦМ-Pb и ЦМ-Bi в жидком состоянии линейны, но есть и сильно нелинейные зависимости (Рис. 3.17, 3.19). Чем это обусловлено?

4. В четвертой главе автор на основе детального анализа своих и литературных данных приводит типичные концентрационные зависимости теплофизических свойств изученных расплавов и делает вывод о том, что предлагаемые в литературе модели структуры ионно-металлических расплавов являются слишком упрощенными и требуют дальнейшего уточнения и развития. При этом своего объяснения (пусть даже качественного) полученных результатов автор не приводит.

5. К сожалению, работа не свободна от некоторого технического брака – в ряде предложений (глава 4) слова не согласуются друг с другом и пропущены предлоги. Хотя в целом диссертация и автореферат написаны на хорошем русском языке.

Отмеченные замечания, которые в основном связаны с представлением полученных результатов, не снижают научной и практической ценности данной работы и не влияют существенным образом на ее в целом общую положительную оценку. Диссертантом представлено серьезное научное исследование с широким перечнем новых интересных и практически значимых научных результатов. Выводы и основные положения диссертации, содержащиеся в Заключение, являются обоснованными.

Автореферат верно отражает содержание, основные положения и выводы диссертационной работы. Результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, в

том числе в 12 статьях в журналах из перечня ВАК. Работа докладывалась на 14 отечественных и международных конференциях.

Диссертация Хайрулина А.Р. имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержатся решения важных задач, вносящих вклад в развитие теплофизики и теоретической теплотехники. В целом, по объему и научному уровню, актуальности и новизне полученных результатов, их научной и практической ценности, диссертационная работа Хайрулина А.Р. «Экспериментальное исследование энтальпии и теплоемкости жидких сплавов щелочных металлов со свинцом и висмутом» соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника (отрасль науки – физико-математические) (пункты 1 и 2 направления исследований). Считаю, что автор диссертации, Хайрулин Андрей Рашидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Я, Сидоров Валерий Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Хайрулина Андрей Рашидовича, и их дальнейшую обработку.

Ф.И.О.: Сидоров Валерий Евгеньевич

Ученая степень, ученое звание: Доктор физико-математических наук, профессор

Шифр специальности, по которой защищена диссертация: 01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика

Полное наименование организации места работы, должность: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный педагогический университет» (ФГАОУ ВО «УрГПУ»), директор научно-образовательного центра «Расплав»

Почтовый адрес: 620091, Свердловская область, г. Екатеринбург, проспект Космонавтов, д. 26, ФГАОУ ВО «УрГПУ»

Телефон: +7 (343) 371-03-77

E-mail: sidorov@uspu.ru

Официальный оппонент:

Сидоров Валерий Евгеньевич

доктор физико-математических наук, профессор,
директор НОЦ «Расплав» УрГПУ



Отзыв подписан 25 августа 2026 г.



Подпись Сидорова В.Е.
Подтверждаю.

Заместитель отдела кадров
Сидорова
25.08.2026