

## 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 ( $\varepsilon_{in}$ ) 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  $\varepsilon_{in}$  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 „твёрдое 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 ( $\varepsilon_{in}$ ), 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  $\varepsilon_{in}$  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  $\varepsilon_{in}$  *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  $\varepsilon_{tn}$ 

Элемент	$T_{melt}$ , К [3]	Метод получения $\varepsilon_{tn}$	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	$\varepsilon_{tn}^{0.9}$	$\varepsilon_{tn}^{sol}$	$\varepsilon_{tn}^{liq}$	$\varepsilon_{tn}^{1.1}$	$C_p^{0.9}$	$C_p^{sol}$	$C_p^{liq}$	$C_p^{1.1}$
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\*:  $\varepsilon_{tn}^{sol}$ ,  $\varepsilon_{tn}^{liq}$  — нормальная интегральная излучательная способность при температуре плавления для твердой и жидкой фаз соответственно;  $\varepsilon_{tn}^{0.9}$ ,  $\varepsilon_{tn}^{1.1}$  — 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  $\varepsilon_{tn}$  рассчитано. Источники данных для каждого элемента детализированы в табл. 1.

Экспериментальные измерения  $\varepsilon_{tn}$  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  $\varepsilon_{tn}$ , приведенные в табл. 2 для конкретных гомологических температур, были получены путем интерполяции экспериментальных данных. Температура в эксперименте контролировалась и изменилась с точностью  $\pm 5$  К.

Для измерений использовался радиометр прямого видения, работающий в спектральном диапазоне 1–5  $\mu\text{m}$  [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  $\mu\text{m}$ . 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 оказыающее решающего воздействия на установленные корреляционные закономерности. Погрешность определения  $\varepsilon_{in}$  не превышала  $\pm 5\%$ . Подробное описание методики измерений и экспериментальной установки представлено в работе [12].

Для Cr, в связи с отсутствием экспериментальных данных по излучательной способности в требуемом температурном диапазоне, значения  $\varepsilon_{in}$  были рассчитаны с использованием приближения Фуга [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, [ $\Omega \cdot \text{м}$ ];  $T$  — температура, [К].

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 раздельных 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, изменениях 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  $\varepsilon_{in}$  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  $\varepsilon_{in}$  (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  $\varepsilon_{tn}$  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:

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

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  $\varepsilon_{tn}$ , что обусловлено слабыми фононными 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  $\varepsilon_{tn}$  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  $\varepsilon_{tn}$  с  $C_p$  для жидкой фазы при  $1.1 \cdot T_{melt}$ . Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией выявила зависимость с высоким коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0.98$ ):

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

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

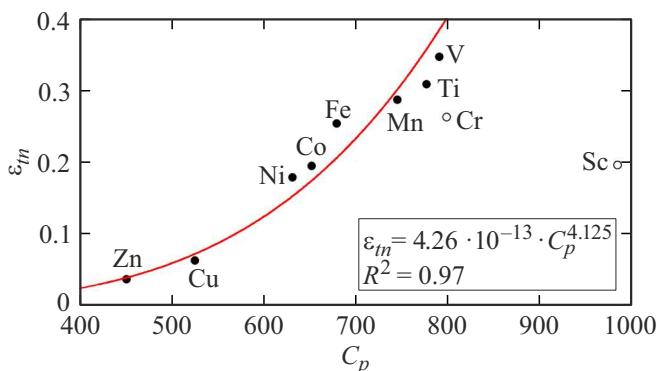


Рис. 1. Корреляция  $\varepsilon_{tn}$  и  $C_p$  для металлов при  $0.9 \cdot T_{melt}$ .

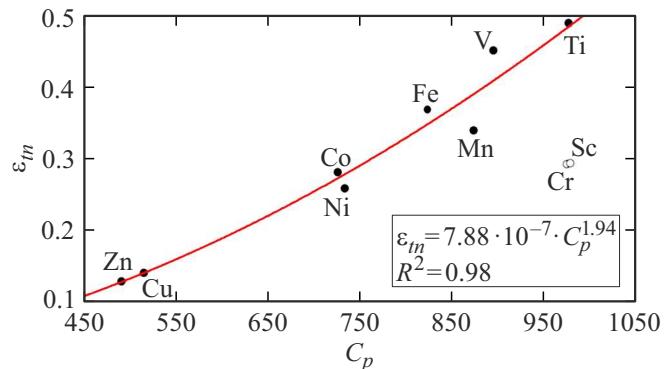


Рис. 2. Зависимость  $\varepsilon_{tn}$  от  $C_p$  для металлов при  $1.1 \cdot T_{melt}$ .

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  $\varepsilon_{tn}$  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  $\varepsilon_{tn}$  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 (приближение Хагена-Рубенса [16]). Таким образом,  $\varepsilon_{tn}$  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 термоэmissionи 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  $\varepsilon_{tn}$  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  $\varepsilon_{tn}$  [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  $\varepsilon_{tn}$ , 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 наблюданное 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  $\varepsilon_{tn}$  и  $C_p$  металлов при температуре плавления  $T_{melt}$ . Для улучшения визуального восприятия данных значения

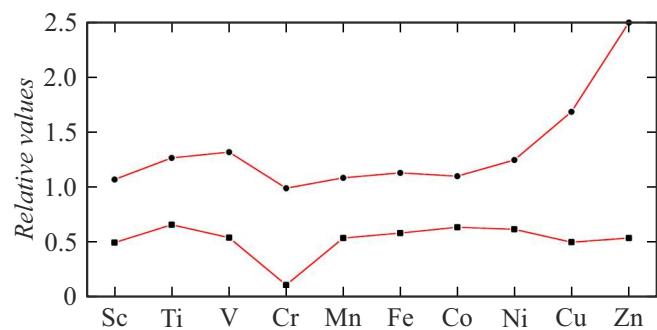


Рис. 3. Зависимость поведения относительных величин  $C_p^{liq}/C_p^{sol}$  (■) и  $\varepsilon_{tn}^{liq}/\varepsilon_{tn}^{sol}$  (●) металлов от положения в периоде при  $T_{melt}$ .

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 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  $\varepsilon_{tn}$  имеет примерно одинаковый порядок величин.

Наблюданное существенное расхождение между относительными скачками  $\varepsilon_{tn}$  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  $\varepsilon_{tn}$  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-

лоемкостью *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  $\varepsilon_{in}$  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 оптоэлектронные приборы и устройства* (ФГУП „РФЯЦ-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://twt.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)