

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Тикиной Ирины Владимировны «Термические свойства жидкометаллического теплоносителя системы Bi-Pb-Sn-Cd», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

### **Актуальность темы исследования.**

В последние годы активно рассматривается вопрос использования тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) в ядерных реакторах. По критериям безопасности все ТЖМТ превосходят литиевые теплоносители, что побуждает проводить дальнейшие исследования их строения и свойств. Система Bi-Pb-Sn-Cd, выбранная автором в качестве перспективного ТЖМТ, обладает следующими достоинствами:

- имеет низкую химическую активность компонентов при взаимодействии с воздухом, водой и паром, что резко понижает вероятность взрыва и пожара;
- имеет высокую рабочую температуру, что предотвращает вскипание расплава на энергонапряженных участках установки;
- низкое рабочее давление в контуре повышает надежность и безопасность, упрощает конструкцию изготовления оборудования и существенно облегчает условия его эксплуатации.

Кроме того, сплавы данной системы используются в МЧС в тепловых реле. В тоже время, надежных данных о строении и свойствах этих сплавов в жидком состоянии практически нет. Поэтому диссертационная работа Тикиной И.В., посвященная исследованию термических свойств расплава системы Bi-Pb-Sn-Cd в атмосфере аргона и воздуха при нагревании до высоких температур, является, несомненно, актуальной.

## Научная новизна.

1. Впервые определены теплофизические характеристики (энтальпия, энтропия) расплавленной системы Bi-Pb-Sn-Cd в интервале температур 300-3000 К и давлений  $10^2 - 10^7$  Па.

2. Рассчитаны теплофизические свойства (энтальпия образования, теплоемкость, теплопроводность) бинарных и тройных соединений PbSn, CdSn, SnBi, BiPb,  $Cd_3Bi_2$ ,  $Bi_2Sn_3$ ,  $Bi_5Pb_3$ ,  $Bi_7Pb_3$ ,  $Bi_7Pb$ ,  $Pb_3Bi_4$ ,  $Pb_3Bi$ ,  $PbSn_3$ ,  $Sn_2Bi_4$ ,  $Sn_3Bi$ ,  $Sn_4Bi_2$ ,  $Sn_5Bi$ ,  $Sn_{10}Bi_3$ ,  $SnBi_5$ ,  $Pb_2Bi_4Sn_4$ ,  $Pb_2Bi_7Sn_4$ ,  $Pb_3Bi_4Sn_4$ ,  $Pb_3Bi_9Sn_4$ ,  $Pb_3BiSn_4$ ,  $Pb_5Bi_4Sn_4$ ,  $Pb_7Bi_4Sn_4$ ,  $PbBi_2Sn_2$ ,  $PbBi_4Sn_4$ ,  $Pb_9Bi_4Sn_4$ ,  $Pb_3Bi_4Sn_{15}$ .

3. Выполнено термодинамическое моделирование термического разложения бинарных и тройных соединений, указанных выше, в интервале температур 300-3000 К и давлений от  $10^2$  до  $10^7$  Па в атмосфере аргона и воздуха.

4. Исследованы температурные зависимости равновесного состава и теплофизических характеристик расплавов системы Bi-Pb-Sn-Cd в атмосфере аргона и воздуха в интервале температур 300-3000 К и давлений  $10^2 - 10^7$  Па.

5. Исследованы температурные зависимости парциальных давлений компонентов паровой фазы, образующейся при равновесном нагревании над расплавом системы Bi-Pb-Sn-Cd, а также термическом разложении индивидуальных соединений в широком интервале температур и давлений в атмосфере аргона и воздуха.

В диссертации определен состав сплава в конденсированной и газовой фазе при его нагреве, получены новые данные о распределении элементов в металлической, оксидной и газовой фазах в широком диапазоне температур и давлений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных математических методов и программных комплексов, апробированных методик измерений при проведении экспериментальных исследований, хорошим согласием расчетных значений с экспериментальными данными.

## **Структура, объем и основное содержание работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Работа содержит 154 страницы текста, из них 124 страницы основного текста, 60 рисунков, 28 таблиц и 2 приложения на 30 листах. Список литературы содержит 120 наименований.

Во Введении автором сформулирована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературных данных об исследовании сплавов системы Bi-Pb-Sn-Cd, а также двойных и тройных систем Pb-Bi, Cd-Bi, Sn-Bi, Cd-Sn, Sn-Pb-Bi, Cd-Pb и сложных оксидных соединений, содержащих Bi, Pb, Sn, Cd.

Во второй главе описана установка для проведения термического анализа и проведен термический анализ расплава системы Bi-Pb-Sn-Cd. Выполнена математическая обработка экспериментальных данных, а также исследована микроструктура полученных образцов методом рентгеноспектрального анализа.

В третьей главе описана методика термодинамического моделирования. Произведен расчет термодинамических свойств 29-ти металлических соединений и 23-х сложных оксидных соединений, содержащих в своем составе Bi, Pb, Sn, Cd.

В четвертой главе выполнено термодинамическое моделирование (с использованием программного комплекса TERRA) процессов, происходящих в расплавах системы Bi-Pb-Sn-Cd при давлениях  $10^2 - 10^7$  Па в атмосфере аргона и воздуха. Произведены расчеты термодинамических характеристик системы «расплав (Bi-Pb-Sn-Cd) – пар» и «интерметаллическое соединение – пар». Приведен пример инженерных расчетов для системы Bi-Pb-Sn-Cd при атмосферном давлении.

В Заключении приведены основные выводы диссертационной работы с краткой характеристикой полученных результатов и перспективой дальнейших исследований.

### **Соответствие тематики и содержания работы специальности**

Тема диссертации, результаты исследований соответствуют паспорту научной специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», а именно, п. 1. «Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния» и п. 2. «Аналитические и численные исследования теплофизических свойств веществ в различных агрегатных состояниях». По отрасли наук работа соответствует требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, так как она направлена на определение теплофизических свойств расплава, перспективного для промышленного применения, в инертной атмосфере и атмосфере воздуха.

Диссертационная работа Тикиной И.В. в полном объеме отвечает критериям, которые установлены «Положением о присуждении ученых степеней» УрФУ.

### **Замечания и вопросы по диссертации:**

При знакомстве с диссертацией у меня возникли следующие замечания.

1. В обзоре литературы (глава 1) автор практически не приводит данных о температурных зависимостях физических свойств сплава  $\text{Bi-Pb-Sn-Cd}$  и его составляющих в жидком состоянии. Исключение составляет работа Е.Г. Швидковского 1953 года. В тоже время, именно политермы свойств могли бы подтвердить выводы автора об образовании/распаде интерметаллических соединений в жидкой фазе.

2. Описывая обработку экспериментальных данных по термическому анализу (глава 2), автор не указывает, каким программным продуктом она пользовалась при дифференцировании кривых «температура – время» и какова точность такого дифференцирования. В результате такого дифференцирования температура ликвидус, полученная при малой скорости нагрева, оказалась равной 108 С, а при большой скорости нагрева – 104 С. А должно быть наоборот.

3. Проводя термодинамическое моделирование (ТМ) сплава Bi-Pb-Sn-Cd (глава 4), автор учитывала 29 компонентов (структурных составляющих). В тоже время, результаты микроструктурного анализа показывают, что реально возникающих фаз значительно меньше. Для чего нужно было усложнять ситуацию? В этой же главе делается вывод о том, что интерметаллиды присутствуют в расплаве в виде кластеров. Из данных ТМ этого не следует. Считаю также, что вывод о резком росте соединения  $Pb_5Sn_4Bi_4$  с увеличением температуры и резком его распаде в дальнейшем неверен. Скорей всего это получилось из-за неправильных значений теплофизических свойств данного соединения. Маловероятно и образование соединений PbSn и SnBi при  $T > 1300$  К и  $PbBi_2Sn_2$  при  $T > 1500$  К. Кроме того, плотность интерметаллических соединений нельзя рассчитывать в аддитивном приближении.

4. К сожалению, работа не свободна от технического брака. Например, и в диссертации, и в автореферате не указано, что означают символы А, В, Е, С в таблице 2 и символы а, б, с в таблице 4. А значения плотности сплава не могут уменьшаться с 9480 до 6300 кг/м<sup>3</sup> (таблицы 8 и 9) при замене аргона на воздух. И таких нестыковок довольно много.

Тем не менее, приведенные вопросы и замечания не влияют на общую положительную оценку данной диссертации и не снижают научную и практическую значимость основных результатов, полученных автором.

#### **Заключение.**

Представленная диссертационная работа Тикиной И.В. является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, научной новизны и практической значимости.

Основные научные результаты диссертации подробно изложены в публикациях. По теме диссертации опубликована 31 научная работа, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 5 входят в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты диссертационного исследования И.В. Тикиной докладывались на научных конференциях различного уровня в г. Курган, Санкт-Петербург, Новосибирск, Минск, Екатеринбург, Воронеж.

