

УДК 538.953

## **Зависимость нормальной интегральной излучательной способности группы щелочных металлов от температуры**

**Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

E-mail: Dmi-kosenkov@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования нормальной интегральной излучательной способности (НИИС) лития, натрия и калия при плавлении и в жидком состоянии. Метод исследования — радиационный. Проведен анализ сопоставления результатов эксперимента с теоретическим расчетом НИИС по приближению Фута. Приведены обобщения по поведению основных теплофизических свойств металлов в области точки плавления с положением щелочных металлов в Периодической системе.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, литий, натрий, калий, нормальная интегральная излучательная способность, твердая и жидкая фазы состояния, приближение Фута, периодический закон.

### **Введение**

Расчет лучистого теплообмена в теплонагруженных аппаратах, в частности, с возможностью эффективного повышения передачи тепловой мощности современных установок ядерного синтеза, невозможен без точного знания нормальной интегральной излучательной способности (НИИС) применяемых веществ при высоких температурах [1, 2]. При таких параметрах состояния само вещество находится, как правило, в жидкой фазе и может применяться, в частности, в активной зоне реактора в качестве жидкометаллического теплоносителя. Вышесказанное определяет необходимость и актуальность создания и расширения современной базы данных индивидуальных теплофизических характеристик применяемых веществ и металлов в широком температурном диапазоне.

### **Выбор объектов исследования**

Жидкие теплоносители используются как для отвода, так и для передачи от нагретой поверхности ТВЭЛов теплоты, образующейся в результате протекания ядерных реакций в активной зоне реактора. К физико-химическим свойствам теплоносителей предъявляют специальные требования: обладание большой собственной плотностью, высокой теплопроводностью и теплоемкостью, отсутствие коррозионной агрессии по отношению к конструкционным материалам активной зоны [3]. Широкое распространение

в качестве жидкометаллических теплоносителей получили литий, натрий и натрий-калийевый эвтектический сплав [4].

В настоящей статье представлено экспериментальное исследование нормально-направленной НИИС ( $\varepsilon_n$ ) щелочных металлов. Исследование посвящено изучению металлических лития, натрия и калия — элементов первого периода Периодической системы (ПС). Известно, что эти металлы в жидком состоянии отличаются относительно простым структурным строением, обусловленным состоянием ближнего порядка жидкой фазы [5, 6].

Проведенный авторами литературный обзор показал отсутствие надежных табулированных справочных данных по НИИС щелочных металлов, в отличие от данных по тугоплавким металлам (титан, цирконий, гафний и др.) [7–9]. Лишь по литию были проведены единичные измерения НИИС с противоречивым описанием полученных результатов [10].

В представленном исследовании использовались химически чистые щелочные металлы, основные физико-химические характеристики которых приведены в таблице.

**Таблица**  
**Характеристики исследованных металлов**

Характеристики	Вещество	Литий	Натрий	Калий
Содержание основного элемента, %		99,9	99,8	98,0
Температура плавления, К		453,6	371	336,8
Температура кипения, К		1616	1156	1047

### Выбор метода исследования и аспекты эксперимента

Методы экспериментального исследования характера поведения теплового излучения веществ в зависимости от температуры в конденсированной фазе состояния были развиты и проанализированы в работах [11] (метод левитационной капли), [2, 12, 13] (метод импульсного (быстрого) нагрева), [14, 15] (метод спектроскопии) и т.д. Перечисленные методы исследования теплового излучения веществ имеют ряд собственных достоинств и недостатков. Все они применяются при определенных условиях и ограничениях. К примеру, основным достоинством метода левитационной капли является отсутствие контакта исследуемого образца с нагревательным элементом, что исключает химический контакт между поверхностями. Метод быстрого нагрева вещества в течение нескольких микросекунд позволяет достичь очень высоких температур при неизменной форме и положении образца в пространстве даже в жидком состоянии. Вне зависимости от разнообразия методов изучения теплового излучения веществ дальнейшее их постоянное развитие востребовано и весьма значимо как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

Исследование авторов настоящей статьи выполнялось на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ». Описание установки по исследованию НИИС металлов, включая фазовый переход «твердое тело–жидкость» приводилось ранее в работе [16]. Был выбран радиационный метод исследования. Экспериментальное измерение проводилось в атмосфере подготовленного инертного газа — аргона. Метод является универсальным, и его рекомендуют применять практически для всех веществ и при любых температурах [7]. Суть метода заключается в сравнительном измерении приемником теплового излучения лучистой энергии, испускаемой исследуемым образцом и абсолютно черным телом.

Экспериментальная неопределенность измерений была оценена авторами и составляла  $5 \div 8$  % в зависимости от температуры опыта.

Основные составные части установки следующие: измерительная ячейка, пост вакуумной откачки, система подготовки и подачи инертного газа и аппаратный комплекс фиксации ТЭДС. Изготовленная измерительная ячейка представляла собой прямоугольный объем с установленными на верхнем фланце радиометром прямого видения и изолированными медными токовводами для закрепления резистивного нагревателя (танталовой полосы) лодочного типа [17]. Конструкция токовводов позволяла заменять резистивный нагреватель на модель абсолютно черного тела (далее — модель).

Известно, что на практике в качестве модели применяются различные по геометрии полости из материалов металлической или неметаллической природы [18–22]. Используемая в экспериментах модель представляла собой цилиндрический стакан. Длина модели составляла 100 мм, наружный диаметр — 30 мм. Площадь визирования радиометром доньшка модели формировалась пятью внутренними диафрагмами. Доньшко имело развитую поверхность (рельефность). Геометрические размеры и конструктивные особенности модели соответствовали рекомендациям [23], а именно: отношение длины модели к диаметру было больше единицы. Степень черноты модели не ниже 0,96. Нагрев модели осуществлялся стабилизированным током промышленной частоты.

Чувствительность и быстродействие радиометра — интегрального приемника излучения — определялись 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 термопар, отградуированных по образцовой платина-платинородиевой термопаре.

Пост вакуумной откачки включал в себя механический насос 2НВР-5ДМ и высоковакуумный струйный насос НВДМ-100. Указанные средства откачки позволяли создавать в ячейке давление не менее  $10^{-5}$  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.

К факторам повышенного внимания в эксперименте, значительно влияющим на НИИС образца, относятся: обеспечение изотермичности образца, направление площадки визирования НИИС, состояние шероховатости поверхности и непосредственная химическая чистота исследуемого металла [24, 25].

Авторами придавалось большое значение получению незагрязненных от окислов и гидроокислов поверхностей прямоугольного образца металла. Образец металла механически обрезался в специальной камере с избыточным давлением аргона и имел минимальный по времени воздушный контакт перед помещением в экспериментальную ячейку. Металл механически обрезался со всех сторон до состояния свободно-зеркальной поверхности и сразу помещался на подготовленный нагреватель.

Предварительный постепенный нагрев металла иногда приводил к появлению на поверхности зеркала расплава пленки, которая механически удалялась предусмотренным в конструкции ячейки скребком, установленным через вакуумный ввод в верхней крышке камеры. При невозможности получения чистой зеркальной поверхности металла опыт прекращался с полной заменой этого металла и повторялся с тщательной процедурой подготовки исследования вновь. Такой подход по методике исследования был применен ко всем исследованным металлам.

Состояние поверхности образца визуально оценивалось и контролировалось в течение всего опыта через боковые иллюминаторы измерительной ячейки. Температурное поле металла в опытах измерялось и контролировалось тремя радиально расположенными хромель-копелевыми термопарами, механически устанавливаемыми в приповерхностном слое металла.

Экспериментальные замеры проводились с периодичной воспроизводимостью 7–10 раз для среднестатистического значения. Максимальные температуры опытов для каждого из образцов ограничивались температурами, не превышающими температур образования димеров — сложных ассоциатов [26]. Возможное влияние паров металлов на НИИС в экспериментах не установлено.

### Теоретический расчет и обсуждение результатов эксперимента

Обзор существующих работ показал, что теоретические подходы расчета излучения веществ в рамках классической электромагнитной теории базируются на формулах Ашкинаса и Хагена–Рубенса [1, 7, 27]. Эти формулы позволяют теоретически рассчитать излучение конденсированной фазы вещества во всем диапазоне длин волн. В продолжении развития теории расчета используется приближение Фута [7]:

$$\varepsilon_n = 5,78\sqrt{rT} - 17,9rT + 44(rT)^{2/2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_n$  — НИИС,  $r$  — удельное электрическое сопротивление при температуре эксперимента [Ом·м],  $T$  — температура эксперимента [К]. Все перечисленные параметры относятся к металлическому образцу.

Известно, что тепловая энергия излучается, поглощается и отражается в тонком приповерхностном слое материала — площадке визирования. Это позволяет отнести все энергетические потоки, которые переносят энергию в единицу времени, к поверхности материала.

Результаты исследования зависимости  $\varepsilon_n$  от температуры по литию представлены на рис. 1. Поведение  $\varepsilon_n$  показывает рост до температуры 1293 К со скачкообразным изменением НИИС в области точки плавления. При плавлении происходит увеличение  $\varepsilon_n$  скачком на 20 % относительно твердой фазы.

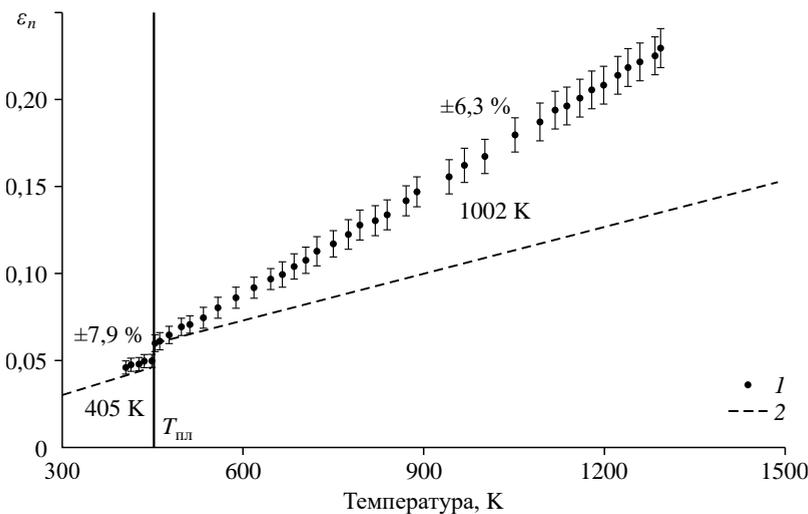


Рис. 1. Зависимость  $\varepsilon_n$  лития от температуры.

1 — результаты измерений авторов, 2 — данные расчета по приближению Фута;  
 $T_{пл}$  — температура плавления.

Результаты расчета  $\varepsilon_n$  по электромагнитной теории плохо согласуются с данными эксперимента и показывают лишь качественную картину поведения НИИС в твердой и жидкой фазах состояния образца лития.

Следует отметить, что в теоретическом расчете НИИС использовалось удельное электрическое сопротивление лития, найденное по соотношению, рекомендованному в работе [28], для области температур жидкой фазы (454 ÷ 1500 К) и имеющему вид:

$$r = (13,04 \pm 2,28) + (28,2 \pm 1,47) \cdot 10^{-3} \cdot T - (10,45 \pm 7,85) \cdot 10^{-7} \cdot T^2. \quad (2)$$

В расчете НИИС твердой фазы лития (от комнатной температуры до точки плавления) авторы использовали расчетное соотношение для  $r$ , рекомендованное в [29]:

$$r = 8,12 + 3,6562 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (3)$$

Экспериментальное исследование НИИС натрия показало увеличение  $\varepsilon_n$  в твердой фазе с положительным скачком на 26 % в области фазового перехода «твердое тело – жидкость». Видно, что рост  $\varepsilon_n$  натрия продолжается с увеличением температуры жидкой фазы вплоть до 948 К (см. рис. 2).

Проведенный расчет  $\varepsilon_n$  по приближению Фуа для НИИС натрия показал качественное схождение результатов в пределах погрешности опыта. Данные по удельному электрическому сопротивлению натрия в твердой фазе были взяты из работ [30, 31], данные по жидкой фазе — из [32].

Зависимость поведения НИИС калия от температуры (см. рис. 3) имеет вид, аналогичный зависимостям поведения НИИС для предыдущих щелочных металлов. При плавлении металла зафиксировано увеличение НИИС на 13 %. Температура опыта ограничена значением в 810 К.

Проведенный расчет  $\varepsilon_n$  по приближению Фуа для НИИС калия показал лишь качественное схождение результатов в пределах погрешности опыта. Данные по удельному электрическому сопротивлению калия в твердой фазе были взяты из работы [33], данные по жидкой фазе — из [32].

Отметим, что характерные скачки НИИС при фазовом переходе в процентном соотношении относительно твердой фазы примерно подобны и соответствуют изменению приращения энтропии твердой фазы к жидкой [34].

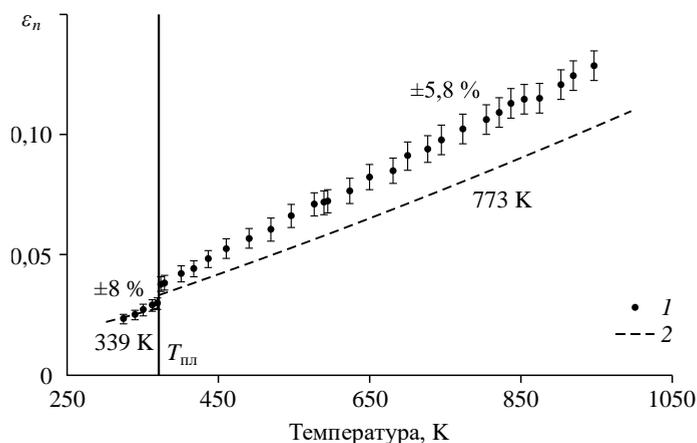
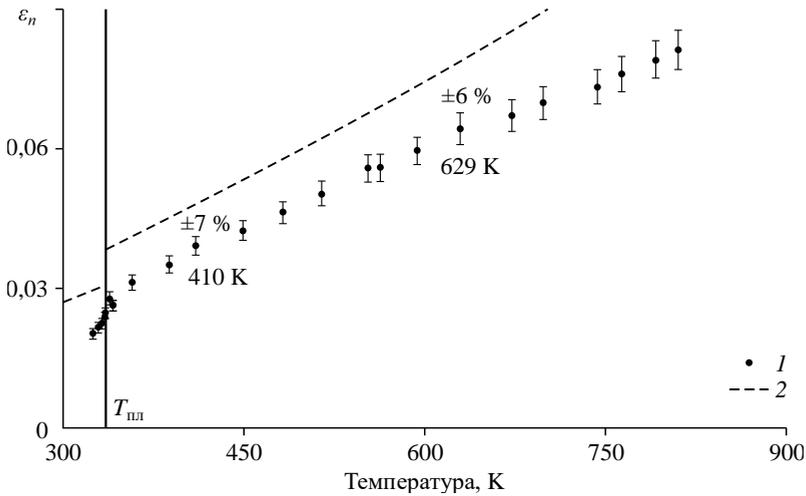


Рис. 2. Зависимость  $\varepsilon_n$  натрия от температуры.

Обозначения см. на рис. 1.

Рис. 3. Зависимость  $\epsilon_n$  калия от температуры.

Обозначения см. на рис. 1.

Скачкообразное поведение НИИС в области фазового перехода «твердое тело–жидкость» щелочных металлов характерно для металлов и других подгрупп Периодической системы, что было рассмотрено авторами в работах [16, 35].

### Периодичность свойств щелочных металлов

Известно, что изменение физико-химических свойств элементов происходит в результате периодического изменения строения внешних электронных оболочек с возрастанием заряда ядра, что нашло свое отражение в периодическом законе [36]. Каждый элемент Периодической системы является одновременно представителем ряда и участником подгруппы [26]. Все подгруппы содержат элементы с одинаковой конфигурацией внешних электронных оболочек атомов, но число электронов в атоме с ростом номера элемента в ПС постоянно увеличивается [37].

На основе периодического закона возможно прогнозирование теплофизических свойств жидких металлов путем построения и анализа зависимостей свойств от порядкового номера элемента в ПС [38].

На рис. 4 представлена сводная картина поведения теплофизических свойств рассматриваемых металлов в области точки плавления в зависимости от номера элемента в ПС. Показано, что поведение свойств (теплоемкости ( $C_{p,1}$ ), теплоты плавления ( $\Delta H_{пл}$ ), удельного электрического сопротивления ( $r_1$ ), теплового потока ( $q_1$ ) зависит от периодичности. Индекс 1 означает жидкое состояние металла при  $T_{пл}$ .

Опорные данные для щелочных металлов по  $C_{p,1}$  и  $\Delta H_{пл}$  были взяты из работ [26, 39],  $r_1$  — из [30–33, 40]. Тепловые потоки рассчитывались по закону Стефана–Больцмана [1]. Расчет  $q_1$  предполагает знание НИИС металлов в области точки плавления. Как было указано выше, данные по НИИС всей группы щелочных металлов в настоящее время в открытом доступе авторами не найдены, в частности, не обнаружены они по рубидию и цезию. По этой причине был проведен теоретический расчет НИИС упомянутых металлов по методике энтропийной обработки, основанной на теории размерностей, предложенной профессором А.Г. Усмановым [41] и впоследствии развитой профессором В.М. Глазовым [42]. Данная методика расчета НИИС применялась авторами статьи к элементам других подгрупп ПС и подробно была изложена в публикации [43].

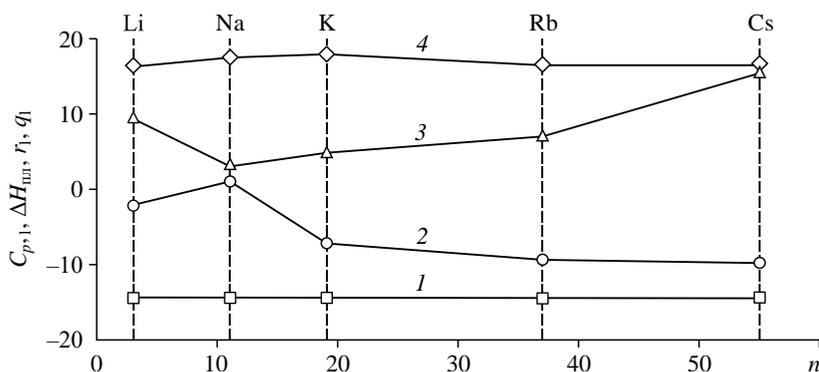


Рис. 4. График поведения периодичности теплофизических свойств щелочных металлов в области точки плавления (жидкая фаза).

1 — теплопроводность, 2 — теплопоток, 3 — удельное электрическое сопротивление, 4 — теплоемкость;  $n$  — порядковый номер элемента в ПС; для удобства интерпретации рассматриваемых параметров зависимости  $C_{p,l}$ ,  $\Delta H_{пл}$  разнесены по вертикальной шкале относительно  $r_1$  вверх и зависимости  $q_1$  — вниз.

На рис. 4 показано, что с возрастанием порядкового номера в ПС у одних щелочных металлов (лития, натрия, калия) наблюдается положительная динамика поведения  $C_{p,l}$ , другие (рубидий и цезий) имеют примерно равные значения [38]. Зависимость поведения  $\Delta H_{пл}$  для рассматриваемых металлов от порядкового номера в ПС монотонно убывает [38]. Данные по  $r_1$  для натрия, калия, рубидия и цезия периодически возрастают. Значение  $r_1$  лития значительно выбивается из общей динамики поведения. Это связано с менее интенсивным изменением длины свободного пробега электронов с ростом температуры жидкого лития, чем у других щелочных металлов [44]. Такое же anomальное поведение наблюдается у теплофизического параметра лития — теплопроводности — в сравнении с характеристиками других истинных щелочных металлов, что также было отмечено в работе [45]. По мнению авторов [45], этот вопрос остается открытым и требует более глубокого детального изучения.

Тепловые потоки в зависимости от номера элемента в ПС показывают монотонно убывающую кривую для натрия, калия, рубидия и цезия, что соответствует увеличению числа связанных с атомами электронов. Тепловой поток лития также аномально выделяется. Сравнение поведения НИИС и удельного электрического сопротивления демонстрирует подобность изменения свойств в области точки фазового перехода.

По мнению авторов, на основе выводов монографий [26, 37] понимание природы плавления вещества не может быть отождествлено лишь с мерой разупорядочения кристаллической решетки.

## Выводы

1. Проведен анализ существующих методов исследования НИИС веществ при высоких температурах.
2. Экспериментально исследовано поведение НИИС лития, натрия и калия при фазовом переходе «твердое тело — жидкость».
3. Установлено, что характер температурной зависимости НИИС у этих металлов различен и соответствует занимаемому положению металла в ПС.
4. Проведенное исследование показало, что НИИС щелочных металлов лития, натрия и калия ведет себя так же, как НИИС металлов других групп ПС. Зафиксировано

увеличение НИИС с ростом температуры и скачкообразное изменение в точке фазового перехода «твердое тело–жидкость». Это указывает на разупорядочение структуры кристаллической решетки и ослаблением сил межатомных связей при переходе из твердого состояния в жидкое [38].

5. Теоретический подход к расчету НИИС, рассмотренный авторами, дает возможность лишь качественного описания зависимости поведения НИИС металлов от температуры.

6. Проведенный сводный анализ теплофизических свойств металлов в области точки плавления наглядно согласуется с положением этих металлов в ПС.

7. Представленный материал иллюстрирует обобщающую роль периодического закона и его значение в научном прогнозе оценки теплофизических свойств неизученных жидких металлов.

### Список литературы

1. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / Под ред. Б.А. Хрусталева. Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.
2. Савватимский А.И., Коробенко В.Н. Высокотемпературные свойства металлов атомной энергетики: цирконий, гафний и железо при плавлении и в жидком состоянии. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 214 с.
3. Адамов Ю.Г., Драгунов В.В., Абалян Л.П. Машиностроение ядерной техники. Т. IV-25. В 2 кн. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
4. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1976. 328 с.
5. Баум Б.А. Металлические жидкости. М.: Наука, 1970. 120 с.
6. Ершов Г.С. Строение и свойства жидких и твердых металлов. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
7. Латыев Л.Н., Петров В.А., Чеховский В.Я., Шестаков Е.Н. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейншлина. М.: Энергия, 1974. 471 с.
8. Touloukian Y.S., DeWitt D.P. Thermal radiative properties-metallic elements and alloys. New York: Books on Demand, 1970. Vol. 7. 1540 p.
9. Pottlacher G. High temperature thermophysical properties of 22 pure metals // High Temperatures — High Pressures. 2022. Vol. 51, Iss. 1. P. 1–152.
10. Пришвицын А.С., Крат С.А., Харина А.П., Писарев А.А. Зависимость степени черноты лития от температуры в вакууме // ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, № 2. С. 89–95.
11. Watanabe M., Adachi M., Fukuyama H. Heat capacities and thermal conductivities of palladium and titanium melts and correlation between thermal diffusivity and density of states for transition metals in a liquid state // J. Molecular Liquids. 2021. No. 324. P. 115138–115150.
12. Cezairliyan A., Krishnan S., McClure J.L. Simultaneous measurements of normal spectral emissivity by spectral radiometry and laser polarimetry at high temperatures in millisecond-resolution pulse-heating experiments: Application to molybdenum and tungsten // Intern. J. Thermophysics. 1996. Vol. 17, No. 6. P. 1455–1473.
13. Boboridis K., Seifert A., Obst A.W., Basak D. Radiance temperature and normal spectral emittance (in the wavelength range of 1,5 to 5  $\mu\text{m}$ ) of rickel at its melting point by a pulse-heating technique // Intern. J. Thermophysics. 2007. Vol. 28. P. 683–696.
14. Дождиков В.С., Петров В.А. Метод скоростной спектроскопии для исследования излучательной способности полупрозрачных материалов в широком диапазоне изменения ее величины // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 5. С. 802–806.
15. Ходунков В.П. Метод измерения спектральной излучательной способности нагретых тел // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 1015–1021.
16. 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.
17. Косенков Д.В., Сагадеев В.В. Результаты измерения относительной излучательной способности ряда металлов подгруппы меди при температурах перехода через точку плавления // Журн. техн. физики. 2021. Т. 91, № 12. С. 1907–1909.
18. Гибин И.С., Котляр П.Е. Модели абсолютно черного тела (обзор) // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, № 2. С. 188–200.
19. Русин С.П., Пелецкий В.Э. Характеристики теплового излучения цилиндрических изотермических полостей с продольной пирометрической щелью // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, № 3. С. 452–456.

20. Galal Y.S., Sperfeld P., Metzendorf J. Measurement and calculation of the emissivity of a high-temperature black body // Metrologia. 2000. Vol. 37, No. 5. P. 365–368.
21. Костановский А.В., Нефедкина Л.Б., Костановская М.Е. Високотемпературная модель абсолютно черного тела // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 122–128.
22. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964. 223 с.
23. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели. Пер. с польск. Л.: Энергия, 1978. 408 с.
24. Агабабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства твердого тела со случайной шероховатостью. Эксперимент // Теплофизика высоких температур. 1975. Т. 13, № 2. С. 314–317.
25. Fukuyama H., Waseda Y. High-temperature measurements of materials. Berlin: Springer, 2008. 204 p.
26. Регель А.Р., Глазов В.М. Периодический закон и физические свойства расплавов. М.: Наука, 1978. 309 с.
27. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.
28. Чусов И.А., Бабаева Ю.А., Новиков Г.Е. Расчетные соотношения для определения термодинамических и транспортных свойств литиевого теплоносителя // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2022. № 4. С. 28–45.
29. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А. Литий. М.: Издат, 1999. 262 с.
30. Bradshaw F.J., Pearson S. The electrical resistivity of sodium between 78 K and 372 K // Proceedings of the Physical Soc. Section B. 2002. Vol. 69, No. 4. P. 441–448.
31. Addison C.C., Creffield G.K., Hubberstey P., Pulham R.J. Electrical resistivity of liquid and solid sodium // J. Chemical Soc. A: Inorganic, Physical, Theoretical. 1969. P. 1482–1487.
32. Соловьев А.Н. Экспериментальное определение электропроводности жидких натрия, калия и лития // Прикл. механика и технич. физика. 1963. № 1. С. 158–160.
33. Addison C.C., Creffield G.K., Pulham R.J. Electrical resistivity of liquid potassium and of solutions of sodium in liquid potassium: the potassium–sodium phase diagram // J. Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical. 1971. P. 2685–2688.
34. Хрущев Б.И. Структура жидких металлов. Ташкент: Фан, 1970. 110 с.
35. Косенков Д.В., Сагадеев В.В., Аляев В.А. Исследование теплового излучения элементов подгруппы титана с учетом фазовых переходов // Журн. техн. физики. 2021. Т. 91, № 7. С. 1090–1092.
36. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. 294 с.
37. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. М.: Высшая школа, 1998. 742 с.
38. Регель А.Р., Глазов В.М. Физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1980. 296 с.
39. Глушко В.П., Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкурузов Г.А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4 т. / 3-е изд., перераб. и расширен. Т. IV. Кн. 2. М.: Наука, 1986. 560 с.
40. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Metallurgia, 1989. 382 с.
41. Усманов А.Г. Об одном дополнительном условии подобия молекулярных процессов // Теплопередача и тепловое моделирование. М.: Изд. АН СССР, 1959. С. 298–312.
42. Глазов В.М. Энтропия плавления металлов и полупроводников. М.: Metallurgia, 1980. 172 с.
43. Косенков Д.В., Сагадеев В.В., Кашапов Н.Ф. Тепловое излучение ряда жидких металлов // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 6. С. 855–859.
44. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Тоцкий Е.Е., Тимрот Д.Л., Фомин В.А. Теплофизические свойства щелочных металлов. М.: Изд-во стандартов, 1970. 487 с.
45. Agazhanov A., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal conductivity of lithium, sodium and potassium in the liquid state // Physics and Chemistry of Liquids. 2020. Vol. 58, No. 6. P. 760–768.

*Статья поступила в редакцию 23 мая 2023 г.,  
после доработки — 25 января 2024 г.,  
принята к публикации 13 июня 2024 г.*