


УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук
к.ф.-м.н.




Д.Ф. Сиковский
« 30 » апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук 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

Диссертационная работа Канаметовой О.Х. направлена на решение следующих задач.

Разработка и модернизация экспериментальных методик и установок для измерения коэффициентов поверхностного натяжения жидких металлов и сплавов и исследования смачиваемости твердых поверхностей расплавами.

Изучение закономерностей изменения поверхностного натяжения в зависимости от температуры и состава для жидких сплавов Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na.

Оценка влияния газовой среды (атмосферный воздух и азот) на поверхностное натяжение жидких галлия и эвтектического сплава Bi-Pb.

Исследование и анализ адсорбционных закономерностей в расплавах на основе Bi, Sn и щелочных металлов (Li, Na), включая расчет предельной поверхностной активности и концентрации Li/Na в поверхностном слое систем Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na.

Экспериментальное исследование процессов смачивания поверхностей нержавеющей стали жидким оловом и сплавами систем Pb-Bi и Sn-Li в широком температурном интервале (от 473 К до 1550 К).

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы из 304 наименований. Общий объем работы составляет 176 страниц, включая 48 рисунков и 10 таблиц.

Во *введении* обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой критический анализ литературных данных по поверхностным свойствам чистых металлов (Ga, Pb, Bi, Sn, Na, Li) и исследуемых в работе бинарных систем, а также по смачиваемости конструкционных сталей жидкими металлами. Автор показала наличие пробелов и противоречий в существующих данных, что служит обоснованием для постановки задач собственного диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик установок для изучения поверхностных свойств расплавов. Приведено детальное описание модернизированной автоматизированной установки на основе метода «большой» капли и оригинального программного комплекса «SigmaDrop». Важным вкладом автора является разработка методики учета влияния механических колебаний капли на точность измерений поверхностного натяжения и создание специализированной измерительной ячейки. Подробно описаны методики очистки высокоактивных сплавов лития и натрия, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость получаемых данных.

Третья глава описывает основные экспериментальные результаты. Впервые систематически исследованы концентрационные и температурные зависимости поверхностного натяжения для 16-ти сплавов Bi-Li, 7-ми сплавов Sn-Li и 19-ти сплавов Sn-Na в широких диапазонах составов и температур. Установлены особенности влияния добавок щелочных металлов на поверхностное натяжение. В частности, показано, что натрий проявляет высокую поверхностную активность в олове (снижение поверхностного натяжения на 15% при добавлении 1 ат.% Na), тогда как литий в висмуте ведет себя как умеренно поверхностно-активный элемент. Исследована температурная динамика краевых углов смачивания и впервые обнаружены пороговые температуры смачивания для систем «расплав Sn – сталь 12X18H9T» и «расплав Sn+15 ат.% Li – сталь 12X18H9T», характеризующиеся резким падением краевого угла, что связывается с активацией процессов взаимного растворения компонентов.

В *четвертой главе* проведены обобщение и анализ полученных экспериментальных результатов. С использованием *N*-варианта уравнений Гуггенгейма-Адама рассчитаны адсорбция и предельная поверхностная активность лития и натрия в исследованных

системах. Количественно оценено обогащение поверхностного слоя щелочным металлом. Также выполнены оценки критических температур щелочных металлов и эвтектических сплавов Pb-Li и Na-K на основе данных о температурной зависимости поверхностного натяжения, которые хорошо согласуются с имеющимися литературными данными.

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

Актуальность диссертационной работы

Актуальность темы работы обусловлена разработкой ряда проектов ядерных и термоядерных энергетических установок нового поколения, в которых в качестве теплоносителей и тритийвоспроизводящих материалов рассматриваются расплавы на основе легкоплавких металлов (висмут, олово, свинец) с добавками щелочных металлов (литий, натрий). Кроме того, некоторые из этих сплавов предлагаются в качестве жидкометаллических электродов для перспективных термоэлектрических генераторов. Как показано в литературном обзоре диссертации, несмотря на высокий интерес к жидким системам Bi-Li, Sn-Li и Sn-Na, экспериментальные данные по их поверхностному натяжению и смачивающей способности по отношению к конструкционным материалам крайне фрагментарны, противоречивы, а для ряда составов отсутствуют вовсе. Это связано, прежде всего, с высокой химической активностью компонентов и сложностью проведения прецизионных измерений в агрессивных средах и при высоких температурах.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертации не вызывает сомнений. В частности, в работе:

- впервые экспериментально получены надежные и систематические данные по температурной и концентрационной зависимости поверхностного натяжения для жидких сплавов Bi-Li (до 10,46 ат. % Li) и Sn-Li (7,5-15 ат. % Li), а также для высокочистых сплавов Sn-Na (0,06-5,00 ат.% Na) в условиях высокого вакуума.
- обнаружены и интерпретированы особенности концентрационных зависимостей поверхностного натяжения – слабовыраженный минимум на изотерме Bi-Li при ~4 ат. % Li и высокая поверхностная активность натрия в олове с максимумом адсорбции при ~1,5 ат.% Na.
- впервые установлены пороговые температуры смачивания для систем «расплав Sn – сталь 12X18H9T» и «расплав Sn+15 ат.% Li – сталь 12X18H9T».
- количественно оценены адсорбционные параметры и предельная поверхностная активность Li и Na, а также рассчитана структура поверхностного слоя исследованных бинарных расплавов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии представлений о межфазных явлениях в жидкометаллических системах с участием щелочных металлов. Новые, надежные и систематизированные экспериментальные результаты расширяют существующие базы данных по теплофизическим свойствам веществ и материалов и могут служить основой для верификации теоретических моделей и методов прогнозирования поверхностных свойств многокомпонентных расплавов.

Практическая значимость работы также не вызывает сомнений. Полученные экспериментальные данные о поверхностном натяжении и краевых углах смачивания могут быть непосредственно использованы при проектировании жидкометаллических контуров ядерных и термоядерных реакторов, выборе оптимальных составов теплоносителей и режимов эксплуатации, а также для прогнозирования коррозионного взаимодействия и смачиваемости конструкционных материалов. Разработанные и модернизированные экспериментальные установки, а также программное обеспечение «SigmaDrop» внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую работу. Созданная методология учета вибрационных помех повышает достоверность измерений в целом и может быть использована в других научных лабораториях.

Личный вклад автора

Постановка целей и задач диссертационной работы были осуществлены совместно д.ф.-м.н., профессором Алчагировым Б.Б. и д.ф.-м.н. Шебзуховой М.А. В дальнейшем задачи были уточнены и дополнены научным руководителем, д.ф.-м.н. Шебзуховой М.А., с которой автором также проводилось обсуждение промежуточных и итоговых экспериментальных данных. Диссертация написана автором лично. Автор внесла определяющий вклад в модернизацию экспериментальных методик и установок. Экспериментальные исследования выполнены автором, при содействии магистрантов и сотрудников лаборатории «Физика межфазных явлений в расплавах» КБГУ. Обработка и обобщение полученных результатов, а также проведенные на их основе расчеты адсорбции и предельной поверхностной активности лития и натрия в исследованных системах проведены автором лично.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных соискателем результатов, обоснованность положений, выносимых на защиту, и сформулированных выводов работы обеспечивается

использованием современных, хорошо зарекомендовавших себя методов исследования, применением высокочистых исходных материалов, тщательной обработкой методик подготовки образцов и проведения экспериментов в контролируемых условиях глубокого вакуума, метрологической аттестацией оборудования, а также сопоставлением полученных данных для чистых металлов с надежными литературными источниками, которое показало их хорошее согласие. Применение автоматизированной обработки данных и современных методов численного анализа позволило минимизировать погрешности (2% для поверхностного натяжения и 1,5% для краевого угла смачивания).

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

1. В диссертации уделено достаточно внимания описанию экспериментальных установок, однако отсутствует важная информация о том, как готовились образцы исследованных сплавов, как (и с какой погрешностью) определялось содержание компонентов в них. Непонятно, использовался ли экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 2.5 в рукописи, только для изучения смачиваемости твердых поверхностей расплавами, или также для измерения коэффициентов поверхностного натяжения расплавов.
2. Автор приводит в работе оценки погрешностей измерений (2 % для поверхностного натяжения, 1,5 % для краевого угла смачивания), однако фактически эти цифры никак не обоснованы. В работе нет никаких сведений, с какой точностью определялись координаты профиля капли, хотя очевидно, что именно это вносит основной вклад в погрешность получаемых данных. В тексте диссертации указано, что точность измерения температуры термопарой ХА составляет $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ и нет сведений об индивидуальной калибровке термопары. Однако, согласно ГОСТ Р 8.585-2001 пределы допускаемой погрешности определения температуры термопарами ХА достигают $2,5^{\circ}\text{C}$. Кроме того, как видно из рис. 2.5, термопара расположена достаточно далеко от капли, а в работе нет сведений о возможных перепадах температур в рабочей зоне установки.
3. В разделе 3.2, посвященном результатам изучения смачивания расплавами автор приводит т.н. «температурные зависимости краевого угла смачивания». Однако процесс растекания капли очевидно зависит не только от температуры, но и от времени (особенно вблизи т.н. пороговой температуры смачивания). Кроме того, этот процесс является необратимым. Особенно наглядно это видно из рисунка 3.13, где,

как видно, краевой угол практически при постоянной температуре уменьшается за несколько минут с $\sim 90^\circ$ до $\sim 0^\circ$. Поэтому графики температурных зависимостей краевого угла смачивания, приведенные на рис. 3.14, 3.15, 3.17 (особенно выше 800-900 К) без данных о скорости нагрева капли могут только ввести в заблуждение читателя.

4. В разделе 2.3 диссертации описана методика учета колебаний большой капли с целью повышения точности измерения поверхностного натяжения. При этом на рис. 2.9 приведены графики «изменений поверхностного натяжения при небольших нарушениях механического равновесия большой капли». Очевидно, что реальный коэффициент поверхностного натяжения не зависит от того, неподвижна капля, или колеблется. Необходимо было отметить, что измеренный коэффициент ПН отличается от реального, потому что в момент фиксации форма капли из-за ее колебаний отличается от равновесной.
5. На рис. 1.3 в диссертации, где представлены результаты измерений поверхностного натяжения жидкого висмута за последние 100 лет, не указано, что отложено по оси X графика. Если это (предположительно) количество опубликованных работ нарастающим итогом, то непонятно, в чем смысл аппроксимации литературных данных линейной зависимостью.
6. В подписях к некоторым рисункам в диссертации (например, рис. 1.6, 1.7, 1.8), где приведены литературные данные, не указаны ссылки на источники.
7. На странице 115 диссертации есть фраза «...ПТС (пороговая температура смачивания) системы «сталь 12X18H9T – жидкое олово» (~ 870 К) совпадает с температурой начала взаимной растворимости олова и легирующих элементов [140, 255, 256] (рис. 3.18) ...». Однако, на рис. 3.18 приведены литературные по растворимости компонентов стали 12X18H9T в литии. Такая же ошибка имеется и в автореферате.
8. Автор называет стали марок 12X18H9T и 12X18H10T реакторными сталями. Однако реакторными общепринято называть стали, из которых изготовлены части реактора, находящиеся в активной зоне и (или) непосредственно контактирующие с теплоносителем при высоких температурах. Стали 12X18H9T и 12X18H10T к таковым не относятся.

Отмеченные замечания, которые в основном связаны с интерпретацией полученных результатов и оформлением диссертации, не снижают научной и практической ценности

данной 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 являются в целом обоснованными. Результаты диссертационной работы Канаметовой О.Х. могут быть рекомендованы к использованию в научных и учебных учреждениях, проводящих исследования в области теплофизики, физико-химии поверхности и жидкометаллических технологий, таких как ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», АО «Государственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского», НИЯУ МИФИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также в других организациях, занимающихся разработкой перспективных теплоносителей для ядерной энергетики.

В автореферате верно отражены основные положения и выводы диссертационной работы. Результаты диссертации опубликованы в 32 научных работах, в том числе в 16 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 5 публикациях в международных индексируемых базах данных (Scopus/Web of Science). Работа докладывалась на большом числе отечественных и международных конференций. Рукописи диссертации и автореферата в целом хорошо оформлены, материал изложен достаточно ясно и четко.

Заключение: Диссертация Канаметовой Оксаны Хусеновны «Поверхностные свойства околоэвтектических расплавов систем висмут-литий, олово-литий, олово-натрий» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи – экспериментального определения поверхностных свойств перспективных жидкометаллических расплавов, имеющей 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 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника (пункты 1 и 2 области исследований). Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Автор диссертации, Канаметова Оксана Хусеновна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Канаметовой О.Х. и отзыв на нее были рассмотрены и утверждены на совместном заседании двух секций Ученого совета ИТ СО РАН: секция 3 «Теплофизические свойства веществ и новые материалы», секция 4 «Космическая энергетика, разреженные газы, микро- и наносистемы» (протокол № 8 от «21» апреля 2026 года). Присутствовало: 14 человек.

Результаты голосования: «За» – единогласно.

Руководитель научного направления «теплофизические свойства веществ», ФГБУН
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
доктор физико-математических наук, профессор
Станкус Сергей Всеволодович



Адрес: 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Ак. Лаврентьева, д. 1

Тел.: +7 (383) 336 07 06

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Главный научный сотрудник лаборатории термодинамики веществ и материалов ФГБУН
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
доктор физико-математических наук
Хайрулин Рашид Амирович



Адрес: 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Ак. Лаврентьева, д. 1

Тел.: +7 (383) 335-62-31

E-mail: kra@itp.nsc.ru

