

УДК 538.953

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДГРУППЫ СКАНДИЯ

© 2025 Д. В. Косенков*, В. В. Сагадеев

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,

Казань, Россия

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

Дата поступления 02.12.2024

После доработки 23.01.2025

Принята к публикации 24.01.2025

Представлены результаты экспериментального исследования нормальной интегральной излучательной способности металлов подгруппы скандия: скандий, иттрий и лантан в широком интервале температур твердое тело—жидкость, включая фазовый переход. Исследование обусловлено отсутствием данных по нормальной интегральной излучательной способности металлов в периодических и справочных изданиях. Интерес к исследуемым металлам также связан с уникальными физико-химическими свойствами, которые делают их перспективными для применения в высокотемпературных системах. Авторы статьи интерпретируют представленные данные как полученные впервые, и они носят предварительный характер, требующий уточнения. Метод измерения — радиационный, способ нагрева образцов — резистивный. Погрешность эксперимента $\pm 3\text{--}5\%$. Измерения твердой фазы металлов проводились в вакууме, жидкую фазу исследовалась в атмосфере специально подготовленного газа — аргона. Представлены графические иллюстрации и численные значения результатов по каждому из исследованных металлов. Полученные комплексные данные по нормальной интегральной излучательной способности в пределах каждой из фаз состояния металлов монотонно возрастают. Такое поведение нормальной интегральной излучательной способности связывается со структурными изменениями в кристаллических решетках вследствие роста температуры. В области фазового перехода твердое тело—жидкость обнаружен скачок нормальной интегральной излучательной способности по каждому из исследованных металлов. В этом случае скачок связан с резким ростом свободных электронов при перестройке структуры металла вследствие плавления, а величина скачка в процентном отношении к твердой фазе у каждого металла индивидуальна. Все результаты исследования проанализированы и обсуждены. Проведено численное моделирование по классической электромагнитной теории с использованием приближения Фута, результаты которого сопоставлены с экспериментальными значениями. Сделан вывод о том, что теоретический расчет излучательной способности качественно, но не количественно, позволяет описать поведение излучательной способности металлов при условии, что известны значения удельного электрического сопротивления металлов в заданном температурном диапазоне.

Ключевые слова: излучательная способность, скандий, иттрий, лантан, твердая фаза, жидккая фаза, область фазового перехода

DOI: 10.31857/S0235010625010043

ВВЕДЕНИЕ

Излучательная способность (ИС) вещества играет важнейшую роль в определении характера лучистого теплообмена. Точное знание величин ИС становится необходимым условием для надежного расчета теплообмена в промышленных и энергетических установках, где интенсивность тепловых потоков существенно влияет на эксплуатационные характеристики оборудования [1–3]. С развитием технологий и повышением эксплуатационных температур энергетических систем, таких как турбины, реакторы и тепловые установки, требования к точности данных о теплофизических свойствах материалов становятся все более строгими. Это связано с необходимостью учета растущей тепловой нагрузки, вызванной интенсификацией процессов, а также стремлением к повышению энергоэффективности. В этих условиях создание систематизированной базы данных по ИС конструкционных материалов, особенно металлов, в широком диапазоне температур становится не просто актуальной, но и стратегически важной задачей.

За последнее десятилетие ведущие научные коллективы мира провели ряд исследований, направленных на изучение фундаментальных аспектов ИС металлов и сплавов на их основе и разработку точных методов ее измерения [4–9]. Эти данные имеют широкое прикладное значение для разработки более надежных и долговечных материалов, а также для понимания закономерностей теплового излучения. Таким образом, систематизация и расширение базы данных по ИС металлов позволит не только повысить точность расчетов лучистого теплообмена, но и создать более устойчивые к тепловым нагрузкам материалы. Такие исследования имеют перспективу дальнейшего развития в области высокотемпературной термодинамики и энергосбережения.

В настоящей работе представлены и обсуждены экспериментальные результаты исследования ИС элементов подгруппы скандия: скандий (Sc), иттрий (Y) и лантан (La). Эти металлы объединяют их принадлежность к группе редкоземельных элементов, а также схожесть в структурных и теплофизических характеристиках. Все три металла кристаллизуются в плотноупакованной структуре гексагональной кубической кристаллической решетки. Такая структура обеспечивает высокую плотность упаковки атомов, что напрямую влияет на их физико-химические свойства [10]. В табл. 1 приведены ключевые физико-химические характеристики исследованных металлов. Металлы подгруппы скандия характеризуются уникальными свойствами, включая высокую устойчивость к окислению при уме-

Таблица 1. Физико-химические характеристики образцов

Металл	$T_{пл}$, К [11]	Массовая доля основного элемента, %	Марка	Вид образца	Класс чистоты поверхности
Sc	1814	99.9	СкМ-2	слиток	14
Y	1795	99.9	ИтМ-1		
La	1194	99.8	ЛаM-1		

ренных температурах и высокую удельную прочность. Эти характеристики делают их перспективными материалами для использования в высокотемпературных установках и системах лучистого теплообмена. Например, скандий используется в составе легких сплавов для авиации и космонавтики, где его способность сохранять стабильные свойства при нагреве имеет решающее значение. Иттрий, благодаря своей излучательной способности в инфракрасном диапазоне, находит применение в лазерах и высокотемпературных покрытиях, а лантан используется в катализаторах и специальных сплавах с улучшенными тепловыми характеристиками [12–14].

Используемая в исследованиях экспериментальная установка подробно описана в [15], методика проведения эксперимента представлена в [16, 17]. Оценка погрешности эксперимента составила $\pm 3\text{--}5\%$ по методике [18]. В экспериментах фиксируется ТЭДС, развиваемая чувствительным элементом приемника излучения. Приемник расположен перпендикулярно плоскости излучения образца, т.е. производятся замеры нормальной интегральной излучательной способности — ε_{tn} , что и подразумевает собой излучательную способность (ИС). Изучение ε_{tn} металлов проводилось в двух различных условиях: твердое полированное состояние исследовалось в динамическом вакууме 10^{-5} Па, а жидккая фаза, включая переход твердое тело — жидкость, изучалась в атмосфере специально подготовленного аргона для исключения окислительных процессов на поверхности металлов. Для точного описания экспериментальных данных необходимо учитывать влияние чистоты образца. Химические примеси могут создавать дополнительные дефекты в структуре, влияя на плотность состояний и электрон-фононное взаимодействие. Это особенно критично вблизи точки плавления, где термическая нестабильность усиливает влияние таких факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловое излучение металлов формируется и испускается приповерхностным слоем материала, толщина которого составляет всего несколько сотен ангстрем. Процесс формирования теплового потока излучения начинается в объеме металла, где атомы и электроны взаимодействуют, перераспределяя энергию, переданную тепловым возбуждением. В результате излучаемый тепловой поток несет в себе уникальные характеристики, зависящие от физико-химических свойств металла [19].

Полученные данные по Sc приведены на рис. 1. Излучательная способность Sc в твердом состоянии демонстрирует устойчивый рост при повышении температуры. Это объясняется увеличением амплитуды тепловых колебаний атомов, что усиливает процессы излучения энергии. Подобное температурное поведение характерно и для удельного электрического сопротивления — ρ , что связано с особенностями электронного строения Sc. В частности, высокая плотность состояний электронов вблизи уровня Ферми способствует росту сопротивления за счет усиленного рассеяния электронов на фононах и дефектах [20]. Полиморфный переход $\alpha \rightarrow \beta$ Sc, который известен при температуре ~ 1610 К [10, 21], не был зарегистрирован, вероятно, из-за температурного шага технических возможностей установки. Фазовый переход «твердое тело — жидкость» фиксируется в области температуры 1814 К. При этом значение ε_{tn} увеличивается на $\sim 16\%$ относительно твердой фазы. Рост может быть объяснен изменением плотности электронных состояний и увеличе-

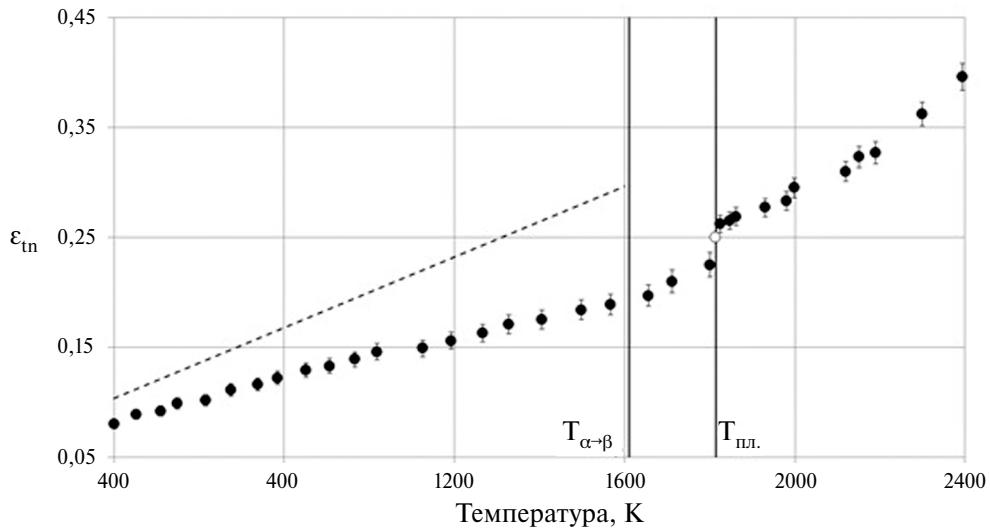


Рис. 1. Зависимость ε_{tn} скандия от температуры: • – измерения авторов; штриховая линия и о – результат вычислительного эксперимента.

нием эффективности теплового излучения в жидкой фазе. В жидком состоянии ε_{tn} продолжает расти с увеличением температуры. Эксперимент был остановлен при достижении температуры 2394 К. Поведение ε_{tn} в жидкой фазе объясняется наличием двух конкурирующих механизма рассеивания электронов. Первый механизм зонного типа, связанный с переходом s-электронов в d-зону, Ps – d и второй – обусловлен рассеиванием электронов на магнитных неоднородностях, в частности парамагнонах Re – рт [22]. Литературный поиск экспериментальных данных по ε_{tn} Sc, проведенный авторами, не дал результата.

Результаты вычислительного эксперимента, проведенного с использованием приближения Фута [23], также представлены на рис. 1. Это приближение связывает ε_{tn} с удельным электрическим сопротивлением – ρ при фиксированной температуре. Однако расчеты, выполненные на основе значений ρ из [10], дали завышенные результаты в области твердой фазы. В области фазового перехода, используя единичное значение ρ из [24], полученная ε_{tn} не позволяет сделать вывод о характере поведения ИС в точке плавления. Расчет по жидкой фазе металла не проводился в связи с отсутствием данных по ρ .

Полученные данные по Y приведены на рис. 2. Эксперимент показал, что ε_{tn} Y возрастает с увеличением температуры, достигая скачка при фазовом переходе в области температуры 1795 К. Здесь ε_{tn} увеличивается на ~ 21% по сравнению с твердой фазой. Полиморфный переход $\alpha\rightarrow\beta$ Y, известный при температуре ~ 1750 К [10, 25], не был зарегистрирован. После плавления рост ε_{tn} продолжался вплоть до температуры 2359 К. Температурное поведение ε_{tn} в значительной мере определяется изменениями длины свободного пробега электронов, что отражается в росте эффективности излучения металла. Это согласуется с аналогичным поведением ε_{tn} скандия. В области точки плавления показан результат единичного измерения ε_{tn} [26]. Отсутствие полного совпадения данных объясняется разницей

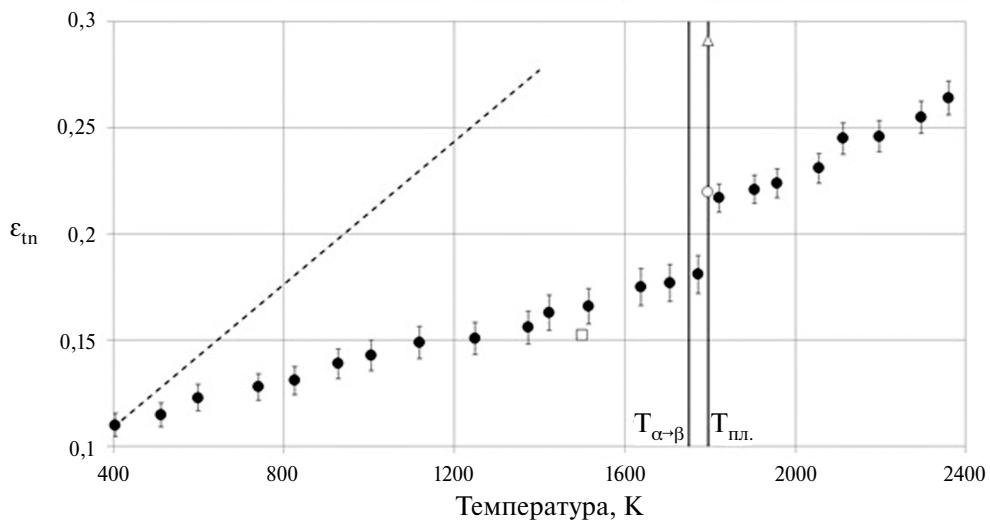


Рис. 2. Зависимость ε_{tn} иттрия от температуры: • – измерения авторов; Δ – измерения [25] штриховая линия, \square и \circ – результат вычислительного эксперимента.

в химической чистоте образцов, а также различиями в методиках и технических характеристиках используемых установок.

На основе данных по ρ [10], вычислительный эксперимент показал завышенные значения ε_{tn} для твердой фазы. Это, по мнению авторов, связано с упрощениями используемого приближения, игнорирующего особенности межатомных взаимо-

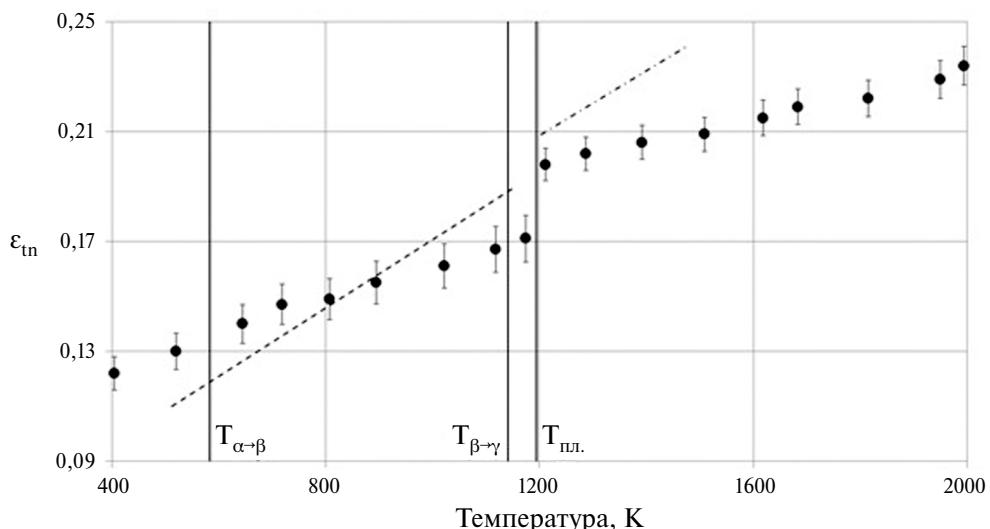


Рис. 3. Зависимость ε_{tn} лантана от температуры: • – измерения авторов; штриховая и штрихпунктирная линии – результат вычислительного эксперимента.

действий и поверхностных эффектов. Однако в точке фазового перехода значение, рассчитанное по данным ρ из [24], демонстрирует сходимость с экспериментальными данными в пределах погрешности измерений. Также единичное значение ϵ_{tn} в твердой фазе при температуре 1500 К, рассчитанное по ρ из [27], хорошо согласуется с экспериментом.

Исследование La выявило характерные для металлов особенности изменения ϵ_{tn} с температурой (рис. 3). ИС демонстрирует устойчивый рост. В твердой фазе плотность электронных состояний на уровне Ферми ограничивается влиянием регулярной кристаллической структуры. При плавлении происходит резкий рост плотности доступных состояний за счет увеличения подвижности электронов, что приводит к более эффективному поглощению и излучению электромагнитной энергии. Наличие в области температуры 1194 К скачка ϵ_{tn} , который составляет $\sim 27\%$ относительно значений твердой фазы связано с достижением максимума плотности состояний на уровне Ферми. Это явление обусловлено перераспределением электронных состояний при фазовом переходе, когда разрушение кристаллической решетки вносит значительные изменения в электронную структуру материала. Полиморфные переходы $\alpha \rightarrow \beta$, $\beta \rightarrow \gamma$ La, известные при температурах соответственно ~ 583 К и ~ 1140 К [10, 25], не были зарегистрированы по причине, указанной в обсуждении Sc. Устойчивый рост ϵ_{tn} в жидкой фазе объясняется снижением рассеяния электронов, вызванного неупорядоченной структурой, и увеличением вклада термически возбуждаемых состояний. Это согласуется с общей тенденцией для жидкокометаллических систем [11, 28]. Рост ϵ_{tn} продолжается вплоть до температуры 1994 К.

Результаты вычислительного эксперимента, в данном случае адекватно описывают температурное поведение ϵ_{tn} . Значения ρ для твердой фазы взяты из [29], для жидкого состояния из [24].

В табл. 2, 3 и 4 сведены численные экспериментальные значения ϵ_{tn} исследованных металлов в зависимости от температуры.

Представленные выше экспериментальные данные по химически чистым металлам имеют первостепенное значение для изучения их ИС в условиях высоких температур и фазовых переходов. Хотя эти результаты преподносятся авторами статьи как предварительные, они дают важное представление о фундаментальных процессах,

Таблица 2. Значения ϵ_{tn} скандия

T, K	ϵ_{tn}								
400	0.080	784	0.122	1267	0.163	1801	0.225	2120	0.310
452	0.089	851	0.129	1327	0.171	1825	0.262	2150	0.323
510	0.092	906	0.133	1405	0.175	1846	0.265	2190	0.327
549	0.099	966	0.139	1499	0.184	1862	0.269	2300	0.362
615	0.102	1018	0.146	1567	0.189	1930	0.277	2394	0.396
675	0.111	1125	0.149	1655	0.197	1980	0.283		
738	0.116	1193	0.156	1711	0.210	1999	0.295		

Таблица 3. Значения ε_{tn} иттрия

T, K	ε_{tn}								
405	0.110	928	0.139	1423	0.163	1822	0.217	2198	0.246
512	0.115	1006	0.143	1516	0.166	1905	0.221	2296	0.255
598	0.123	1118	0.149	1638	0.175	1957	0.224	2359	0.264
741	0.128	1248	0.151	1707	0.177	2056	0.231		

Таблица 4. Значения ε_{tn} лантана

T, K	ε_{tn}								
405	0.122	808	0.149	1174	0.171	1508	0.209	1949	0.229
521	0.130	895	0.155	1211	0.198	1618	0.215	1994	0.234
645	0.140	1022	0.161	1286	0.202	1683	0.219		
718	0.147	1118	0.167	1391	0.206	1814	0.222		

происходящих в металлах. Исследованные металлы подгруппы скандия имеют одну общую тенденцию по росту ИС как в твердой фазе, так и в жидком состоянии металлов. Величина скачкообразного изменения ИС при фазовом переходе у каждого металла индивидуальна [11, 28] и, по мнению авторов статьи, зависит от положения элемента в Периодической системе. Скачкообразные изменения ИС при температуре плавления могут быть интерпретированы как следствие значительных энергетических преобразований, включая высвобождение скрытой теплоты и перестройку электронной структуры металла. Проведенный теоретический подход к расчету ИС металлов показал, что единственный способ получения данных по тепловому излучению остается только эксперимент. Результаты исследования позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего изучения тепловых свойств переходных металлов. Таким образом, тепловое излучение металлов — это сложный процесс, отражающий их внутреннюю структуру и взаимодействие с внешней средой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные авторов по исследованным металлам могут быть интерпретированы как полученные впервые и носят предварительный характер, требующий уточнения. Заложена основа для дальнейшего углубленного анализа тепловых свойств металлов. В рамках фундаментальной металлофизики открывает перспективы уточнения моделей теплового излучения, изучения роли фазовых переходов. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на улучшении экспериментальных методик и уточнении теоретических подходов для обеспечения более точного описания наблюдаемых явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. NY.: Taylor & Francis. 2010.
2. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат. 1991.
3. Michael F. Modest. Radiative heat transfer. NY.: McGraw-Hill. 1993.
4. Anhalt K., Mariacarla A., Jochen M. and etc. Measuring spectral emissivity up to 4000 K // High temperatures-high pressures. 2024. **53**. № 3. P. 255–270. <https://doi.org/10.32908/hthp.v53.1619>
5. Eber A., Pichler P., Pottlacher G. Re-investigation of the normal spectral emissivity at 684,5 nm of solid and liquid molybdenum // Int. J. Thermophys. 2021. **42**. № 17. P. 7.
6. Fukuyama H., Higashi H., Yamano H. Normal spectral emissivity, specific heat capacity, and thermal conductivity of type 316 austenitic stainless steel containing up to 10 mass % B4C in a liquid state // Journal of Nuclear Materials. 2022. **568**. № 5. P. 12.
7. Adachi M., Yamagata Y., Watanabe M. and etc. Composition dependence of normal spectral emissivity of liquid Ni – Al alloys // ISIJ International. 2021. **61**. № 3. P. 684–689.
8. Ishikawa T., Koyama C., Nakata Y. and etc. Spectral emissivity, hemispherical total emissivity and constant pressure heat capacity of liquid vanadium measured by an electrostatic levitator // J. Chem. Thermodynamics. 2021. **163**. 106598. P. 7.
9. Ishikawa T., Koyama C., Nakata Y. and etc. Spectral emissivity and constant pressure heat capacity of liquid titanium measured by an electrostatic levitator // J. Chem. Thermodynamics. 2019. **131**. P. 557–562.
10. Зиновьев В.Е. Термофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.
11. Регель А.Р., Глазов В.М. Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1978.
12. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. М.: Металлургия, 1991.
13. Михайличенко А.И., Михлин Е.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987.
14. Yellapu V. Murty, Mary Anne Alvin, Jack P. Lifton. Rare earth metals and minerals industries: status and prospects. Cham: Springer, 2024.
15. Косенков Д.В., Сагадеев В.В., Аляев В.А. Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы // Термофизика и аэромеханика. 2021. **28**. № 6. С. 951–956.
16. Косенков Д.В., Сагадеев В.В. Исследование излучательной способности циркония и гафния в широком диапазоне температур // Журнал технической физики. 2024. **24**. № 8. С. 1356–1361.
17. Косенков Д.В., Сагадеев В.В. Зависимость нормальной интегральной излучательной способности группы щелочных металлов от температуры // Термофизика и аэромеханика. 2024. **31**. № 4. С. 817–825.
18. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. 1991.
19. Физическое металловедение. Том 1: Атомное строение металлов и сплавов / Под ред. Кана Р.У., Хаазена П. М.: Металлургия, 1987.
20. Mardon P.G., Nichols J.L., Pearce J.H. and etc. Some Properties of Scandium Metal // Nature. 1961. **189**. P. 566 – 568.
21. Kammler D.R., Rodriguez M.A., Tissot R.G. and etc. In situ time of flight neutron diffraction study of high-temperature α -to- β phase transition in elemental scandium // Metallurgical and materials transactions A. 2008. **39**. № 12. P. 2815 – 2819.

22. Зиновьев В.Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия. 1984.
23. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия. 1974.
24. Takamichi I., Roderick I.L. Guthrie. The thermophysical properties of metallic liquids. Vol. 2: Predictive models. Oxford: Oxford University Press. 2015.
25. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф., Наумкин О.П. Физико-химические свойства редкоземельных металлов, скандия и иттрия // Успехи физических наук. 1963. **79**. № 2. С. 263–293.
26. Ishikawa T., Watanabe Y., Koyama C. and etc. Constant pressure heat capacity of molten yttrium measured by an electrostatic levitator // In. Journal of Microgravity Science and Application. 2023. **40**. № 2. Р.11.
27. Ивлев А.Д. Электрическое сопротивление редкоземельных металлов и их сплавов при высоких температурах: роль магнитного рассеяния // Физика твердого тела. 2020. **62**. № 10. С. 1587–1593.
28. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988.
29. Spedding F.H., Daane A.H., Herrmann K.W Electrical resistivities and phase transformations of lanthanum, cerium, praseodymium and neodymium // JOM. 1957. **9**. P. 895 – 897.

EMISSIVITY OF ELEMENTS OF THE SCANDIUM SUBGROUP

D. V. Kosenkov*, V. V. Sagadeev

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kazan National Research Technological University”, Kazan, Russia*

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

The results of an experimental study of the normal integral emissivity of metals of the scandium subgroup: scandium, yttrium and lanthanum in a wide range of solid–liquid temperatures, including the phase transition, are presented. The study is due to the lack of data on the normal integral emissivity of metals in periodicals and reference publications. The interest in the metals under study is also related to their unique physico-chemical properties, which make them promising for use in high-temperature systems. The authors of the article interpret the presented data as obtained for the first time, and they are preliminary in nature, requiring clarification. The measurement method is radiation, the method of heating samples is resistive. The experimental error is $\pm 3\text{--}5\%$. Measurements of the solid phase of metals were carried out in a vacuum, the liquid phase was studied in an atmosphere of specially prepared gas – argon. Graphical illustrations and numerical values of the results are presented. The obtained complex data on the normal integral emissivity within each of the phases of the metal state are monotonously increasing. This behavior of the normal integral emissivity is associated with structural changes in crystal lattices due to an increase in temperature. In the region of the solid–liquid phase transition, a jump in the normal integral emissivity was detected for each of the metals studied. In this case, the jump is associated with a sharp increase in free electrons during the restructuring of the metal structure due to melting, and the magnitude of the jump as a percentage of the solid phase is individual for each metal. All the results of the study have been analyzed and discussed. Numerical simulation based on classical electromagnetic theory using the Foot approximation is carried out, the results of which are compared with experimental values. It is concluded that the theoretical calculation of the emissivity qualitatively, but not quantitatively, makes it possible to describe the behavior of the emissivity of metals,

provided that the values of the specific electrical resistance of metals in a given temperature range are known.

Keywords: emissivity, scandium, yttrium, lanthanum, solid phase, liquid phase, phase transition region

REFERENCES

1. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. NY.: Taylor & Francis. 2010.
2. Bloh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem (Heat exchange by radiation). M.: Energoatomizdat. 1991. [In Russian]
3. Michael F. Modest. Radiative heat transfer. NY.: McGraw-Hill, 1993.
4. Anhalt K., Mariacarla A., Jochen M. and etc. Measuring spectral emissivity up to 4000 K // High temperatures-high pressures. 2024. **53**. № 3. P. 255–270.
5. Eber A., Pichler P., Pottlacher G. Re-investigation of the normal spectral emissivity at 684,5 nm of solid and liquid molybdenum // Int. J. Thermophys. 2021. **42**. № 17. P. 7.
6. Fukuyama H., Higashi H., Yamano H. Normal spectral emissivity, specific heat capacity, and thermal conductivity of type 316 austenitic stainless steel containing up to 10 mass % B4C in a liquid state // Journal of Nuclear Materials. 2022. **568**. № 5. P.12.
7. Adachi M., Yamagata Y., Watanabe M. and etc. Composition dependence of normal spectral emissivity of liquid Ni – Al alloys // ISIJ International. 2021. **61**. № 3. P. 684–689.
8. Ishikawa T., Koyama C., Nakata Y. and etc. Spectral emissivity, hemispherical total emissivity and constant pressure heat capacity of liquid vanadium measured by an electrostatic levitator // J. Chem. Thermodynamics. 2021. **163**. 106598. P. 7.
9. Ishikawa T., Koyama C., Nakata Y. and etc. Spectral emissivity and constant pressure heat capacity of liquid titanium measured by an electrostatic levitator // J. Chem. Thermodynamics. 2019. **131**. P. 557–562.
10. Zinov'ev V.E. Teplotofizicheskie svojstva metallov pri vysokih temperaturah (Thermophysical properties of metals at high temperatures). M.: Metallurgiya, 1989. [In Russian]
11. Regel' A.R., Glazov V.M. Periodicheskij zakon i fizicheskie svojstva elek-tronnnyh rasplavov (Periodic law and physical properties of electron melts). M.: Nauka, 1978. [In Russian]
12. Zelikman A.N., Korshunov B.G. Metallurgiya redkih metallov (Metallurgy of rare metals). M.: Metallurgiya, 1991. [In Russian]
13. Mhajlichenko A.I., Mihlin E.B., Patrikeev YU.B. Redkozemel'nye metally (Rare earth metals) M.: Metallurgiya. 1987. [In Russian]
14. Yellapu V. Murty, Mary Anne Alvin, Jack P. Lifton. Rare earth metals and miner-als industries: status and prospects. Cham: Springer, 2024.
15. Kosenkov D.V., Sagadeev V.V., Alyaev V.A. The degree of blackness of a number of metals of group VIII of the periodic system. // Thermophys. Aeromech. 2021. **28**. P. 907–912.
16. Kosenkov D.V., Sagadeev V.V. Investigation of the emissivity of zirconium and hafnium in a wide temperature range // Technical Physics. 2024. **69**. № 8. C. 1255–1260.
17. Kosenkov D.V., Sagadeev V.V. Zavisimost' normal'noj integral'noj izluchatel'noj sposobnosti gruppy shchelochnyh metallov ot temperatury (Dependence of the normal integral emissivity of the alkali metal group on temperature) // Teplofizika i aeromekhanika (Thermal physics and aeromechanics). 2024. **31**. № 4. P. 817–825. [In Russian]
18. Novickij P.V., Zografi I.A. Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij (Estimation of measurement results errors). L.: Energoatomizdat, 1991. [In Russian]

19. Fizicheskoe metallovedenie. Tom 1: Atomnoe stroenie metallov i splavov (Physical metallurgy. Volume 1: Atomic structure of metals and alloys) / ed. by Kan R.U., Haazen P. M.: Metallurgiya, 1987. [In Russian]
20. Mardon P.G., Nichols J.L., Pearce J.H. and etc. Some Properties of Scandium Metal // Nature. 1961. **189**. P. 566–568.
21. Kammler D.R., Rodriguez M.A., Tissot R.G. and etc. In situ time of flight neutron diffraction study of high-temperature α -to- β phase transition in elemental scandium // Metallurgical and materials transactions A. 2008. **39**. № 12. P. 2815–2819.
22. Zinov'ev V.E. Kineticheskie svojstva metallov pri vysokih temperaturah (Kinetic properties of metals at high temperatures). M.: Metallurgiya, 1984. [In Russian]
23. Izluchatel'nye svojstva tverdyh materialov (Radiative properties of solid materials) / Ed. by A.E. Shejndlin. M.: Energiya, 1974. [In Russian]
24. Takamichi I., Roderick I.L. Guthrie. The thermophysical properties of metallic liquids. Vol. 2: Predictive models. Oxford: Oxford University Press, 2015. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198729846.001.0001>
25. Savitskiy E.M., Terekhova V.F., Naumkin O.P. Physico-chemical properties of the rare-earth metals, scandium, and yttrium // Physics—Uspekhi. 1963. **6**. № 1. P. 123–142.
26. Ishikawa T., Watanabe Y., Koyama C. and etc. Constant pressure heat capacity of molten yttrium measured by an electrostatic levitator // In. Journal of Microgravity Science and Application. 2023. **40**. № 2. P. 11. <https://doi.org/10.15011/jasma.40.400201>
27. Ivliev A.D. Electric resistance of rare-earth metals and their alloys at high temperatures: the role of magnetic scattering. Phys. Solid State. 2020. **62**. № 10. P. 1755–1761.
28. Grigorovich V.K. Metallicheskaya svyaz' i struktura metallov (Metallic bond and structure of metals). M.: Nauka, 1988. [In Russian]
29. Spedding F.H., Daane A.H., Herrmann K.W Electrical resistivities and phase transformations of lanthanum, cerium, praseodymium and neodymium // JOM. 1957. **9**. P. 895–897.