

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертационную работу Кузамишева Алима Гисаевича  
«Размерные зависимости теплофизических свойств однокомпонентных  
металлических наночастиц», представленной на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

В современном мире наблюдается стремительный прогресс в области прикладных исследований, связанных с созданием инновационных материалов и технологий. Особое внимание уделяется изучению поверхностных характеристик и разработке методов обработки нанометровых слоёв в таких материалах, как полупроводники, стали и различные сплавы. Примечательная особенность таких материалов заключается в том, что при уменьшении размера частиц всё большую роль начинают играть поверхностные атомы и молекулы, определяя основные свойства материала. Значительная часть таких современных материалов представляет собой сложные многокомпонентные системы. Фундаментом для исследования многокомпонентных систем служат однокомпонентные системы, что делает тему диссертационной работы Кузамишева А. Г. весьма актуальной и интересной с точки зрения теоретической и практической значимости полученных результатов.

Основной целью представленной диссертационной работы являлось нахождение соотношений для определения размерных зависимостей теплофизических свойств однокомпонентных металлических наночастиц, а именно: поверхностного натяжения, температуры, энтропии и теплоты плавления, а также коэффициента теплового расширения.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **основные задачи исследования:**

1. Используя термодинамический метод разделяющих поверхностей, получить новое уравнение для размерной зависимости поверхностного натяжения наночастицы на границе с макроскопической фазой в

изобарических условиях;

2. Вывод уравнения размерной зависимости температуры плавления и тройной точки однокомпонентных наночастиц сферической формы на границе с жидкой макроскопической фазой с использованием аппарата термодинамики дисперсных систем;

3. Получение новых выражений для нахождения энтропии и теплоты плавления, а также коэффициента теплового расширения однокомпонентных наночастиц сферической формы в зависимости от их размера на основе теории фазового равновесия в дисперсных системах;

4. На основе полученных новых выражений провести численные расчеты, а также сравнение с экспериментом размерных зависимостей поверхностного натяжения, температуры, теплоты и энтропии плавления, коэффициента теплового расширения для монометаллических наночастиц.

Объектами рассмотрения в проведенном исследовании выступали металлические наночастицы. Как известно, такие частицы имеют большое практическое значение в материаловедении, химии, медицине, биотехнологиях, наноэлектронике и других высоко технологичных отраслях науки и промышленности. Знание физико-химических характеристик, проявляющихся в основном за счет размерных эффектов, является важным для современных методов синтеза однокомпонентных металлических наночастиц и их последующих применениях, что подчеркивает несомненную актуальность представленной диссертационной работы.

**Достоверность** полученных в работе Кузамишевым А. Г. результатов обеспечивается с одной стороны использованием в качестве фундамента классического термодинамического метода в рамках концепции разделяющих плоскостей, а с другой стороны – фактом тщательной проверки возможности получения из основных соотношений для нахождения размерных зависимостей теплофизических свойств поверхностных характеристик в однокомпонентных наносистемах, наиболее обоснованных формул, справедливых в частных случаях (формулы Толмена, Русанова,

Гиббса-Томсона) и соответствием результатов проведенных численных расчетов с качественными и количественными выводами для аналогичных поверхностных характеристик, имеющихся в научной литературе.

Все это дает основания считать полученные в диссертации результаты **достоверными** и достаточно **надежными**, а сформулированные положения и выводы – вполне **обоснованными**.

Представленная диссертация имеет традиционную структуру. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и основных выводов, списка цитируемой литературы, включающего 245 наименований. Объем работы составляет 149 страниц, включая 33 рисунка и 8 таблиц.

Во **введении** диссертации изложена и обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи, теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна, а также изложены методология и основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации является обзорной. В ней были рассмотрены теоретические и экспериментальные методы изучения размерных зависимостей поверхностного натяжения, температуры плавления, теплоты и энтропии плавления, а также термического расширения однокомпонентных наночастиц. Автор делает вывод, что большинство основных исследований по изучению размерных зависимостей теплофизических свойств в большей степени посвящены плоским границам раздела, в то время как изучение искривленных границ достаточно затруднено, что связано в первую очередь со сложностью подобных экспериментов для изучения тонкого межфазного слоя. Также соискатель отмечает недостаточное количество научных исследований по изучению размерных зависимостей теплоты и энтропии плавления однокомпонентных наночастиц.

Проведенный в первой главе детальный анализ литературных данных, позволил соискателю сформулировать основную цель и задачи диссертационной работы, обозначенные выше в настоящем отзыве.

Последующие четыре главы диссертации посвящены изучению размерных зависимостей таких теплофизических свойств однокомпонентных наночастиц, как поверхностное натяжение (2 глава), теплоты плавления (3 глава), энтропии и теплоты плавления (4 глава), а также коэффициента термического расширения (5 глава).

Так, **во второй главе** диссертационной работы было получено уравнение для нахождения размерной зависимости поверхностного натяжения сферических наночастиц, находящихся на границе с макроскопической фазой при условии постоянства давления в ней, а также с учетом влияния температуры на фазовое равновесие. Как известно, поверхностное натяжение – это важная характеристика физики поверхностных и межфазных явлений. Ее нахождение необходимо для расчета многих других поверхностных характеристик, среди которых можно отметить адсорбцию, адгезию, краевой угол смачиваемости и другие. В связи с этим, такое соотношение может представляться весьма полезным и нужным для решения подобных задач в области теплофизики.

По результатам анализа полученного соотношения, а также выполненных численных расчетов для металлических наночастиц, был выявлен эффект немонотонного изменения поверхностного натяжения в зависимости от радиуса кривизны поверхности, который наблюдался в изобарных условиях в отличие от условий постоянства температуры. Было установлено, что максимум поверхностного натяжения смещается в сторону меньших радиусов кривизны, а значения поверхностного натяжения понижаются при учете размерных зависимостей молярных объемов и скачков энтропии плавления.

**В третьей главе** диссертации соискатель последовательно провел рассмотрение влияния размера наночастицы на температуру плавления. С использованием классического метода Гиббса и концепции о разделяющих поверхностях были получены аналитические соотношения для нахождения размерных зависимостей температуры плавления и температуры тройной

точки для однокомпонентной системы твердая наночастица сферической формы – собственный жидкий расплав – насыщенный пар. Полученные уравнения были согласованы с выражением для размерной зависимости поверхностного натяжения, полученные автором во второй главе.

**Четвертая и пятая главы** представленной научной работы посвящены получению уравнений для нахождения размерных зависимостей таких важных теплофизических свойств, как энтропии и теплоты плавления, а также коэффициента теплового расширения наночастиц. Соискатель провел численные расчеты по новым соотношениям и сделал качественный анализ полученных результатов. Так, выводы показали, что значения изучаемых калорических характеристик монотонно уменьшаются с уменьшением радиуса поверхности натяжения однокомпонентных частиц. Что касается коэффициента теплового расширения, то значения этого параметра повышаются с уменьшением радиуса поверхности натяжения наночастицы. Все эти результаты качественно и количественно хорошо согласуются с имеющимися аналогичными результатами, представленными в научной литературе.

В **заключении** диссертации автор приводит основные выводы по проведенному исследованию.

**Оценка новизны диссертации** Кузамишева А. Г. определяется тем, что:

1. Впервые было получено уравнение зависимости поверхностного натяжения однокомпонентной наночастицы от радиуса поверхности натяжения, находящейся в макроскопической фазе, из которого следуют два основных типа данной зависимости (монотонная и немонотонная с максимумом).

2. Были найдены новые выражения для размерных зависимостей температуры плавления и температуры тройной точки дисперсных частиц сферической формы в однокомпонентной системе твердая наночастица–жидкий расплав–насыщенный пар.

3. Были получены новые соотношения для размерных зависимостей

энтропии и теплоты плавления, а также коэффициента термического расширения однокомпонентных наночастиц сферической формы, находящихся в макроскопической фазе в изобарических условиях.

**Теоретическая и практическая ценность** полученных в работе результатов, определяется тем, что новые уравнения для нахождения зависимостей ряда теплофизических свойств от размера наночастиц, которые были получены в работе, могут быть рекомендованы для решения прикладных и практических задач в области нанотехнологий и физики поверхности.

Также, установленные особенности поведения поверхностного натяжения и температуры плавления с изменением размерного фактора могут существенно дополнить понимание закономерностей и механизмов фазовых переходов в однокомпонентных наночастицах. Проведенные численные расчеты размерных зависимостей теплофизических свойств однокомпонентных металлических наночастиц могут быть полезны при разработке новых технологий получения наночастиц и наноструктурированных материалов.

Содержание диссертации Кузамишева А. Г. **соответствует паспорту научной специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**, по которой она защищается, а именно следующим пунктам:

**П. 1.** Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах.

**П. 2.** Исследование и разработка рекомендаций по повышению качества и улучшению теплофизических свойств веществ в жидком, твердом (кристаллическом и аморфном) состояниях для последующего использования в народном хозяйстве.

По диссертационной работе Кузамишева А. Г. можно сделать следующие **замечания**:

1. Для нахождения размерных зависимостей теплофизических свойств наночастиц диссертант использует термодинамический подход. Насколько обоснованно вообще использование формализма обычной термодинамики при рассмотрении малых объектов, чьи размеры находятся в нанометровом диапазоне?

2. . В работе заявлено, что объектами исследования являются металлы. Однако приводимый теоретический аппарат не содержит особенностей, характерных именно для металлов и, вероятно, мог быть применен к неметаллическим объектам. Кроме того, не ясно, почему выбор ограничен 14-ю металлами. Например, отсутствуют металлы 12 группы (Zn, Cd, Hg).

3. Коль скоро предметом исследования являются наночастицы, то стоило бы обсудить, или объяснить отсутствие обсуждения, квантовые эффекты, характерные для металлических наночастиц. С уменьшением размера частицы изменяется энергетическая структура – происходит дискретизация энергетических уровней. Частицы с магическим числом атомов оказываются более устойчивыми, в результате наблюдаются осцилляции свойств. Например, про осцилляцию температуры плавления частиц Na сообщается в работе: Haberland H, et al. Melting of Sodium Clusters: Where Do the Magic Numbers Come from? // Phys. Rev. Lett. 94, 035701, 2005.

4. . В диссертационной работе рассматриваются характеристики, связанные с плавлением наночастиц, например, температура плавления. Однако не уточняется, что является критерием плавления в случае наночастиц. Чем отличается расплавленная частица от кристаллической, если ее размер сопоставим с толщиной поверхностного слоя или с радиусом ближнего порядка в жидкой фазе?

5. Полученные размерные зависимости недостаточно подробно сравниваются с уже известными аналогичными зависимостями, полученными ранее другими авторами. Не всегда выявлены преимущества

полученных в работе зависимостей.

6. Формулировки задач работы 1 и 3 представляются неудачными, поскольку они сводятся к цели «получить новые выражения». Новизна является свойством результата, а не самоцелью научного исследования.

7. Встречаются неточности технического характера, которые мешают восприятию текста. Приведу примеры. Стр. 73: «В последнем соотношении слагаемые в квадратных скобках также зависят от размера». Но последнее соотношение (2.22) не содержит квадратных скобок. Ближайшие квадратные скобки имеются в (2.20), где сказано, что «члены, которые стоят в квадратных скобках ... не зависели от размера». На стр. 74 применяются необъясненные параметры  $\Delta D$  и  $\Delta \delta$ . В квадратных скобках в знаменателе должно быть 3 вместо 9. В формуле (2.44) не сходятся единицы измерения. Из рисунка 2.3. следует, что результат расчета  $\sigma$  зависит от параметров  $d$  и  $f$ , но для результатов таблицы 2.2. эти параметры не указаны. На рисунке 3.1 результаты расчета для платины сравниваются с данными работы [189], но в этой работе платина не исследовалась и какие-либо сведения о платине не приведены.

Сделанные замечания носят, в основном, частный и рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки по диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой. Автореферат диссертации, а также опубликованные соискателем научные работы, полностью отражают ее содержание.

### **Заключение по диссертации**

Учитывая актуальность темы, научную новизну и практическое значение полученных результатов, считаю, что диссертационная работа Кузамишева Алима Гисаевича «Размерные зависимости теплофизических свойств однокомпонентных металлических наночастиц» отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая



теплотехника (пункты 1, 2) по физико-математическим наукам, а ее автор, Кузамишев Алим Гисаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

**Официальный оппонент**

Саввин Владимир Соломонович



доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры общей и специальной физики Обнинского института  
атомной энергетики – филиала ФГАОУ «Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»

Шифр и наименование специальности, по которой официальный оппонент  
защитил докторскую диссертацию: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая  
теплотехника

Адрес: 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск»,  
г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1  
Тел.: +7 (919) 034 77 96  
E-mail: [savvin-vs@yandex.ru](mailto:savvin-vs@yandex.ru)

Подпись Саввина В. С. удостоверяю:

И.о. директора ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Панов А.В.

Я, Саввин Владимир Соломонович, даю согласие на обработку и передачу  
персональных данных, представляемых мною в диссертационный совет  
21.2.308.01

« 5 » 11 2025 г.