

0.5

Тепловое излучение ряда тугоплавких металлов

© Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев

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

Поступило в Редакцию 20 марта 2024 г.
В окончательной редакции 14 марта 2025 г.
Принято к публикации 19 марта 2025 г.

С целью расширения существующих температурных диапазонов проведено экспериментальное исследование нормальной интегральной излучательной способности переходных металлов V группы Периодической системы (ванадия, ниобия и тантала) вплоть до температуры предплавления. Представлены графические иллюстрации результатов эксперимента для каждого из исследованных металлов. Полученные авторами данные по излучательной способности демонстрируют монотонное возрастание в исследованном температурном диапазоне. Результаты обсуждены и сопоставлены с литературными данными других авторов. Проведен расчет и выполнен сравнительный анализ излучательной способности исследованных металлов с использованием приближения Фута.

Ключевые слова: ванадий, ниобий, тантал, излучательная способность, твердая фаза, температурная зависимость, приближение Фута.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60653.91-24

Введение

Проектирование, изготовление и эксплуатация высокотемпературных машин и установок невозможны без точного знания излучательных характеристик используемых материалов [1]. Излучательная способность металлов в широком диапазоне температур определяет характер лучистого теплообмена и позволяет проводить расчеты, направленные на интенсификацию и повышение энергоэффективности технологических процессов [2]. В связи с этим создание и пополнение базы данных по излучательной способности металлов в широком диапазоне температур становится не только актуальной задачей, но и стратегически важной необходимостью. Исследования такого рода являются ключевым инструментом для изучения межчастичного взаимодействия и атомарного движения в металлах, что позволяет установить взаимосвязь между их микроскопическими процессами и макроскопическими физико-химическими свойствами.

В настоящей работе с целью исследования температурных зависимостей индивидуальных свойств металлов с плотно упакованной кристаллической решеткой проведены измерения нормальной интегральной излучательной способности (ϵ_{tm}) полированных образцов переходных металлов — ванадия, ниобия и тантала. В работе значительно расширен температурный диапазон по сравнению с имеющимися данными в открытой литературе для твердой полированной фазы. Исследованный температурный диапазон составил от 400 до 2800 К и был ограничен техническими возможностями экспериментальной установки.

Ванадий широко применяется в атомной энергетике для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов, трубопроводов жидких теплоносителей и ответственных теплонагруженных деталей [3–5]. Производство и применение ниобия в настоящее время активно расширяется благодаря уникальным физико-химическим свойствам этого металла: высокой тугоплавкости, геттерной способности, хорошей обрабатываемости холодным давлением и свариваемости. Эти свойства делают ниобий востребованным в космической и атомной отраслях машиностроения [3–5]. Тантал — элемент с высокой атомной плотностью. Благодаря его свойствам он находит широкое применение в современном машиностроении, а также в космической и атомной промышленности [3–5]. Повышенная химическая стойкость тантала к кислотам используется в производстве драгоценных металлов, таких как золото и серебро.

В табл. 1 приведены физико-химические характеристики исследованных образцов металлов.

Проведенный авторами настоящей работы анализ литературных данных показал ограниченное количество

Таблица 1. Физико-химические характеристики образцов

Металл	Химическая чистота, %	T_{melt} , К	Шероховатость поверхности образца, μm
Ванадий	99.3	2220 [6]	0.01
Ниобий	99.8	2745 [7]	
Тантал		3280 [7]	

работ, посвященных исследованию ε_{tn} рассмотренных элементов. Сопоставление и обсуждение полученных результатов с имеющимися литературными данными представлены в последующих разделах.

1. Экспериментальные условия

Измерения проводились на установке, конструкция которой подробно описана в публикации [8]. Методика эксперимента соответствует методике, изложенной авторами в работе [9]. Экспериментальная ячейка с образцом предварительно откачивалась до давления 10^{-5} Па, после чего заполнялась инертным газом — аргоном до давления 1 atm. В течение эксперимента давление в ячейке постоянно контролировалось, а избыток газа дросселировался. Образцы металлов имели прямоугольную форму с размерами 20×40 мм и толщиной ~ 2 мм. Перед экспериментом они подвергались электромеханической полировке. Образцы размещались на середине резистивного нагревателя с предварительно отполированной контактной площадкой. Перед каждым замером теплового излучения проводилась обязательная изотермическая выдержка. Температурное поле образца контролировалось на протяжении всего эксперимента с помощью набора вольфрам-рениевых термопар, закерненных в образец.

Излучение образцов регистрировалось в температурном диапазоне от 400 до 2800 К — предельной температуры для используемой модели абсолютно черного тела, изготовленной из тантала. Модель представляла собой полый цилиндр с внутренним набором диафрагм (оптический нож) [10]. Конструкция модели обеспечивала равновесное излучение, а использование рифленого дна — пята наведения — позволило достичь расчетного значения $\varepsilon_0 = 0.962$ [11].

Следует отметить, что регистрация теплового потока с поверхности образцов и модели осуществлялась радиометром прямого видения без использования фокусирующей оптики. В связи с токсичностью ванадия все подготовительные операции с образцом этого металла проводились в лабораторном аспирационном боксе.

Степень достоверности представленных результатов определялась в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 8.736-2011, который применяется для оценки точности измерений в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Оценка излучательной способности металла описывалась функцией следующих величин:

$$\varepsilon_{tn} = f(\varepsilon_0, \alpha_{p1}, \alpha_{p2}), \quad (1)$$

где ε_0 — излучательная способность модели; α_{p1} — ТЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при замере излучения модели [V], α_{p2} — ТЭДС, развиваемая термоэлементом радиометра при замере излучения образца [V].

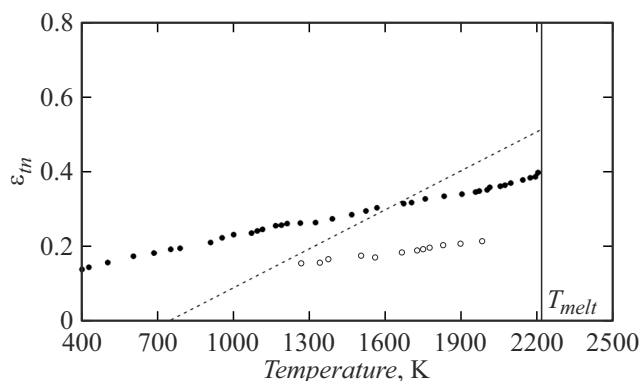


Рис. 1. Зависимость ε_{tn} ванадия от температуры: ● — измерения авторов; ○ — [12]; сплошная линия — расчет по приближению Фута.

Ввиду сложности вычислений погрешности измерений, авторы приводят итоговые результаты расчетов. Максимальная погрешность измерений составила 8 % при температуре 405 К, а минимальная — 5 % при температуре 2759 К.

2. Результаты и обсуждение

Излучательная способность ε_{tn} ванадия была измерена в интервале температур от 405 до 2200 К. Получена пологая монотонно возрастающая кривая изменения интенсивности от температуры (рис. 1). Сравнение экспериментальных данных, полученных в настоящем исследовании, с результатами работы [12] выявило совпадение только на качественном уровне. Экспериментальные значения, представленные в [12], аппроксимированы выражением следующего вида:

$$\varepsilon_{tn} = 0.107 + 0.005(T/1000) + 0.025(T/1000)^2. \quad (2)$$

Расхождение между результатами настоящего исследования и данными работы [12] обусловлено различиями в экспериментальном подходе, включая методику, чистоту образцов и состояние их поверхности. Основные параметры эксперимента, описанного в работе [12], представлены в табл. 2.

На рис. 1 также представлены результаты расчетов, выполненных авторами с использованием приближения Фута [13]. Приближение представляет собой функциональную зависимость ε_{tn} от удельного электрического

Таблица 2. Основные параметры эксперимента работы [12]

Химическая чистота образца, %	Погрешность эксперимента, %	Метод нагрева образца	Температурный диапазон исследования, К
99.9	± 5.5	Резистивный	1270–1986

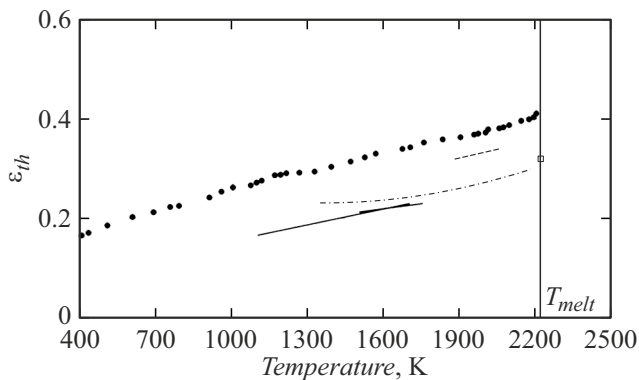


Рис. 2. Зависимость ε_{th} ванадия от температуры: • — пересчет измерений авторов; сплошные линии — [15]; штрихпунктирная линия — [16]; штриховая линия — [17]; □ — [18].

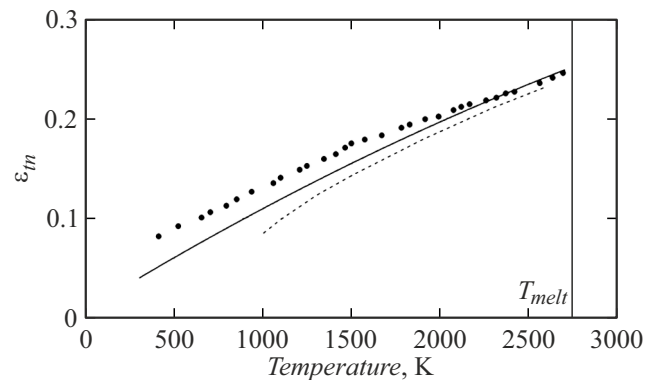


Рис. 3. Зависимость ε_{th} ниобия от температуры: • — измерения авторов; штриховая линия — [13]; сплошная линия — расчет по приближению Фута.

сопротивления r , $[\Omega \cdot m]$, и температуры T , $[K]$, и имеет вид

$$\varepsilon_{th} = 5.78\sqrt{rT} - 17.9rT + 44(rT)^{3/2}. \quad (3)$$

Значения удельного электрического сопротивления для расчета были взяты из работы [14], где они получены методом линейной аппроксимации экспериментальных данных, представленных в значительном количестве исследовательских работ. Расчетное значение ε_{th} пересекает экспериментальные данные при температуре 1670 K и демонстрирует завышение вплоть до температуры, предшествующей плавлению.

Проведенный авторами анализ литературных данных по теплофизическим свойствам ванадия выявил наличие исследований, посвященных интегральной полусферической излучательной способности (ε_{th}) в твердой фазе. На рис. 2 представлено графическое сопоставление результатов [17–20] с результатами пересчета экспериментальных значений авторов ε_{th} в ε_{th} по методике [2]. Формула для пересчета имеет вид:

$$\varepsilon_{th} = \frac{\varepsilon_{tn}}{0.755 + 0.533 \cdot \varepsilon_{tn}}. \quad (4)$$

Пересчет по формуле (4) представляет собой приближенную оценку, которая позволяет провести только качественное сравнение результатов и накладывает существенные ограничения на сходимость данных.

В работе [15] экспериментально полученные значения ε_{th} ванадия аппроксимированы двумя прямыми линиями с пересечением в точке 1600 K. На основе этих данных предложены выражения (5) и (6), причем заявленное среднее отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующих прямых составляет $\pm 0.14\%$.

$$\varepsilon_{th} = 0.052 + 1.05 \cdot 10^{-4}T, \quad (1100-1600 \text{ K}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{th} = 0.113 + 0.67 \cdot 10^{-4}T, \quad (1600-1750 \text{ K}). \quad (6)$$

Авторами работы [16] на основе анализа массива экспериментальных данных предложено аппроксимирующее выражение следующего вида, рекомендованное

для использования:

$$\varepsilon_{th} = 0.38 - 2.52 \cdot 10^{-4}T + 9.9 \cdot 10^{-8}(T^2/K^2), \quad (1350-2180 \text{ K}), \quad (7)$$

где K — коэффициент пропорциональности интервала температур исследования.

Автор работы [17] рекомендует использовать выражение, полученное путем линейной аппроксимации:

$$\varepsilon_{th} = -5.413 \cdot 10^{-2} + 1.93 \cdot 10^{-4}T, \quad (1880-2050 \text{ K}). \quad (8)$$

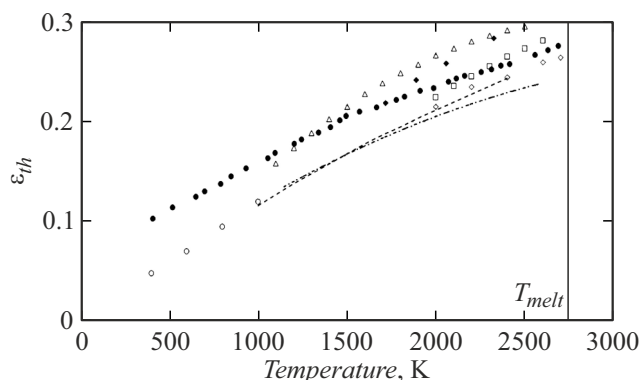
В работе [18] приведено единичное значение интенсивности излучения ванадия в точке плавления. На рис. 2 представлено лишь качественное совпадение роста значений ε_{th} , полученных в работах [15–18]. Это может быть связано с различиями в технических и методических подходах к проведению экспериментов, а также с разной химической чистотой образцов, что отражено в табл. 3.

При исследовании ε_{th} ниобия в интервале температур 410–2689 K была получена пологая монотонно возрастающая зависимость интенсивности от температуры (рис. 3). Результаты эксперимента авторов хорошо согласуются с рекомендованными данными, представленными в работе [13], начиная с температуры 2000 K и вплоть до температуры, предшествующей плавлению металла. Наблюдаемый рост ε_{th} ниобия может быть объяснен образованием разупорядоченных областей в кристаллической решетке металла в твердой фазе при нагреве.

На этом же рисунке представлены результаты расчета ε_{th} ниобия по приближению Фута. Для расчета использован усредненный массив значений удельного электрического сопротивления, взятый из работ [19–21]. Наблюдаемое поведение ε_{th} хорошо согласуется с общей температурной зависимостью.

Таблица 3. Основные параметры экспериментальных исследований ε_{th} ванадия, проведенных различными авторами

Работа	Химическая чистота образца, %	Погрешность эксперимента, %	Метод нагрева образца	Температурный диапазон исследования, К
[15]	99.82	$\pm 4-6.5$	Резистивный	1100–1750
[16]	99.7	Не заявлена	Электростатический	1350–2180
[17]	99.9	± 5	Импульсный	1880–2050
[18]	99.7	± 3	Электростатический	2220

**Рис. 4.** Зависимость ε_{th} ниобия от температуры: • — пересчет измерений авторов; штриховая линия — [13]; Δ — [20]; штрихпунктирная линия — [22]; $\circ$ — [23]; $\square$ — [24]; $\diamond$ — [25].

На рис. 4 представлен результат аналогичного пересчета ε_{th} в ε_{th} с использованием формулы (4). Наблюдается наглядное совпадение характера изменения ε_{th} с результатами, полученными другими авторами.

Авторы работы [24] представили результаты в виде сплошной кривой, описываемой квадратичной функцией:

$$\varepsilon_{th} = -0.118 + 2.305 \cdot 10^{-4}T - 2.936 \cdot 10^{-8}T^2. \quad (9)$$

Авторы работы [25] аппроксимировали экспериментальные данные во всем исследованном температурном диапазоне с использованием полинома следующего вида:

$$\varepsilon_{th} = 6.93 \cdot 10^{-2} + 7.93 \cdot 10^{-2}T. \quad (10)$$

Сводный график зависимости интенсивности ε_{th} демонстрирует, что в различных температурных интервалах прослеживается общая тенденция изменения излучательной способности ниобия от температуры. Имеющиеся расхождения авторы объясняют различиями в условиях проведения экспериментов, такими как степень шероховатости поверхности образцов в твердой фазе, возможное наличие окисных пленок на поверхности, процентное содержание основного элемента, а также различия в методиках исследований, включая способы нагрева образцов и приборное оформление регистрации теплового излучения с поверхности металлов. В табл. 4 обобщены обсуждаемые параметры экспериментов, проведенных различными исследователями для ниобия.

При исследовании ε_{th} тантала в интервале температур от 420 до 2759 К была получена плого возрастающая зависимость интенсивности излучения от температуры. Результаты представлены на рис. 5, и демонстрируют хорошее согласие с надежными справочными данными [13,22]. На этом же рисунке приведены результаты расчета ε_{th} тантала по приближению Фута. Для расчета использован усредненный массив значений удельного электрического сопротивления, взятый из работ [28–31].

На рис. 6 представлены результаты пересчета ε_{th} с использованием формулы (4). Сравнение значений ε_{th} с литературными данными выявило усредненную зависимость интенсивности излучения тантала от температуры.

Результаты, представленные в работе [26], по мнению авторов, демонстрируют завышенные значения в температурном диапазоне 1700–2300 К. Следует отметить, что данные, полученные авторами настоящей работы, также превышают рекомендованные значения [13,22], что, вероятно, связано с ранее упомянутыми причинами.

Авторы работы [32] рекомендуют использовать для расчета излучательной способности функциональное выражение вида:

$$\varepsilon_{th} = -3.739 \cdot 10^{-2} + 1.644 \cdot 10^{-4}T - 1.598 \cdot 10^{-8}T^2. \quad (11)$$

Автор работы [34] описывает свои экспериментальные результаты по излучательной способности тантала полиномом шестой степени.

Количественные расхождения по результатам ε_{th} тантала обусловлены следующими факторами: неидеальная оптическая гладкость поверхностей образцов, отклонения характеристик используемых моделей абсолютно черного тела, а также использование образцов с различным химическим составом и содержанием основного элемента [35–37]. Из вышеперечисленного следует, что только строгое соблюдение указанных условий обеспечивает корректное и достоверное получение результатов. В табл. 5 авторы частично обобщили обсуждаемые параметры экспериментов, проведенных различными исследователями для тантала.

Следует также отметить удовлетворительную работоспособность теоретического подхода, основанного на приближении Фута, для расчета ε_{th} твердой полированной фазы металлов. Проведенные расчеты во всех случаях демонстрируют качественное совпадение теоретиче-

Таблица 4. Основные параметры экспериментальных исследований ϵ_{th} ниобия, проведенных различными авторами

Работа	Химическая чистота образца, %	Погрешность эксперимента, %	Метод нагрева образца	Температурный диапазон исследования, К
[20]	99.99	± 2	Импульсный	1500–2600
[21]	99.9	± 3	Импульсный	1100–2500
[23]	99.9	Не заявлено	Электромагнитный	300–1000
[24]	99.999	± 2	Импульсный	2000–2600
[25]	99.9	$\pm 3–6$	Импульсный	2000–2700

Таблица 5. Основные параметры экспериментальных исследований ϵ_{th} тантала, проведенных различными авторами

Работа	Химическая чистота образца, %	Погрешность эксперимента, %	Метод нагрева образца	Температурный диапазон исследования, К
[26]	99.9	± 5	Импульсный	1100–2300
[28]	99.99	± 2	Импульсный	1900–3000
[32]	99.9	± 2	Импульсный	2000–2800
[33]	99.95	Не заявлено	Резистивный	2400–2800
[34,35]	99.98	± 2	Импульсный	1500–3200

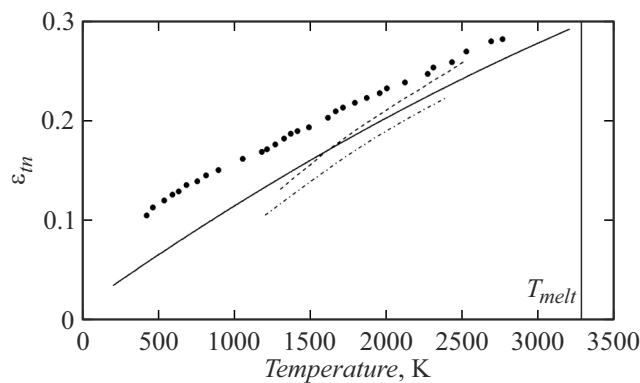


Рис. 5. Зависимость ϵ_{th} тантала от температуры: • — измерения авторов; штриховая линия — [13]; штрихпунктирная линия — [14]; сплошная линия — расчет по приближению Фута.

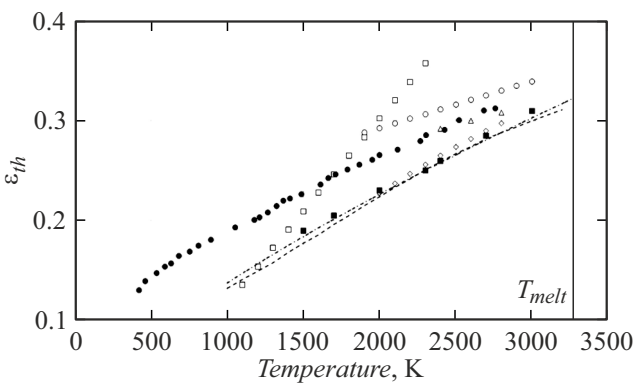


Рис. 6. Зависимость ϵ_{th} тантала от температуры: • — пересчет измерений авторов; штриховая линия — [13]; штрихпунктирная линия — [22]; □ — [26]; ○ — [28]; ◇ — [32]; △ — [33]; ■ — [34].

ских результатов с экспериментальными данными. Поскольку надежность теоретических расчетов напрямую зависит от точности используемых значений удельного электрического сопротивления (r) металлов, авторами был проведен тщательный отбор массива данных, использованных в расчетах.

Заключение

Целью настоящего исследования стало изучение нормальной интегральной излучательной способности (ϵ_{th}) полированных образцов ванадия, ниобия и тантала с существенным расширением температурных диапазонов по сравнению с работами других авторов. Были получе-

ны новые температурные зависимости ϵ_{th} для указанных металлов в интервале от 400 до 2800 К. Наблюдается монотонное увеличение значений ϵ_{th} с ростом температуры. Предельная температура исследования была ограничена техническими возможностями экспериментальной установки. Полученные данные требуют дальнейшего уточнения, а также расширения температурного диапазона в область жидкого состояния.

Опыт предыдущих исследований показал, что при изучении излучательной способности металлов необходимо строго учитывать такие факторы, как химический состав образца, чистота его поверхности и термические условия проведения экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Е. Шейндлин. *Проблемы новой энергетики* (Наука, М., 2006)
- [2] R. Siegel, J.R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer* (Taylor & Francis, NY., 2002)
- [3] Е.О. Адамов, Ю.Г. Драгунов, В.В. Орлов, Л.П. Абагян. *Машиностроение. Машиностроение ядерной техники* (Машиностроение, М., 2005), т. 4, кн. 1.
- [4] А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов. *Металлургия редких металлов* (Металлургия, М., 1991)
- [5] V.P. Bobkov, L.R. Fokin, E.E. Petrov, V.V. Popov, V.N. Rumiantsev, A.I. Savvatimsky. *Thermophysical properties of materials for nuclear engineering* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008)
- [6] Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев, Г.А. Хачкурузов, В.С. Юнгман, Г.А. Бергман, В.Ф. Байбуз, В.С. Иорин, Г.Н. Юрков, С.И. Горбов, Л.Ф. Куратова, Н.П. Ртищева, И.Н. Пржевальский, В.Ю. Зицерман, В.Я. Леонидов, Ю.С. Ежов, С.Э. Томберг, И.И. Назаренко, А.Л. Рогацкий, О.В. Дорофеева, М.С. Демидова. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*, справочное издание в 4-х т. (Наука, М., 1982), 3-е изд., перераб. и расширен., т. IV, кн. 1.
- [7] R.E. Bedford, G. Bonnier, H. Maas. *Metrologia*, **33** (2), 133 (1996). DOI: 10.1088/0026-1394/33/2/3
- [8] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *Теплофизика и аэромеханика*, **28** (6), 951 (2021). DOI: 10.1134/S0869864321060147
- [9] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. *ЖТФ*, **91** (7), 1090 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50949.9-21
- [10] Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. 2023. *ЖТФ*, **93** (10), 1434 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56281.42-23
- [11] Т. Бураковский, Е. Гизинский, А. Сая. *Инфракрасные излучатели*, пер. с польского (Энергия, ЛО, Л., 1978)
- [12] Э.Э. Шпильрайн, В.Э. Пелецкий, А.В. Костановский. *ТВТ*, **14** (1), 223 (1976).
- [13] А.Е. Шейндлин (общ. ред.). *Излучательные свойства твердых металлов*. Справочник (Энергия, М., 1974)
- [14] P.D. Desai, H.M. James, C.Y. Ho. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **13** (4), 1097 (1984). DOI: 10.1063/1.555724
- [15] Л.К. Воронин, А.Н. Меркулев, Б.Е. Неймарк. *ТВТ*, **8** (4), 780 (1970).
- [16] P.-F. Paradis, T. Ishikawa, T. Aoyama, Sh. Yoda. *J. Chem. Thermodynamics*, **34** (12), 1929 (2002). DOI: 10.1016/S0021-9614(02)00126-X
- [17] A. Cezairliyan, F. Righini, J.L. McClure. *J. Research National Bureau Standards — A. Phys. Chem.*, **78A** (2), 143 (1973). DOI: 10.6028/jres.078A.010
- [18] T. Ishikawa, C. Koyama, Y. Nakata, Y. Watanabe, P.F. Paradis. *J. Chem. Thermodynam.*, **163**, 106598 (2021). DOI: 10.1016/j.jct.2021.106598
- [19] В.Э. Пелецкий. *ТВТ*, **13** (2), 309 (1977).
- [20] A. Cezairliyan, J.L. McClure, C.W. Beckett. *J. Research National Bureau Standards — A. Phys. Chem.*, **75A** (6), 565 (1971). DOI: 10.6028/jres.075A.045
- [21] K.D. Maglic, N.L. Perovic, G.S. Vukovic, L.P. Zekovic. In. *J. Thermophysics*, **15** (3), 963 (1994). DOI: 10.1007/BF01447106
- [22] Y.S. Touloukian, D.P. DeWitt. *Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. Vol. 7. Thermophysical Properties of Matter*, ed. by Y.S. Touloukian, C.Y. Ho (IFI/Plenum, NY., 1970)
- [23] S.X. Cheng, P. Cebe, L.M. Hanssen, D.M. Riffen. *J. Opt. Society America*, **4** (3), 351 (1987). DOI: 10.1364/JOSAB.4.000351
- [24] T. Matsumoto, A. Cezairliyan, D. Basak. In. *J. Thermophys.*, **20** (3), 943 (1999). DOI: 10.1023/A:1022699622719
- [25] F. Righini, J. Spisiak, G.C. Bussolino, M. Gualano. *Intern. J. Thermophys.*, **20** (4), 1107 (1999). DOI: 10.1023/A:1022654804141
- [26] N.D. Milosevic, G.S. Vukovic, D.Z. Pavicic, K.D. In. *J. Thermophys.*, **20** (4), 1129 (1999). DOI: 10.1023/A:1022659005050
- [27] Б.Е. Неймарк, Л.К. Воронин. *ТВТ*, **6** (6), 1044 (1968).
- [28] A. Cezairliyan, J.L. McClure, C.W. Beckett. *J. Res. National Bureau Standards — A. Phys. Chem.*, **75A** (1), 1 (1971). DOI: 10.6028/jres.075A.001
- [29] В.А. Вертоградский. *ТВТ*, **10** (1), 77 (1972).
- [30] А.И. Савватимский. *ТВТ*, **59** (5), 686 (2021). DOI: 10.31857/S0040364421050173
- [31] R.E. Taylor, R.A. Finch. *J. Less Common Metals*, **6** (4), 283 (1964). DOI: 10.1016/0022-5088(64)90124-9
- [32] T. Matsumoto, A. Cezairliyan. *Intern. J. Thermophys.*, **18** (6), 1539 (1997). DOI: 10.1007/BF02575350
- [33] R.A. Allen, L.F. Glasier, P.L. Jordan. *J. Appl. Phys.*, **31** (8), 1382 (1960). DOI: 10.1063/1.1735847
- [34] H. Watanabe. *Thermochim. Acta*, **728**, 179594 (2023). DOI: 10.2139/ssrn.4505893
- [35] H. Watanabe, K. Morimoto, M. Watanabe, M. Kato, Y. Arita, K. Konashi. *Thermochim. Acta*, **639**, 178763 (2020). DOI: 10.1016/j.tca.2020.178763
- [36] H. Fukuyama. *High-Temperature Measurements of Materials* (Springer Ling, Berlin, 2009).
- [37] V. Sapritsky, A. Prokhorov. *Blackbody Radiometry* (Springer Ling, Cham, 2020).