

УДК 536.331

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ РЯДА ЭЛЕМЕНТОВ V ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2024 г. Д. В. Косенков^{1, *}, В. В. Сагадеев¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Казанский национальный исследовательский технологический университет”, Казань, Россия

*e-mail: dmi-kosenkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 12.11.2024 г.

Представлены результаты исследования нормальной интегральной излучательной способности ϵ_m элементов V группы Периодической системы в интервале температур твердое тело – жидкость. Выбор объектов исследования – металлические ванадий, сурьма и висмут – аргументирован отсутствием в открытой печати данных по излучательной способности этих элементов. Метод измерения – радиационный. Полученные экспериментальные данные по ϵ_m в пределах каждой из фаз состояния элементов, монотонно возрастают. Скачки излучательной способности положительные или отрицательные и зависят от индивидуальных физико-химических свойств элементов. Проведен вычислительный эксперимент и дан анализ полученных результатов излучательной способности исследованных элементов по приближению Фута.

Ключевые слова: эксперимент, излучательная способность, результаты исследования, ванадий, сурьма, висмут, твердая фаза, жидкая фаза, фазовый переход, приближение Фута

DOI: 10.31857/S0002331024060038

ВВЕДЕНИЕ

Основной характеристикой теплообмена излучением является излучательная способность (ИС). В статье авторы используют термин ИС, относящийся к конкретным условиям состояния поверхности образца, а именно ИС материала с оптически гладкой поверхностью согласно общепринятому термину – “emissivity” [1].

ИС материала зависит от многих параметров: температуры, индивидуальных физико-химических свойств, состояния поверхности излучения, угла наблюдения, фазового состояния вещества и диапазона длин волн исследования [2]. Существующие классические модели теоретического подхода определения ИС, такие как модель Друде, Ашкинаса, Хагена–Рубенса, Фута и многие другие дают оценку интенсивности ИС с допущениями [3, 4]. Эти модели применимы для химически чистых

веществ. Авторы статьи считают, что достоверным и единственным источником информации об ИС веществ является многократное экспериментальное исследование и сопоставление результатов.

На сегодняшний момент имеется ограниченная справочная информация по ИС конструкционных материалов как по температуре, так и по спектральному диапазону [3, 5].

Целью данной научной публикации является представление и обсуждение результатов исследования ИС ряда элементов Периодической системы в широком температурном диапазоне, включая фазовый переход твердое тело – жидкость.

Для достижения цели авторы поставили следующие задачи: выбор объектов исследования; проведение физического и вычислительного эксперимента в широком интервале температур с последующим анализом сопоставления полученных результатов.

ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время ИС ряда элементов V группы Периодической системы – ванадий, сурьма и висмут изучена недостаточно. Особый интерес вызывает поведение ИС этих элементов в области фазового перехода твердое тело – жидкость. Возникающие перспективы широкого применения этих элементов в области теплоэнергетики и машиностроения требуют точного изучения и знания параметров поведения ИС в широких температурных интервалах, вплоть до кипения.

Ванадий широко используется в атомной энергетике при изготовлении оболочек тепловыделяющих элементов, трубопроводов жидких теплоносителей и в изготовлении ответственных теплонагруженных деталей [6–8]. Проведенный литературный поиск показал наличие единичных работ по исследованию ИС этого элемента.

Металлическая сурьма, являясь в твердом состоянии полуметаллом [9], нашла широкое применение в виде легирующего элемента сплавов – баббитов [10]. Проведенный поиск по периодической и справочной литературе показал полное отсутствие информации по ИС этого полуметалла.

Висмут используется в металлургической промышленности. Применение висмута в производствах легированных сталей и его добавка в сплавы с алюминием увеличивает механическую пластичность [10]. Жидкий висмут и сплавы на его основе достаточно легкоплавки, что является одной из причин применения их в ядерной энергетике [11, 12]. Висмут широко применяется в качестве теплоносителя и охлаждающего агента ядерных реакторов [7, 8]. Достаточно полно исследована плотность и теплопроводность жидкого висмута [13–15], но исследования ИС этого элемента в открытых источниках отсутствуют.

Все элементы авторами статьи исследовались как в твердой полированной фазе, так и в жидком состоянии. В экспериментах принимали участие технические образцы металлов с чистотой поверхности не менее 0.01 мкм. Характеристики исследованных образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследованных металлов

Металл	Ванадий	Сурьма	Висмут
Содержание основного элемента, %	99.3	99.4	99.9
Температура плавления, К	2220 [16]	903.8 [17]	544.5 [17]

ИНСТРУМЕНТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Нормальная интегральная ИС – ε_m выбранных элементов исследовалась на экспериментальной установке, конструктив которой подробно изложен в [18]. Основными составными частями установки являются: измерительная ячейка, пост вакуумной откачки, система подготовки и подачи инертного газа и аппаратный комплекс фиксации ТЭДС.

Изготовленная измерительная ячейка представляет собой прямоугольный объем с установленными на верхнем фланце радиометром прямого видения, изолированными медными тоководами для закрепления резистивного нагревателя (танталовой полосы) лодочного типа [19]. Конструкция тоководов позволяла заменять резистивный нагреватель на изготовленную так же из тантала модель абсолютно черного тела (модель). Применяемая модель представляла собой цилиндрический стакан. Длина модели 100 мм, наружный диаметр 30 мм. Площадь визирования радиометром доньшка модели формировалось пятью внутренними диафрагмами. Доньшко имеет развитую поверхность. Геометрические размеры и конструктивные особенности модели соответствуют рекомендациям [20]. Степень черноты модели не менее 0.96. Нагрев модели осуществлялся стабилизированным током промышленной частоты.

Чувствительность и быстродействие радиометра – интегрального приемника излучения, определяется термоэлементом, взятым с промышленного пирометра типа “Рапир”. Достижение изотермических температурных полей как у модели, так и у исследуемого образца металла в течение опыта постоянно контролировалось набором хромель-копелевых и вольфрам-рениевых термопар, отградуированных по образцовой платина-платинородиевой термопаре.

Пост вакуумной откачки включал в себя механический насос 2НВР-5ДМ и высоковакуумный струйный насос НВДМ-100. Данные средства откачки позволяли создавать в ячейке давление не более 10^{-6} мм рт. ст. Экспериментальные измерения проводились в атмосфере предварительно осушенного и отожженного инертного газа – аргона, применяемого в хроматографии.

Аппаратный комплекс фиксации ТЭДС в экспериментах представлял собой набор цифровых вольтметров В7-21А.

Авторами уделялось большое внимание чистоте поверхности исследуемого твердого или жидкого металла. Визуальное наблюдение за зеркалом поверхности проводилось в течение всего опыта и при малейшем подозрении на замутнение эксперимент прекращался.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях применялся прямой радиационный метод [3], заключенный в чередовании визирования радиометром теплового потока с поверхности исследуемого образца и с модели (источника равновесного излучения) при одинаковых температурах.

Применяемый метод исследования ИС позволил подробно, с небольшим температурным шагом, фиксировать интенсивность теплового потока.

Уравнение расчета теплообмена излучением между радиометром и моделью имеет вид

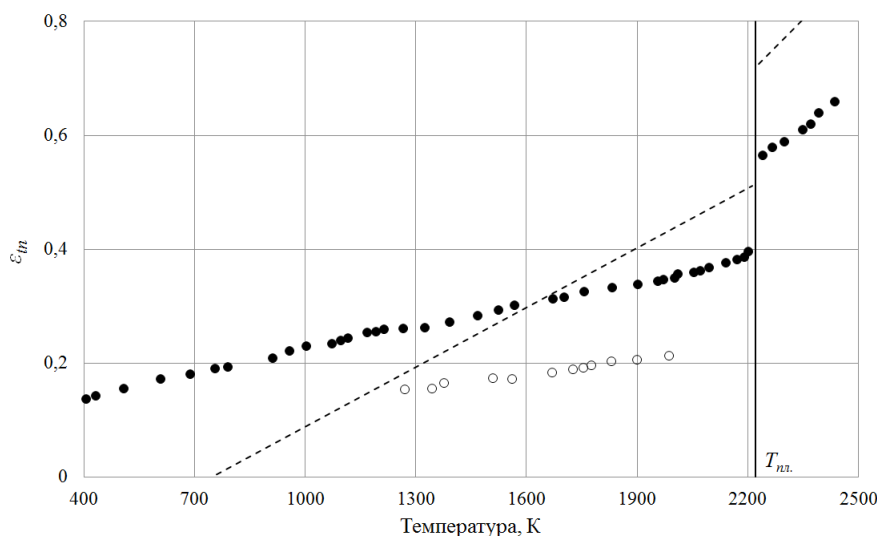


Рис. 1. Зависимость ε_m ванадия от температуры: • — эксперимент авторов; ○ — [24]; штриховая линия — расчет по приближению Фута.

$$C_0 \varepsilon_{AQT} \left(\frac{T_{AQT}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 + C_0 (1 - a_p) \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 = k_p \alpha_{p1}, \quad (1)$$

где C_0 — коэффициент излучения [Вт/(м²·К⁴)]; ε_{AQT} — ИС модели, a_p — поглощательная способность радиометра; T_{AQT} — температура модели [К]; T_p — температура радиометра [К]; k_p — коэффициент пропорциональности для радиометра [Вт/(м²·В)]; α_{p1} — ТЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при первом замере [В].

Уравнение расчета теплообмена излучением между радиометром и исследуемым металлическим образцом имеет вид

$$C_0 \varepsilon_m \left(\frac{T_{об.}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 + C_0 (1 - a_p) \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 = k_p \alpha_{p2}, \quad (2)$$

где ε_m — нормальная интегральная излучательная способность образца; $T_{об.}$ — температура образца [К]; α_{p2} — ТЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при втором замере [В].

При записи выражений (1) и (2) излучательная и поглощательная способности радиометра принимались равными единице.

Из совместного решения этих уравнений (деления (2) на (1)) найдено

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{AQT} \frac{\alpha_{p2}}{\alpha_{p1}}. \quad (3)$$

Погрешность опытов была определена в границах общей теории ошибок, следуя которой предельную абсолютную погрешность результатов измерения находят путем составления композиций абсолютной систематической ошибки, абсолютной случайной ошибки серии измерений и систематической ошибки отнесения.

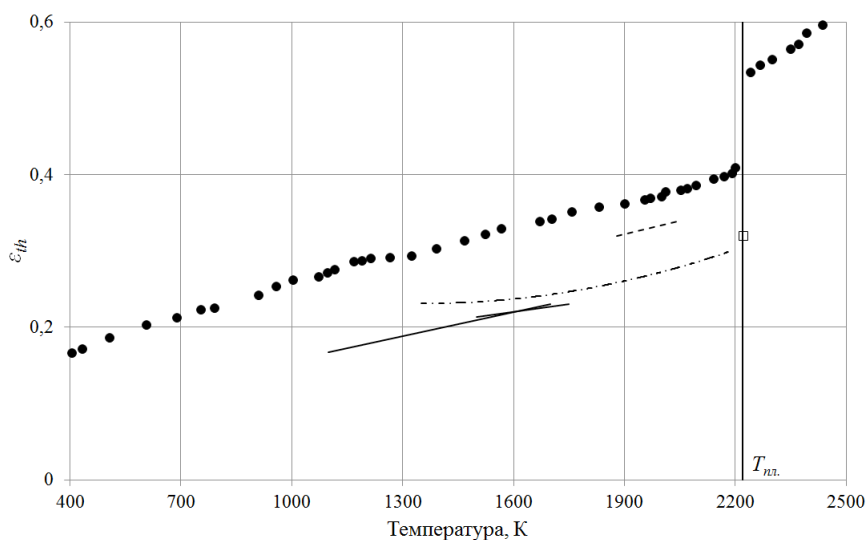


Рис. 2. Зависимость ϵ_{th} ванадия от температуры: • — пересчет авторов; сплошные линии — [26]; штрихпунктирная линия — [27]; штриховая линия — [28]; □ — [29].

Основным выражением, которое было использовано для определения абсолютной систематической ошибки, является (3). Расчет ошибки составил $\pm 0.2\%$.

Максимальная относительная погрешность по расчету составляет $\pm 2.5\%$. Полученная максимальная погрешность измерений изменяется от $\pm 5\%$ (2435 K) до $\pm 8\%$ (400 K), при этом наибольшая постоянная составляющая систематической погрешности оценена в 5%. С увеличением температуры эксперимента погрешность опыта уменьшается.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Для проведения вычислительного эксперимента определения ИС рассматриваемых элементов авторы статьи использовали приближение Фута, которое является продолжением развития соотношений Друде и Ашкинасса [3]. Применяемое приближение позволяет произвести расчет ИС элемента в широком температурном диапазоне по всему спектру длин волн. Приближение имеет вид

$$\epsilon_m = 5.78\sqrt{rT} - 17.9rT + 44(rT)^{3/2}, \quad (4)$$

где r — удельное электрическое сопротивление [Ом·м]; T — температура образца металла [K].

Результаты вычислительного эксперимента и сравнительный анализ с физическим экспериментом представлен ниже по тексту.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теплофизические свойства (плотность, теплоемкость) ванадия в твердой и жидкой фазах состояния исследованы достаточно подробно и обсуждены в [21–23].

В экспериментах авторов при подготовке к опытам все манипуляции (расчет навесок образцов, полирование образцов, оценка чистоты поверхности бесконтактным профилометром) совершались в лабораторном аспирационном боксе, так как соединения ванадия ядовиты.

ИС ванадия было измерено от 405 до 2435 К включая область фазового перехода твердое тело — жидкость. В табл. 2 представлены численные значения ε_m ванадия, полученные в настоящей работе, в зависимости от температуры.

Таблица 2. Значения ИС ванадия

T, K	ε_m	T, K	ε_m	T, K	ε_m	T, K	ε_m	T, K	ε_m
405	0.137	1002	0.229	1391	0.272	1954	0.344	2190	0.386
432	0.143	1072	0.234	1466	0.284	1970	0.347	2200	0.396
506	0.156	1095	0.240	1522	0.293	2000	0.350	2240	0.565
606	0.172	1115	0.244	1566	0.302	2010	0.357	2266	0.579
688	0.181	1167	0.255	1671	0.313	2052	0.360	2299	0.589
754	0.191	1190	0.256	1702	0.315	2070	0.363	2348	0.611
790	0.193	1212	0.260	1756	0.326	2093	0.368	2370	0.621
910	0.209	1265	0.260	1831	0.333	2140	0.377	2392	0.643
956	0.221	1324	0.263	1901	0.338	2170	0.382	2435	0.661

Интенсивность ε_m полированного ванадия монотонно увеличивается до температуры 2200 К и совершает бросок ИС относительно твердой фазы состояния на 34% с последующим продолжением увеличения ИС в жидкой фазе до предельных температур опыта (рис. 1).

Сопоставление ИС экспериментальных данных авторов статьи с результатами работы Шпильрайна Э.Э. и др. [24] показало лишь совпадение по качественной картине в твердой фазе. В работе [24] погрешность эксперимента оценена в 5.5%. Исследовался образец монокристаллического ванадия, полученный методом зонной плавки, с процентом содержания основного элемента 99.9. Метод исследования — радиационный. Нагрев образца осуществлялся с помощью отражательной печи в разреженной среде. В цилиндрическом образце были выполнены два радиальных сверления, одно из которых являлось имитацией черного тела. Температура отнесения определялась путем линейной экстраполяции на торец образца. Средняя высота микронеровностей составляла 0.19–0.25 мкм и соответствовала 10 классу чистоты поверхности. Экспериментальные значения в [24] аппроксимированы выражением следующего вида

$$\varepsilon_m = 0.107 + 0.005(T / 1000) + 0.025(T / 1000)^2 \quad (5)$$

Вышеприведенные перечисления особенностей и различий в исследованиях позволяют авторам объяснить существующую разницу между результатами по интенсивности ИС в температурном диапазоне 1270–1986 К.

На рис. 1 также представлен расчет ИС по приближению Фута. Значения удельного электрического сопротивления для расчета взяты из [25], которые получены путем линейной аппроксимации экспериментальных результатов значительного

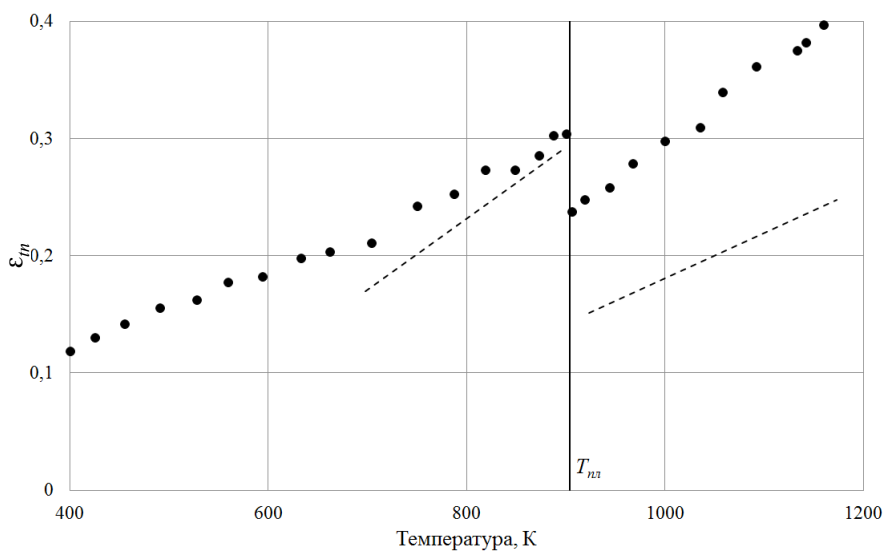


Рис. 3. Зависимость ε_m сурьмы от температуры: • — эксперимент авторов; штриховая линия — расчет по приближению Фута.

количества работ. Интенсивность расчетного значения ε_m пересекает экспериментальные значения авторов в области 1670 К и уходит с завышением вплоть до температуры плавления. Скачкообразное изменение ИС составляет 25%. В жидкой фазе расчет по приближению завышен относительно физического эксперимента на 27%.

Проведенный авторами литературный поиск по ИС ванадия показал наличие так же данных по твердой фазе интегральной полусферической ИС металла — ε_{th} . На

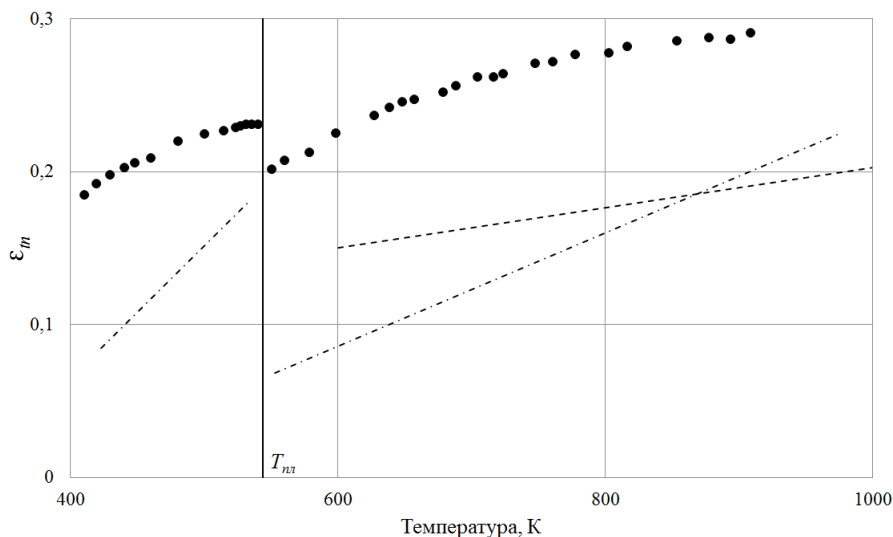


Рис. 4. Зависимость ε_m висмута от температуры: • — эксперимент авторов; штриховая и штрихпунктирная линии — расчет по приближению Фута.

рис. 2 представлено графическое сопоставление результатов [26–29] с результатами пересчета экспериментальных значений авторов ϵ_m в ϵ_{th} по методике [1]. Выражение для пересчета имеет вид

$$\epsilon_{th} = \frac{\epsilon_m}{0.755 + 0.533\epsilon_m}. \quad (6)$$

Воронин Л.К. и др. [26] в своей работе экспериментально полученные значения ϵ_{th} ванадия с химической чистотой 99.82% аппроксимировал двумя прямыми линиями с пересечением в точке 1600 К и рекомендовал к использованию выражения следующего вида

$$\epsilon_{th} = 0.052 + 1.05 \cdot 10^{-4} T, (1100 \div 1600 \text{ К}), \quad (7)$$

$$\epsilon_{th} = 0.113 + 0.67 \cdot 10^{-4} T, (1600 \div 1750 \text{ К}). \quad (8)$$

Причем заявленное среднее отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующих прямых $\pm 0.14\%$ при погрешности измерений от 4 до 6.5% в зависимости от температур опыта.

Paradis P.-F. и др. [27] для измерения ϵ_{th} ванадия с химической чистотой 99.7% в области температур твердой фазы использовал методом электростатической левитации, который подразумевает полное исключение контакта капли (сферы) образца с поверхностями электродов. В статье не заявлена оценка погрешности проведения эксперимента. На основе массива экспериментальных точек, путем аппроксимации, рекомендовано к использованию выражение следующего вида

$$\epsilon_{th} = 0.38 - 2.52 \cdot 10^{-4} T + 9.9 \cdot 10^{-8} (T^2/K^2), (1350 \div 2180 \text{ К}),$$

где К — это коэффициент пропорциональности интервала температур исследования.

Cezairliyan A. и др. [28] использовал метод импульсного нагрева для исследования ряда теплофизических свойств твердого ванадия. Заявлена погрешность измерений в 5%. Основное содержание элемента в образце составляла 99.9%. Автор [28] рекомендует использовать выражение, полученное путем линейной аппроксимации следующего вида:

$$\epsilon_{th} = -5.413 \cdot 10^{-2} + 1.93 \cdot 10^{-4} T, (1880 \div 2050 \text{ К}) \quad (9)$$

Ishikawa T. и др. [29], используя метод электростатической левитации, исследовал нормальную спектральную ИС — $\epsilon_{\lambda n}$ ванадия с чистотой 99.7% в области точки плавления. По полученным результатам выполнен пересчет $\epsilon_{\lambda n}$ в ϵ_{th} в точке плавления 2220 К, представляющее собой единичное значение 0.32. Заявленная погрешность эксперимента составляла 3%.

На рис. 2 видно лишь качественное совпадение роста интенсивности ИС, что может быть объяснено различиями технических и методологических подходов к проведению экспериментов, а так же расхождения в чистоте поверхности и процентном содержании основного элемента в образцах.

ИС сурьмы исследовалась в температурном диапазоне от 401 К до 1160 К, включая фазовый переход твердое тело — жидкость. В табл. 3 представлены

численные значения ϵ_m сурьмы, полученные в настоящей работе, в зависимости от температуры.

Таблица 3. Значения ИС сурьмы

T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m
401	0.118	594	0.182	819	0.273	919	0.248	1092	0.361
425	0.130	633	0.198	849	0.273	944	0.258	1133	0.375
455	0.142	662	0.203	873	0.285	967	0.278	1142	0.382
491	0.155	704	0.210	887	0.302	1000	0.297	1160	0.396
528	0.162	750	0.242	900	0.303	1035	0.309		
559	0.177	787	0.252	906	0.238	1058	0.339		

ИС сурьмы растет с повышением температуры до значения 0.3 (рис. 3). С разрушением кристаллической решетки при плавлении ϵ_m скачкообразно уменьшается на 27% относительно твердой фазы, и далее следует интенсивный подъем ϵ_m до конечной температуры опыта. Фазовый переход первого рода обусловлен перестройкой дальнего порядка кристаллической решетки сурьмы в ближний порядок. При этой перестройке разрушаются существующие ковалентные связи, число свободных электронов значительно увеличивается, что является причиной роста интенсивности ИС в жидкой фазе состояния [30, 31]. В жидком состоянии сурьма становится металлом и по своим теплофизическим свойствам приближается к ним [32].

Проведенный авторами литературный поиск показал отсутствие результатов исследования ИС сурьмы в открытом доступе и, как следствие, невозможность анализа поведения свойств сурьмы при фазовых переходах первого рода.

На рис. 3 также представлен вычислительный эксперимент ИС сурьмы, выполненный по приближению Фута. Удельное электрическое сопротивление сурьмы для расчета ИС в твердой фазе взяты из [33], в жидкой фазе взяты из [34]. В твердой фазе расчет практически совпадает с экспериментом, а в жидкой фазе расчет дает заниженные значения.

Твердый висмут обладает ковалентно-металлическими связями. В жидком состоянии связи только металлические. Гетерогенный характер связей в твердом состоянии висмута препятствует плотнейшей упаковке атомов в кристаллической решетке [30, 31].

Исследование ИС висмута (рис. 4) приведено в температурном диапазоне от 410 до 908 К.

Интенсивность ИС висмута растет до температуры точки плавления, затем следует отрицательный скачок ИС относительно твердой фазы на 14%. В жидкой фазе состояния ИС висмута плавно поднимается до величины 0.29, где опыт был остановлен.

В табл. 4 представлены численные значения ϵ_m висмута, полученные в настоящей работе, в зависимости от температуры.

Таблица 4. Значения ИС висмута

T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m	T, K	ϵ_m
400	0.181	500	0.225	560	0.207	688	0.256	816	0.282
410	0.185	514	0.226	578	0.213	704	0.262	853	0.286
419	0.192	523	0.229	598	0.225	716	0.262	877	0.288
429	0.198	527	0.23	627	0.236	723	0.264	893	0.287
440	0.203	531	0.231	638	0.242	747	0.271	908	0.291
448	0.205	535	0.231	648	0.245	760	0.272		
460	0.209	540	0.231	657	0.247	777	0.277		
480	0.220	550	0.201	678	0.252	802	0.278		

Авторы отмечают, что поведение металлического висмута аналогично по характеру поведения металлической сурьмы, что констатирует схожесть физико-химических свойств этих полуметаллов.

Также на рис. 4 представлены результаты вычислительного эксперимента по приближению Фута. Расчет лишь качественно повторяет поведение ИС в эксперименте с большим количественным разрывом. Штрихпунктирная линия на рис. 4 это результат расчета ИС с использованием значений удельного электрического сопротивления в твердой и жидкой фазе висмута по [35]. Для расчета ИС по приближению Фута жидкого висмута были использованы значения удельного электрического сопротивления, определенные по выражению:

$$r = (98.96 + 0.0554 \cdot T) \cdot 10^{-8}. \quad (10)$$

Данное выражение рекомендовано [36] и получено путем линейной интерполяции экспериментальных данных ряда периодической литературы [37–40].

Рассчитанные значения ИС висмута в жидкой фазе состояния различны по углам направления роста интенсивности (штриховая и штрихпунктирная линии на рис. 4), что показывает прямую зависимость результатов вычислительного эксперимента от различных данных по удельному электрическому сопротивлению.

ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное экспериментальное исследование зависимости ИС от температуры технических образцов металлического ванадия, сурьмы и висмута.
2. Получены результаты поведения интенсивности ИС в температурных интервалах исследования, включая фазовый переход твердое тело – жидкость.
3. ИС исследованных элементов растет с повышением температуры в твердой полированной фазе и скачкообразно изменяется положительно у ванадия и отрицательно у сурьмы и висмута.

4. Плавление металла и полуметаллов, сопровождаемое разрушением кристаллической решетки, ведет к увеличению металлических свойств и росту интенсивности ИС в жидкой фазе состояния.

5. Графическое сопоставление результатов физического эксперимента с вычислениями по приближению Фута показало совпадение по характеру поведения ИС от температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Siegel R., Howell J.R.* Thermal Radiation Heat Transfer. NY: Taylor & Francis Group, 2010. 946 p.
2. *Fukuyama H.* High-Temperature Measurements of Materials // Heidelberg: Springer Berlin, 2009. 204 p.
3. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник, под ред. чл.-кор. АН СССР А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
4. *Свет Д.Я.* Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.
5. *Touloukian Y.S.* Thermophysical properties of matter [the TPRS data series]. Vol. 7. Thermal radiative properties – metallic elements and alloys. New York: Springer Science, 1970. 1594 p.
6. *Зеликман А.Н., Кориунов Б.Г.* Металлургия редких металлов. М.: Metallurgy, 1991. 432 с.
7. *Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. и др.* Машиностроение. Машиностроение ядерной техники. Т. 4. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
8. *Bobkov V.P., Fokin L.R., Petrov. E.E. et al.* Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: A tutorial and collection of data. Vienna: International Atomic ENergy Agency, 2008. 191 p.
9. *Хрущев Б.И.* Структура жидких металлов. Ташкент: Фан, 1970. 111 с.
10. Справочник по конструкционным материалам: Справочник, под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 640 с.
11. *Chusov I.A., Pronyayev V.G., Novikov G.Ye. et al.* Correlations for calculating the transport and thermodynamic properties of lead-bismuth eutectic // Nuclear Energy and Technology. 2020. V. 6. № 2. P. 125–130.
12. *Новиков Г.Е., Обысов Н.А., Чусов И.А. и др.* Расчетно-экспериментальное обоснование полуэмпирических соотношений для определения термодинамических и транспортных свойств жидкого висмута // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2020. № 2. С. 43–53.
13. *Алчагиров Б.Б., Мозговой А.Г., Шампаров Т.М.* Плотность расплавленного висмута при высоких температурах // ТВТ. 2004. Т. 42. № 3. С. 487–490.
14. *Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г.* Экспериментальное исследование плотности висмута в конденсированном состоянии в широком интервале температур // ТВТ. 2005. Т. 43. № 3. С. 374–384.
15. *Савченко И.В., Станкус С.В., Агажанов А.Ш.* Измерение теплопроводности и температуропроводности жидкого висмута в интервале температур 545–970 К // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 315.
16. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. — 3-е изд., перераб. и расширен. — Т. IV. Кн. 1. М.: Наука, 1982. 623 с.

17. *Bedford R.E., Bonnier G., Maas H. et al.* Recommended values of temperature on the International Temperature Scale of 1990 for a selected set of secondary reference points // *Metrologia*. 1996. V. 33. № 2. P. 133–154.
18. *Косенков Д.В., Сагадеев В.В., Аляев В.А.* Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 6. С. 951–956.
19. *Косенков Д.В., Сагадеев В.В., Аляев В.А.* Исследование теплового излучения элементов подгруппы титана с учетом фазовых переходов // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 7. С. 1090–1092.
20. *Бураковский Т., Гизинский Е., Сая А.* Инфракрасные излучатели. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. 408 с.
21. *Линева В.И., Синева М.А., Морозов И.В. и др.* Термодинамические свойства ванадия в конденсированном состоянии // *TBT*. 2020. Т. 58. № 1. С. 41–46.
22. *Arblaster J.W.* Thermodynamic Properties of Vanadium // *J. Phase Equilib. Diffus.* 2017. V. 38. P. 51–64.
23. *Станкус С.В.* Плотность ванадия и хрома при высоких температурах // *TBT*. 1993. Т. 31. № 4. С. 565–568.
24. *Шпильрайн Э.Э., Пелетский В.Е., Костановский А.В.* Интегральная нормальная излучательная способность ванадия в температурном диапазоне 1300÷2000 К // *TBT*. 1979. Т. 14. № 1. С. 223–224.
25. *Desai P.D., James H.M., Ho C.Y.* Electrical resistivity of vanadium and zirconium // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1984. V. 13. № 4. P. 1097–1130.
26. *Воронин Л.К., Меркульев А.Н., Неймарк Б.Е.* Некоторые физические свойства ванадия // *TBT*. 1970, Т. 8. № 4. С. 780–783.
27. *Paradis P.-F., Ishikawa T., Aoyama T. et al.* Thermophysical properties of vanadium at high temperature measured with an electrostatic levitation furnace // *J. Chem. Thermodynamics*. 2002. V. 34. P. 1929–1942.
28. *Cezairliyan A., Righini F., McClure J. L.* Simultaneous measurements of heat capacity, electrical resistivity and hemispherical total emittance by a pulse heating technique: vanadium 1500 to 2100 K // *Journal of research of the Notional Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry*. 1973. V. 78A. № 2. P. 143–147.
29. *Ishikawa T., Koyama C., Nakata Y. et al.* Spectral emissivity, hemispherical total emissivity, and constant pressure heat capacity of liquid vanadium measured by an electrostatic levitator // *J. Chem. Thermodynamics*. 2021. V. 163. P. 106598–106605.
30. *Григорович В.К.* Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. 294 с.
31. *Глазов В.М., Айвазов А.А.* Энтропия плавления металлов и полуметаллов. М.: Металлургия, 1980. 172 с.
32. *Татарина Л.И.* Структура твердых аморфных и жидких веществ. М.: Наука, 1983. 152 с.
33. *Gasser J.G., Kleim R.* Electrical resistivity of some liquid cadmium antimony alloys as a function of temperature. // *Journal de Physique Lettres*. 1975. V. 36. № 4. P. 93–95.
34. *Newport R.J., Gurman S.J., Howe R.A.* The resistivity and thermoelectric power of liquid antimony // *Philosophical Magazine B*. 1980. V. 42. № 4. P. 587–591.
35. *Pietenpol W.B., Miley H.A.* Electrical resistivities and temperature coefficients of lead, tin, zinc and bismuth in the solid and liquid states // *Physical Review*. 1929. V. 34. P. 188–1600.
36. *Sobolev V.* Database of Thermophysical Properties of Liquid Metal Coolants for GEN-IV. 2nd Edition, Scientific Report of the Belgian Nuclear Research Centre, Belgium, 2011. 173 p.

37. *Miller R.R., Lyon R.N. et al.* Physical Properties of Liquid Metals, Liquid Metals Handbook. / R.N. Lyon (ed.), 2nd edition. Report NAVEXOS P 733. – Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, 1954.
38. *Cusack N., Enderby J.E.* A note on the resistivity of liquid alkali and noble metals // Proc. Phys. Soc., 1960. V. 75. P. 395–401.
39. *Bretoneet J.L.* Conductivite electrique des metaux liquids // Techniques de l'Ingenieur, Materiaux Metal-Liques. 1988, M153, Form M69.
40. *Beyer R.T., Ring E.M.* Sound propagation in liquid metals // In: Liquid Metals Chemistry and Physics. 1972. P. 411–430.
41. *Gale W.F., Totemeier T.C.* Smithells Metals Reference Book. Amsterdam: Elsevier. 2004. 602 p.

Emissivity of Group V Elements Periodic Table in a Wide Temperature Range

D. V. Kosenkov^{a,*}, V. V. Sagadeev^a

^a*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

^{*}*e-mail: dmi-kosenkov@yandex.ru*

The results of a study of the normal integral emissivity of the elements of group V of the Periodic system in the solid–liquid temperature range are presented. The choice of research objects – metallic vanadium, antimony and bismuth, is justified by the absence of data on the emissivity of these elements in the open press. The measurement method is absolute radiation. The experimental data obtained on the normal integral emissivity within each of the phases of the state of the elements monotonically increase. The emissivity jumps are positive or negative and depend on the individual physico-chemical parameters of the studied elements. A theoretical calculation of the emissivity of the studied elements according to the Foot approximation was carried out and analyzed.

Keywords: emissivity, solid phase, liquid phase, phase transition, experiment, Foot approximation, vanadium, antimony, bismuth