

Корреляция излучательной способности и теплоемкости d -металлов IV периода

© Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015 Казань, Россия
e-mail: dmi-kosenkov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 20 октября 2025 г.

Принято к публикации 20 октября 2025 г.

Исследована взаимосвязь между нормальной интегральной излучательной способностью (ε_{in}) и удельной теплоемкостью (C_p) металлов IV периода Периодической системы в температурной области, охватывающей фазовый переход первого рода (плавление). Проведен корреляционный анализ указанных параметров при гомологических температурах $0.9 \cdot T_{melt}$ и $1.1 \cdot T_{melt}$. Установлена хорошая степень согласованности между поверхностными и объемными свойствами металлов до и после плавления ($R^2 > 0.97$). При этом относительные скачки ε_{in} и C_p в точке плавления не коррелируют, что указывает на различную физическую природу этих величин. Представленные результаты подчеркивают роль электронной структуры и электрон-фононного взаимодействия в формировании теплофизических характеристик при фазовых переходах.

Ключевые слова: d -металлы, излучательная способность, теплоемкость, фазовый переход, гомологическая температура, корреляционный анализ.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62538.194-25

Введение

Исследование теплофизических свойств металлов в окрестности фазового перехода первого рода представляет значительный интерес для физики конденсированного состояния и материаловедения [1,2]. Фазовый переход „твердое тело–жидкость“ сопровождается скачкообразным изменением ключевых термодинамических характеристик, включая теплоемкость, теплопроводность, электросопротивление и плотность, что отражает фундаментальную перестройку атомной и электронной структуры вещества [3].

Особое значение имеет анализ взаимосвязи параметров переноса энергии — теплоемкости (C_p) и нормальной интегральной излучательной способности (ε_{in}), измеряемой в инфракрасном диапазоне. Теплоемкость, как объемное термодинамическое свойство, характеризует способность вещества аккумулировать тепловую энергию и связана с плотностью фононных состояний и электронным вкладом при высоких температурах [4]. Нормальная интегральная излучательная способность представляет собой поверхностную радиационную характеристику, определяемую электронно-фононным взаимодействием и оптическими свойствами приповерхностного слоя [5].

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью корреляционных связей между объемными и поверхностными теплофизическими свойствами в широком температурном диапазоне, включающем область фазового перехода. Особый интерес представляют d -металлы IV периода Периодической системы, характеризующиеся сложным взаимодействием электронных

и фононных подсистем, а также наличием магнитных степеней свободы [6].

Целью настоящей работы является установление корреляции между C_p и ε_{in} для d -металлов IV периода в температурном диапазоне, включающем область предплавления твердой фазы и перегрева жидкой фазы. В исследовании применяется сравнительный анализ с использованием гомологической нормализации температурной шкалы и изучение взаимосвязи параметров в точке фазового перехода. Предложенный подход позволяет количественно оценить взаимосвязь между объемными и поверхностными теплофизическими свойствами и выявить влияние электронной структуры на формирование радиационных характеристик металлов при высоких температурах.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении количественных закономерностей между фундаментальными теплофизическими характеристиками в условиях фазовых превращений. Практическая ценность результатов связана с возможностью прогнозирования радиационных свойств металлов при высокотемпературной обработке и создании новых материалов с заранее заданными теплофизическими характеристиками.

1. Исходные данные

Для корреляционного анализа использованы данные по ε_{in} d -металлов IV периода. Большинство значений (Ti, V, Mn, Sc, Co, Ni, Cu, Zn) получены из авторских экспериментальных работ. Для обеспечения полноты ряда дополнительно использованы литературные данные

Таблица 1. Источники и методы получения данных по ε_{in}

Элемент	T_{melt} , К [3]	Метод получения ε_{in}	Источник	$0.9 \cdot T_{melt}$, К	$1.1 \cdot T_{melt}$, К
Sc	1814	Экспериментальный	[7]	1632.6	1995.4
Ti	1946		[8]	1751.4	2140.6
V	2220		[9]	1998	2442
Cr	2133	Расчетный	—	1919.7	2346.3
Mn	1519	Экспериментальный	[10]	1367.1	1670.9
Fe	1811	Литературные данные	[11]	1630	1992.1
Co	1767	Экспериментальный	[12]	1590.3	1943.7
Ni	1728			1555.2	1900.8
Cu	1358		[13]	1222.2	1493.8
Zn	693		[14]	623.7	762.3

Таблица 2. Теплофизические характеристики металлов в точке плавления и при гомологических температурах

Металл	$\varepsilon_{in}^{0.9}$	ε_{in}^{sol}	ε_{in}^{liq}	$\varepsilon_{in}^{1.1}$	$C_p^{0.9}$	C_p^{sol}	C_p^{liq}	$C_p^{1.1}$
Sc	0.19	0.24	0.26	0.29	983.19	983.19	978.74	978.74
Ti	0.31	0.33	0.41	0.49	776.20	843.61	977.04	977.04
V	0.35	0.42	0.55	0.45	790.20	859.48	895.15	895.15
Cr	0.26	0.25	0.25	0.27	797.75	1591.20	975.08	975.08
Mn	0.28	0.29	0.32	0.34	744.75	842.39	873.71	873.71
Fe	0.25	0.28	0.31	0.37	678.78	760.45	823.68	823.68
Co	0.19	0.23	0.25	0.28	651.87	640.40	726.25	726.25
Ni	0.18	0.19	0.24	0.26	631.11	657.21	734.247	734.24
Cu	0.06	0.07	0.12	0.14	525.11	516.85	516.16	516.16
Zn	0.04	0.04	0.11	0.13	450.90	474.03	491.74	491.74

Примечание*: ε_{in}^{sol} , ε_{in}^{liq} — нормальная интегральная излучательная способность при температуре плавления для твердой и жидкой фаз соответственно; $\varepsilon_{in}^{0.9}$, $\varepsilon_{in}^{1.1}$ — нормальная интегральная излучательная способность при гомологических температурах $0.9 \cdot T_{melt}$ и $1.1 \cdot T_{melt}$ соответственно; C_p^{sol} , C_p^{liq} — удельная теплоемкость при температуре плавления для твердой и жидкой фаз соответственно, [J/(kg·K)]; $C_p^{0.9}$, $C_p^{1.1}$ — удельная теплоемкость при гомологических температурах $0.9 \cdot T_{melt}$ и $1.1 \cdot T_{melt}$ соответственно, [J/(kg·K)].

для Fe, а для Cr значение ε_{in} рассчитано. Источники данных для каждого элемента детализированы в табл. 1.

Экспериментальные измерения ε_{in} выполнены абсолютным методом. Измерения проводились в непрерывном температурном диапазоне, охватывающем области гомологических температур $0.9 \cdot T_{melt}$ и $1.1 \cdot T_{melt}$ для каждого металла. Значения ε_{in} , приведенные в табл. 2 для конкретных гомологических температур, были получены путем интерполяции экспериментальных данных. Температура в эксперименте контролировалась и измерялась с точностью ± 5 К.

Для измерений использовался радиометр прямого видения, работающий в спектральном диапазоне $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ [15], что перекрывает положение максимума

излучения по Вину для всех исследуемых металлов в данном температурном интервале. Приемником излучения в радиометре служил термостолбик с платиновой чернью. Таким образом, использованная в настоящей работе экспериментальная установка относилась к классу радиометрических комплексов для измерения нормальной интегральной излучательной способности. Образцы металлов твердой фазы имели зеркально-полированную поверхность. Шероховатость поверхности, контролируемая с помощью профилометра, не превышала $0.05\text{ }\mu\text{m}$. Измерения в области предплавления проводились в динамическом вакууме при остаточном давлении менее 10^{-3} Па, в области жидкой фазы — в атмосфере очищенного аргона. Следует отметить, что адсорбция газа на по-

верхности расплава может влиять на ее излучательную способность [5,16]. Однако, учитывая инертность аргона, высокую температуру измерений ($\geq 1.1 \cdot T_{melt}$), снижающую степень адсорбции, и идентичные условия для всех измерений в жидкой фазе, влияние адсорбированного аргона на результаты экспериментов оценивается как пренебрежимо малое в рамках погрешности метода и не оказывающее решающего воздействия на установленные корреляционные закономерности. Погрешность определения ε_{in} не превышала $\pm 5\%$. Подробное описание методики измерений и экспериментальной установки представлено в работе [12].

Для C_p в связи с отсутствием экспериментальных данных по излучательной способности в требуемом температурном диапазоне, значения ε_{in} были рассчитаны с использованием приближения Фута [16], представляющего развитие моделей Друде и Ашкинасса, имеющее вид

$$\varepsilon_{in} = 5.78\sqrt{r \cdot T} - 17.9r \cdot T + 44(r \cdot T)^{3/2}, \quad (1)$$

где r — удельное электрическое сопротивление, $[\Omega \cdot m]$; T — температура, $[K]$.

Расчет проводился по уравнению (1) на основе температурных зависимостей удельного электросопротивления из [17]. Совокупная погрешность расчета по данному приближению складывается из инструментальной погрешности исходных данных и систематической погрешности теоретического приближения.

В табл. 2 представлены сводные данные по теплофизическим характеристикам исследуемых металлов.

Значения удельной теплоемкости для твердого и жидкого состояний, приведенные в табл. 2, были получены из электронного справочника [18]. Для промежуточных температур выполнена линейная интерполяция с учетом отдельных вкладов фаз до и после плавления. Для нивелирования различий в температурах плавления использована гомологическая шкала температур с опорными точками $0.9 \cdot T_{melt}$ (предплавление) и $1.1 \cdot T_{melt}$ (перегрев жидкости).

2. Рассуждения

Фазовый переход первого рода, сопровождающий процесс плавления, характеризуется фундаментальным разрушением дальнего порядка в кристаллической решетке, что приводит к значительным изменениям как теплофизических, так и электронных свойств металлов [1,2]. На микроскопическом уровне это проявляется в существенной перестройке спектра фононных и электронных состояний, изменении характера межатомных взаимодействий, а также в переходе от коллективного упорядоченного движения атомов к стохастическому движению, характерному для жидкого состояния. Данные структурные преобразования непосредственно влияют на механизмы переноса энергии и излучательные характеристики металлов.

Теплоемкость в твердой фазе в области высоких температур определяется преимущественно фононным вкладом в соответствии с моделью Дебая, однако существенный вклад могут вносить электронные степени свободы, особенно для металлов с высокой плотностью состояний на уровне Ферми [4,6]. В жидкой фазе происходит дополнительное увеличение вклада от электронных степеней свободы и ангармонических колебаний, хотя общее изменение C_p при переходе через T_{melt} не всегда имеет резко выраженный характер [3,19]. Следует отметить, что для переходных *d*-металлов существенную роль играют электрон-электронные взаимодействия и магнитные степени свободы, что осложняет теоретическое описание поведения теплоемкости в области фазового перехода.

Излучательная способность представляет собой важный радиационный параметр, характеризующий способность поверхности металла испускать тепловое излучение в инфракрасном диапазоне. Данная величина определяется комплексными оптическими свойствами металла и существенно зависит от его электронной структуры и отражательной способности [5,16]. Поскольку процессы теплового излучения формируются в приповерхностном слое металла, но при этом зависят от объемных характеристик (в частности, электронной подвижности, плотности состояний и частот электрон-фононного рассеяния), возникает естественная физическая взаимосвязь между поверхностными радиационными и объемными теплофизическими параметрами.

Изменение ε_{in} вблизи температуры плавления обусловлено несколькими конкурирующими механизмами: усилением электрон-фононного взаимодействия, ростом плотности возбужденных электронных состояний, а также фундаментальной перестройкой электронной структуры при плавлении. Особенно выраженный характер эти изменения носят для металлов с частично заполненной *d*-оболочкой, где сильные электронные корреляции и сложная многозонная структура оказывают существенное влияние на тепловое поведение и радиационные характеристики [3,19,20].

Проведенное исследование демонстрирует, что, несмотря на различную физическую природу параметров C_p и ε_{in} (термодинамический и радиационный соответственно), оба они являются чувствительными индикаторами структурной перестройки металла при фазовом переходе первого рода. Их совместное рассмотрение является физически обоснованным благодаря наличию общего микроскопического основания — изменениям в электрон-фононной подсистеме металла, что и объясняет наблюдаемую статистически значимую корреляцию при гомологических температурах. Установленные закономерности позволяют глубже понять взаимосвязь между объемными и поверхностными свойствами металлов в условиях фазовых превращений.

3. Анализ корреляции при гомологических температурах

На рис. 1 представлена корреляция ε_{in} с C_p для d -металлов при $0.9 \cdot T_{melt}$. Для количественной оценки взаимосвязи данные по металлам, демонстрирующим общий тренд (Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn), были аппроксимированы степенной функцией вида:

$$\varepsilon_{in} = (4.26 \pm 2.15) \cdot 10^{-13} \cdot C_p^{(4.125 \pm 0.215)}. \quad (2)$$

Полученный высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.97$) подтверждает устойчивую корреляцию и взаимосвязь объемных и поверхностных свойств металлов в твердой фазе. Металлы с низкой C_p (Cu, Zn) демонстрируют низкое ε_{in} , что обусловлено слабыми фоновыми процессами и высокой отражательной способностью, характерной для металлов с заполненной d -оболочкой [3]. Точки таких элементов, как Ni, Co и Fe, группируются вблизи кривой регрессии, демонстрируя предсказуемое поведение в рамках установленной зависимости. Наибольшие отклонения от общего тренда наблюдаются для Sc и Cr. В случае Sc сильное расхождение, вероятно, связано со спецификой его электронной структуры в области предплавления, что требует отдельного изучения. Для Cr, значение ε_{in} для которого было рассчитано по приближению Фута [16], отклонение может быть связано с ограниченной применимостью модели для данного металла. Эти точки приведены на графике в качестве справочной информации и не учитывались при построении регрессии. Таким образом, установленная зависимость является статистически значимой для большей части исследуемого ряда d -металлов.

На рис. 2 представлена корреляция ε_{in} с C_p для жидкой фазы при $1.1 \cdot T_{melt}$. Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией выявила зависимость с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.98$):

$$\varepsilon_{in} = (7.88 \pm 3.50) \cdot 10^{-7} \cdot C_p^{(1.94 \pm 0.16)}. \quad (3)$$

Полученное значение R^2 , сопоставимое с таковым для твердой фазы, указывает на сохранение устойчивой корреляции между теплоемкостью и излучательной

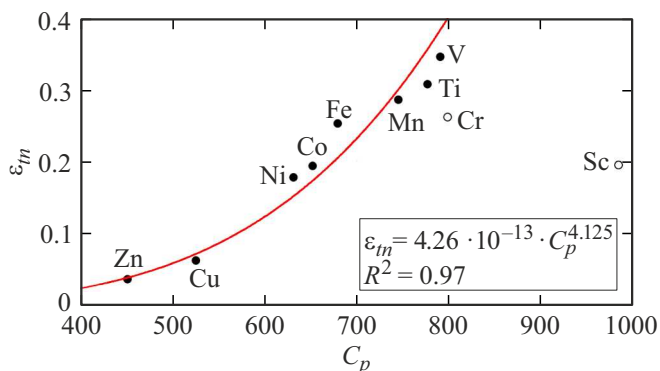


Рис. 1. Корреляция ε_{in} и C_p для металлов при $0.9 \cdot T_{melt}$.

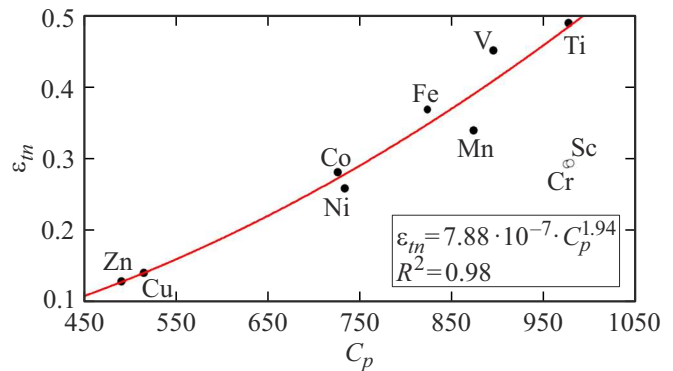


Рис. 2. Зависимость ε_{in} от C_p для металлов при $1.1 \cdot T_{melt}$.

способностью после плавления. Это демонстрирует, что взаимосвязь между объемными теплофизическими и поверхностными радиационными свойствами является фундаментальной и не разрушается при фазовом переходе первого рода. Металлы с полностью заполненной d -оболочкой (Zn, Cu) характеризуются минимальными значениями ε_{in} и C_p [3], в то время как элементы с незаполненными d -орбиталями (Ti, V) демонстрируют максимальные значения параметров, что согласуется с усилением электрон-фононного взаимодействия [20]. Наблюдаемые отклонения для Sc и Cr, данные для которых приведены на графике справочно, подчеркивают сложный характер влияния индивидуальных особенностей электронной структуры (для Sc) и ограничений расчетных моделей (для Cr) на формирование радиационных характеристик в расплаве.

Для интерпретации установленных корреляций между ε_{in} и C_p необходимо рассмотреть физические механизмы, определяющие эти свойства. Теплоемкость металлов при высоких температурах складывается из фононного и электронного вкладов [6]. Фононная составляющая обусловлена тепловыми колебаниями атомов решетки, а электронная — тепловым возбуждением электронов вблизи уровня Ферми и пропорциональна плотности электронных состояний и температуре. Излучательная способность в ближнем ИК-диапазоне тесно связана с электропроводностью (приближении Хагена–Рубенса [16]). Таким образом, ε_{in} определяется процессами рассеяния носителей заряда, главным из которых при высоких температурах является рассеяние на фононах. Интенсивность этого процесса зависит от амплитуды тепловых колебаний решетки, т.е. напрямую связана с фононным вкладом в теплоемкость.

Следует также отметить, что при столь высоких температурах может проявляться эффект термоэлектронной эмиссии, связанный с испусканием электронов с нагретой поверхности [6,21]. Поскольку энергетические спектры электронов термоэмиссии и фотонов теплового излучения частично перекрываются, существует потенциальная взаимосвязь между этими явлениями. В первом приближении можно предположить, что вклад тока

термоэмиссии в общий энергетический баланс и, следовательно, в определяемую излучательную способность не является доминирующим по сравнению с механизмами электрон-фононного рассеяния, определяющими оптические свойства в ИК-диапазоне [5,16]. Тем не менее для более строгого количественного разделения этих вкладов и построения физической модели необходимо проведение дополнительных исследований.

Установленная устойчивая корреляция между ε_{in} и C_p твердой фазы свидетельствует о том, что оба параметра в кристаллическом состоянии контролируются общими микроскопическими процессами. Рост теплоемкости, связанный с усилением фононных мод, приводит к повышению удельного электрического сопротивления за счет роста вероятности электрон-фононного рассеяния, что в соответствии с соотношением Хагена–Рубенса, ведет к увеличению ε_{in} [16].

Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.98$), полученный для жидкой фазы, указывает на сохранение тесной взаимосвязи между теплоемкостью и излучательной способностью после плавления. Однако изменение вида аппроксимирующей зависимости (ср. формулы (2) и (3)) отражает фундаментальную перестройку механизмов, определяющих эти свойства. Разрушение дальнего порядка приводит к росту фононной составляющей теплоемкости из-за появления новых низкочастотных мод. Для ε_{in} , наряду с электрон-фононным взаимодействием, возрастает роль рассеяния на флуктуациях плотности в расплаве.

Утверждение о роли флуктуаций плотности основано на фундаментальных представлениях о структуре жидкостей. В отличие от кристаллов жидкие металлы характеризуются отсутствием дальнего порядка и наличием значительных флуктуаций плотности, которые существуют уже в непосредственной близости от температуры плавления и проявляются, в частности, в виде затухающих осцилляций на функциях радиального распределения [19,22]. Нагрев до $1.1 \cdot T_{melt}$, использованный в настоящей работе, является достаточным для наблюдения этого эффекта, что подтверждается экспериментальными данными для железа и алюминия [22], показывающими изменение характеристик ближнего порядка в данном интервале температур. Именно комплексным влиянием возросшей роли флуктуаций и измененного электрон-фононного рассеяния можно объяснить наблюдаемое видоизменение корреляции при переходе в жидкое состояние, несмотря на сохранение ее высокой статистической значимости.

4. Анализ поведения относительных скачков в точке плавления

В разд. 4 представлен анализ графической зависимости (рис. 3) между относительными величинами скачков ε_{in} и C_p металлов при температуре плавления T_{melt} . Для улучшения визуального восприятия данных значения

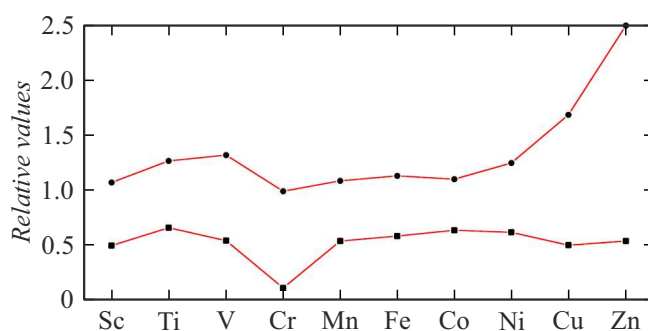


Рис. 3. Зависимость поведения относительных величин C_p^{liq}/C_p^{sol} (■) и $\varepsilon_{in}^{liq}/\varepsilon_{in}^{sol}$ (●) металлов от положения в периоде при T_{melt} .

отношения (C_p^{liq}/C_p^{sol}) смещены на 0.5 единицы по оси ординат.

Экспериментальные данные демонстрируют значительный разброс значений. Наибольший скачок теплоемкости наблюдается у Cr и имеет отрицательное значение, что может быть связано с особенностями магнитной структуры и электронного спектра данного металла. Остальные металлы периода характеризуются положительными и сравнительно однородными значениями скачков теплоемкости.

В отличие от поведения теплоемкости Cr и Mn демонстрируют минимальные значения скачка излучательной способности, в то время как медь и цинк показывают максимальные значения данного параметра. Для остальных металлов периода величина скачка ε_{in} имеет примерно одинаковый порядок величин.

Наблюдаемое существенное расхождение между относительными скачками ε_{in} и C_p свидетельствует об отсутствии линейной связи между этими параметрами в точке фазового перехода первого рода. Данное явление объясняется различной физической природой изучаемых характеристик: относительный скачок C_p отражает изменение теплоемкости вследствие разрушения кристаллической решетки и увеличения числа степеней свободы [21], в то время как скачок ε_{in} определяется изменением отражательной способности, локальной перестройкой электронной плотности и модификацией поверхностного слоя [5].

Таким образом, различие в микроскопических механизмах, определяющих поведение теплоемкости и излучательной способности в точке плавления, приводит к рассогласованию величин их относительных скачков, несмотря на наличие корреляции при температурах, отклоняющихся от T_{melt} .

Выводы

Проведенное исследование выявило устойчивую корреляционную зависимость между нормальной интегральной излучательной способностью и удельной теп-

лостью d -металлов IV периода в области гомологических температур, охватывающей фазовый переход „твердое тело–жидкость“. Высокая степень корреляции ($R^2 > 0.97$) наблюдается как при $0.9 \cdot T_{melt}$ в твердой фазе, так и при $1.1 \cdot T_{melt}$ в жидкой фазе, что свидетельствует о фундаментальной связи между объемными и поверхностными свойствами.

Установлено, что фазовый переход первого рода сопровождается изменением характера корреляции (вид степенной зависимости), при этом ее статистическая значимость сохраняется. Это изменение обусловлено перестройкой механизмов рассеяния: в твердой фазе доминирует электрон-фононное рассеяние в периодическом потенциале, в то время как в жидкости дополнительный вклад вносят рассеяние на флуктуациях плотности и возросшая роль низкочастотных фононных мод.

Выявлены специфические отклонения от общего тренда для Sc и Cr, которые связаны с особенностями их электронной структуры и ограничениями расчетной модели, что подчеркивает важность учета индивидуальных свойств элементов. Отсутствие корреляции между относительными скачками C_p и ϵ_{in} в точке плавления подтверждает различную физическую природу изменений этих параметров при фазовом переходе, несмотря на наличие сильной корреляции вблизи T_{melt} .

Применение гомологической нормализации температуры и степенной аппроксимации подтвердило свою эффективность для выявления скрытых закономерностей. Полученные результаты открывают возможности для разработки методов прогнозирования радиационных характеристик металлов в экстремальных температурных условиях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.А. Смирнов. *Термодинамика фазовых превращений в металлах и сплавах* (МИФИ, М., 1998)
- [2] В.Е. Зиновьев. *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах* (Металлургия, М., 1989)
- [3] А.Р. Регель, В.М. Глазов. *Физические свойства электронных расплавов* (Наука, М., 1980)
- [4] Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Липецкий. *Физические свойства металлов и сплавов* (Металлургия, М., 1980)
- [5] R. Siegel, J.R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer* (Taylor & Francis, NY., 2010)
- [6] Н. Ашкрофт, Н. Мермин. *Физика твердого тела в 2 т.* (Мир, М., 1979), т. 1.
- [7] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. *Расплавы*, **1**, 35 (2025). DOI: 10.7868/S3034571525010043
- [8] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *ЖТФ*, **91** (7), 1090 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50949.9-21
- [9] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. *Известия РАН. Энергетика*, **6**, 49 (2024). DOI: 10.31857/S0002331024060038
- [10] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. *ЖТФ*, **95** (7), 1313 (2025). [D.V. Kosenkov, V.V. Sagadeev. *Tech. Phys.*, **70** (7), 158 (2025). DOI: 10.1134/S1063784225600493]
- [11] П.В. Гельд (ред.). *Физические свойства металлов и сплавов: Труды вузов Российской Федерации* (УПИ, Свердловск, 1976), вып. 1.
- [12] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *Теплофизика и аэромеханика*, **28** (6), 951 (2021). DOI: 10.1134/S0869864321060147
- [13] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. *ЖТФ*, **91** (12), 1907 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51755.103-21
- [14] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. *Расплавы*, **5**, 510 (2024). DOI: 10.31857/S0235010624050057
- [15] А.И. Астайкин, М.К. Смирнов. *Квантовые и опто-электронные приборы и устройства* (ФГУП „РФИЦ-ВНИИЭФ“, Саров, 2011)
- [16] А.Е. Шейндлин (ред.). *Излучательные свойства твердых материалов. Справочник* (Энергия, М., 1974)
- [17] Б.А. Баум. *Металлические жидкости* (Наука, М., 1979)
- [18] В.П. Гурвич (ред.) *Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Электронный справочник в 6 т.* (Наука, М., 2010), URL: <http://twf.mpei.ac.ru>
- [19] Б.И. Хрущев. *Структура жидких металлов* (Фан, Ташкент, 1970)
- [20] В.Ю. Ирхин, Ю.П. Ирхин. *Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях* (Ин-т компьютерных исследований, Ижевск, 2008)
- [21] А.А. Абрикосов. *Основы теории металлов* (Наука, М., 1987)
- [22] Н.А. Ватолин. *Структурные исследования металлических расплавов / Лекции лауреатов Демидовской премии (1993–2004)* (Изд-во Уральского ун-та, Екатеринбург, 2006)