

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Канаметовой Оксаны Хусеновны «Поверхностные свойства околоэвтектических расплавов систем висмут-литий, олово-литий и олово-натрий», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность работы. Диссертация Канаметовой О.Х. посвящена экспериментальному изучению поверхностного натяжения и смачиваемости бинарных металлических расплавов Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na, которые рассматриваются в качестве перспективных теплоносителей для ядерных и термоядерных установок нового поколения. В настоящее время активно ведутся работы по обоснованию реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым и свинцово-висмутовым охлаждением, а также по созданию гибридных и термоядерных источников энергии, где ключевая роль отводится жидкометаллическим blankets. В этом контексте расплавы на основе олова и висмута, легированные литием или натрием, привлекают внимание благодаря удачному сочетанию теплофизических, нейтронно-физических и коррозионных характеристик. Однако практическое использование этих материалов сдерживается нехваткой достоверных экспериментальных данных об их поверхностных свойствах. Без надежных значений поверхностного натяжения и краевых углов смачивания невозможно корректное проектирование контуров с жидким металлом, прогнозирование коррозионной стойкости конструкционных сталей, оценка гидродинамических сопротивлений и эффективности теплопереноса в активной зоне и теплообменном оборудовании. Особенно остро эта проблема стоит для околоэвтектических составов, где свойства расплавов могут немонотонно зависеть от концентрации компонентов, а имеющиеся в литературе данные единичны, разрозненны и зачастую противоречивы. В

связи с этим тема диссертации безусловно актуальна как в фундаментальном аспекте (расширение представлений о межфазных явлениях в системах со щелочными металлами), так и в прикладном (создание базы данных для инженерных расчетов и выбора материалов). Автором проделан большой объем прецизионных измерений с использованием высокочистых металлов и модернизированной вакуумной установки, применено оригинальное программное обеспечение, получены новые, ранее отсутствовавшие в литературе результаты, которые существенно восполняют существующие пробелы.

Цель и основные задачи исследования. Основной целью работы являлось экспериментальное определение поверхностного натяжения расплавов систем Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na вблизи эвтектических точек, а также краевых углов смачивания поверхностей конструкционных реакторных сталей.

Для достижения цели были поставлены задачи: модернизация экспериментальных установок с автоматизацией измерений; получение температурных и концентрационных зависимостей поверхностного натяжения для указанных систем; исследование влияния газовой среды (вакуум, азот, воздух) на поверхностное натяжение; расчет адсорбционных параметров и предельной поверхностной активности лития и натрия; экспериментальное определение температурных порогов смачивания сталей 12X18H9T и 12X18H10T жидкими оловом, сплавами Pb-Bi и Sn-Li.

Структура и содержание работы. Диссертация изложена на 176 страницах, содержит 48 рисунков и 10 таблиц, список литературы включает 304 наименования. Построение работы подчинено логике «от общего к частному», т.е. от анализа известных данных – к разработке методики, затем к экспериментальной реализации и, наконец, к теоретической интерпретации.

Первая глава носит обзорный характер. Автор критически анализирует накопленные к настоящему времени сведения о поверхностном натяжении

чистых металлов (Ga, Pb, Bi, Sn, Na, Li) и их бинарных сплавов (Pb-Bi, Bi-Li, Sn-Na, Sn-Li). Главный вывод обзора – это недостаточность данных для литий- и натрийсодержащих систем, особенно в области околоэвтектических составов. Это и определило конкретные задачи исследования.

Вторая глава полностью посвящена методическому обеспечению. Здесь подробно описана модернизированная установка метода «большой» капли, оригинальное программное обеспечение «SigmaDrop», а также авторская методика учета влияния механических колебаний капли на точность измерений. Особое внимание уделено методикам приготовления и сверхвысоковакуумной очистки литиевых и натриевых сплавов, поскольку от этого напрямую зависит достоверность получаемых экспериментальных данных.

Третья глава является центральной главой в работе, содержит основные экспериментальные результаты. Впервые получены политермы и изотермы поверхностного натяжения для 16 сплавов Bi-Li (0-10,46 ат.% Li), 7 сплавов Sn-Li (7,5-15 ат.% Li) и 19 сплавов Sn-Na (0,06-5,00 ат.% Na). Кроме того, исследовано влияние газовой атмосферы на поверхностное натяжение эвтектики Pb-Bi. В этой же главе приведены экспериментально определенные пороговые температуры смачивания для систем Sn – сталь 12X18H9T ($T=870$ К) и для сплава Sn+15 ат.% Li – та же сталь ($T=1050$ К).

В четвертой главе на основе полученных изотерм выполнен расчет адсорбции компонентов по методу Гугтенгейма-Адама, определены значения предельной поверхностной активности натрия и лития. Также проведены оценки критических температур щелочных металлов и эвтектических расплавов Pb-Li и Na-K.

Научная новизна работы определяется совокупностью результатов, полученных впервые:

- восполнен существенный пробел в экспериментальных данных о поверхностном натяжении бинарных систем Bi-Li (16 составов), Sn-Li (7 составов) и Sn-Na (19 составов). Исследованы концентрационные и

температурные зависимости в диапазонах, включающих околоэвтектические области, что ранее не выполнялось систематически;

- разработан и внедрен автоматизированный экспериментальный комплекс (модернизированная установка + ПО «SigmaDrop»), который не только повышает точность измерений поверхностного натяжения, но и позволяет впервые количественно оценить влияние механических вибраций капли на погрешность эксперимента;
- установлены пороговые температуры смачивания для двух практически важных пар: жидкое олово – сталь 12X18H9T ($T=870$ К) и сплав Sn+15 ат.% Li – та же сталь ($T=1050$ К). Эти данные непосредственно востребованы при выборе температурных режимов эксплуатации термоядерных реакторов;
- впервые для систем Bi-Li и Sn-Na рассчитаны адсорбционные характеристики компонентов, обнаружены экстремумы на изотермах адсорбции (максимум при $\sim 0,8$ ат.% Li и минимум при ~ 4 ат.% Li для Bi-Li; максимум при $\sim 1,5$ ат.% Na для Sn-Na). Определены значения предельной поверхностной активности лития и натрия;
- на основе уточненных политерм поверхностного натяжения выполнены оценки критических температур щелочных металлов и эвтектических сплавов Pb-Li и Na-K, которые хорошо согласуются с наиболее надежными литературными данными.

Достоверность результатов обеспечена использованием высокочистых металлов (Bi 0000, Sn ОВЧ-000, Li ЛЭ-1 с дополнительной вакуумной перегонкой), применением модернизированной вакуумной установки (остаточное давление $\sim 10^{-4}$ – 10^{-6} Па), автоматизированной обработкой изображений с алгоритмом Кэнни, согласием полученных значений поверхностного натяжения чистых металлов с наиболее надежными литературными данными (погрешность $\pm 2\%$), а также воспроизводимостью результатов.

Замечания по диссертационной работе. Несмотря на бесспорные достоинства работы, при ее рецензировании возникли следующие вопросы и

замечания к соискателю:

1) в работе недостаточно подробно описаны условия проведения экспериментов. Необходимо уточнить следующие аспекты:

- способ размещения капли металла на подложку;
- были ли температуры капли и подложки идентичны перед контактом;
- проводился ли эксперимент с одной и той же каплей во всём температурном интервале либо для каждой температуры на подложку помещалась новая капля.

Если измерения выполнялись с одной каплей, следует конкретизировать температурный режим проведения эксперимента: осуществлялось ли термостатирование подложки при фиксированной температуре либо нагрев печи производился непрерывно с постоянной скоростью (в таком случае необходимо указать её значение);

2) в параграфе 3.2 приведены равновесные значения краевых углов смачивания для систем Sn – сталь и Sn-Li – сталь. Однако процессы смачивания часто имеют кинетический характер, особенно в присутствии оксидных пленок. Исследовалась ли зависимость угла смачивания от времени выдержки при фиксированной температуре? Как долго достигалось равновесное состояние?

3) отсутствуют данные для тройных систем. Во введении и в первой главе отмечается перспективность тройных эвтектик (например, Pb-Bi-Li или Sn-Li-Na), однако экспериментальная часть работы ограничена двойными системами. Планируется ли распространение разработанной методики на тройные расплавы? Если нет, то чем обоснован выбор именно двойных систем как наиболее информативных для решения поставленных задач?

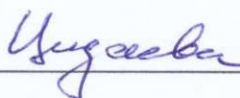
4) какие изменения в термограммах краевых углов смачивания будут наблюдаться при контакте исследованных сталей с жидкометаллическими теплоносителями в зависимости от состояния поверхности (например, при наличии шероховатостей или пористости, окисных пленок, смачивания поверхности в атмосфере инертного газа)?

Заключение. Диссертационная работа Канаметовой Оксаны Хусеновны является завершенным научно-квалификационным исследованием, выполненным на актуальную тему. В ней получены новые экспериментальные данные о поверхностном натяжении и смачиваемости перспективных жидкометаллических систем Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na, имеющие фундаментальное и прикладное значение для теплофизики и ядерной энергетики. Разработанный автором автоматизированный экспериментальный комплекс может быть использован в других научных центрах. Автореферат диссертации и опубликованные работы (16 статей в журналах из перечня ВАК, 5 публикаций в МБД) полностью отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа «Поверхностные свойства околоэвтектических расплавов систем висмут-литий, олово-литий, олово-натрий» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Канаметова Оксана Хусеновна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

Цидаева Наталья Ильинична



кандидат физико-математических наук, доцент,

директор научного центра «Магнитные наноструктуры» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Шифр и наименование специальности, по которой официальный оппонент защитил кандидатскую диссертацию, 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Адрес: 362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. Тел.: +7 (918) 825-67-55. E-mail: tsidaevan@mail.ru

Подпись Цидаевой Н. И. удостоверено

Ученый секретарь ученого совета



С.Б. Беликова

12 мая 2026 г.