

УДК 536.3

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЯДА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

© 2022 г. Д. В. Косенков^{1, *}, В. В. Сагадеев¹, Н. Ф. Кашапов^{2, 3}¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия²Казанский федеральный университет, Казань, Россия³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Уточнена зависимость полусферической интегральной излучательной способности ϵ жидких металлов. Впервые данные расчета сопоставлены с последними экспериментальными результатами по ϵ для ряда металлов подгрупп меди и никеля Периодической системы Менделеева.

DOI: 10.31857/S0040364422060114

ВВЕДЕНИЕ

Базы данных по излучательной способности веществ в широком диапазоне температур и фазовых состояний необходимы для расчета теплообмена излучением в теплонагруженных аппаратах и установках. Например, в ядерных энергетических установках широкое применение нашли жидко-металлические теплоносители (литий, натрий, сплав свинца с висмутом и т.д.) в качестве теплоносителя первого контура активной зоны реакторов различных поколений [1–3]. В расчете сложного теплообмена таких установок необходимы данные о теплофизических характеристиках жидких металлов и сплавов. Одной из определяющих характеристик жидких металлов является коэффициент теплообмена излучением. Как показал анализ литературы [4, 5], надежные экспериментальные данные по интегральной полусферической излучательной способности приведены для ограниченного числа чистых металлов в узком температурном интервале.

Экспериментальное определение излучательной способности веществ связано с большими техническими и экономическими сложностями. Поэтому актуальной научной задачей является формирование теоретической базы, позволяющей разрабатывать методы обобщения экспериментальных данных по процессам теплового переноса излучением.

Излучательная способность жидких металлов и сплавов в настоящее время не имеет надежной теоретической базы. В ряде случаев для разработки методов расчета в жидкой фазе предлагается использовать модели, применяемые для твердых тел [4, 6]. Этим моделям свойственна неопределенность, которая сохраняется и усугубляется в жидкой фазе металла.

Обобщенные зависимости, построенные на основе принципа теплового подобия, могут позволить решить эту проблему и могут использоваться для разработки мощных энергетических установок.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В статье предложена уточненная зависимость расчета по экспериментальным данным авторов интегральных плотностей потока теплового излучения q ряда чистых жидких металлов. Рассматриваемая зависимость основана на методе подобия процессов молекулярного переноса, вывод которой не накладывает ограничений на вид фазы вещества [7]:

$$U = \varphi(S/R), \quad U = q/q_1. \quad (1)$$

Здесь S/R – безразмерная энтропия, приходящаяся на одну частицу вещества; U – относительный поток теплового излучения; q – полусферическая интегральная плотность теплового потока, рассчитанная по закону Стефана–Больцмана; q_1 – масштабный поток.

Под масштабным потоком q_1 понимается поток тепла через единицу слоя вещества при изменении энтропии металла на фазовой границе, т.е. энтропии плавления.

Функция φ в выражении (1) не является универсальной и изменяется при переходе от металла к металлу с разной электронной подсистемой.

Тепловое излучение расплава формируется в приповерхностном слое и обычно относится к 1 м^2 . При изменении температуры расплава изменяется число частиц металла, участвующих в формировании потока теплового излучения. Если q умно-

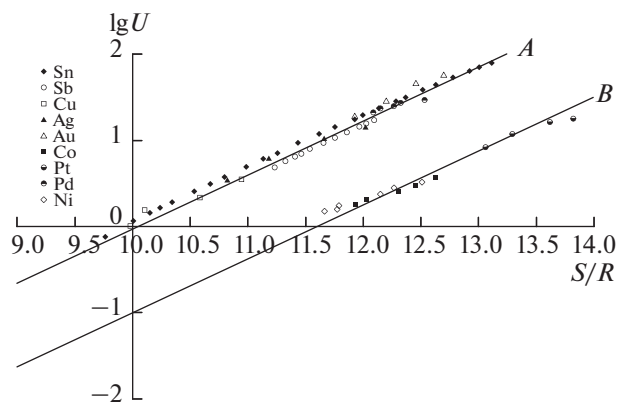


Рис. 1. Зависимости относительного потока теплового излучения от энтропии ряда жидких металлов: сплошные линии – по выражению (2).

жить на отношение $(\rho_{\text{пл.}}/\rho)^{2/3}$, то полученный тепловой комплекс q^* будет отнесен к постоянному числу излучающих частиц металла, где $\rho_{\text{пл.}}$, ρ – плотность металла при температуре плавления и текущей температуре эксперимента соответственно. Таким образом, функциональная зависимость (1) приобретает вид

$$U = q^*/q_1^*. \quad (2)$$

Функция (2) справедлива для каждого класса веществ [7, 8]. Если с повышением температуры в жидком металле происходят структурные преобразования, то масштабный поток q_1^* , определяемый числом излучаемых частиц металла, также должен изменяться с температурой.

Полученные масштабные потоки q_1^* жидких металлов являются постоянными множителями для расчета интегральной полусферической излучательной способности ϵ металлов.

Интегральная полусферическая излучательная способность ϵ для расчета q ряда жидких металлов находилась по известной методике [9]:

$$q = 5.67\epsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_n}{0.755 + 0.533\epsilon_n}, \quad (4)$$

где ϵ_n – нормальная интегральная излучательная способность металла.

Излучательная способность ϵ_n рассматриваемого ряда металлов в жидкой фазе (табл. 1) определена авторами экспериментально в [10–12]. Также использованы предыдущие результаты измерений ϵ_n ряда металлов из [13]. Метод измерения – радиационный. Погрешность эксперимента составила 3–8% в зависимости от температуры экс-

перимента. Температуры плавления и кипения металлов взяты из справочной литературы [14].

Значения энтропий жидких металлов представлены в [15–21], а значения плотностей металлов в точке плавления и при последующем увеличении температуры в [22–33].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Построение зависимости (2) для экспериментальных данных [10–12] по интегральным полусферическим потокам теплового излучения жидких металлов показаны на рис. 1. Начало отсчета по оси S/R принимается равным 10 и выбрано для удобства интерпретации графических зависимостей, так как начало отсчета по оси S/R может быть выбрано произвольно. Часть данных смещена по вертикальной оси вниз на единицу (линия B). Линия A изображена без смещения. Отношение S/R исследуемых металлов входило в интервал от 9 до 14.

В рассмотренном интервале $9 < S/R \leq 14$ для выбранного ряда металлов зависимость $U = q^*/q_1^*$ линейная. Если отношение S/R – вне этого диапазона, то линейная зависимость, как, например, у титана, циркония, щелочных металлов, полуметаллов, выпадает из общего поведения и поэтому не приводится.

Полученная графическая зависимость соответствует уравнению, полученному авторами:

$$\lg U = 0.627(S/R) - 6.297 \text{ при } 9 < S/R \leq 14. \quad (5)$$

Отклонения большинства данных от усредняющей линии (рис. 1) не превышает $\pm 6\%$, в отличие от данных [13], где отклонение составило порядка 8%. Объясняется это использованием авторами статьи последних более надежных данных по энтропии исследованных металлов.

Для ряда элементов точки при температурах, близких к температуре плавления, оказываются заниженными. Объяснить эти отклонения можно нестабильностью структуры жидких металлов.

Энтропия жидких металлов, применяемая в обработке, в основном рассчитывается по экспериментально полученным значениям теплоемкости. Погрешность экспериментально измеренных теплоемкостей металлов приводит к различным величинам применяемых энтропий и, как следствие, к отклонениям относительных потоков U от усредняющей линии. Из этого следует, что для расчета теплового излучения жидких металлов необходимы надежные экспериментальные данные по теплоемкости.

Строения многих жидких металлов вблизи температуры плавления схожи со строением их кристаллов в твердой фазе – состояние электронного газа. В процессе плавления металла с увеличением температуры постоянно растет число свобод-

Таблица 1. Экспериментальные значения нормальной интегральной излучательной способности ϵ_n металлов (жидкая фаза)

Металл	$T_{\text{эксп}}, \text{K}$	ϵ_n	Металл	$T_{\text{эксп}}, \text{K}$	ϵ_n	
Медь [11] $T_{\text{пл}} = 1356.5 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2840.0 \text{ K}$	1360	0.129	Индий [13] $T_{\text{пл}} = 429.7 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2345.0 \text{ K}$	650	0.119	
	1483	0.140		710	0.135	
	1589	0.151		807	0.150	
	1750	0.168		913	0.160	
Серебро [11] $T_{\text{пл}} = 1235.1 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2485.0 \text{ K}$	1240	0.105	Магний [13] $T_{\text{пл}} = 923.0 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 1363.0 \text{ K}$	935	0.089	
	1390	0.118		1008	0.093	
	1550	0.131		1117	0.115	
	1650	0.138		1201	0.131	
Золото [11] $T_{\text{пл}} = 1337.3 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 3129.1 \text{ K}$	1365	0.122	Кальций [13] $T_{\text{пл}} = 1112.0 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 1757.0 \text{ K}$	1304	0.143	
	1480	0.129		1130	0.137	
	1622	0.145		1200	0.152	
	1700	0.154		1310	0.163	
Олово [10] $T_{\text{пл}} = 503.9 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2893.0 \text{ K}$	506	0.098	Платина [12] $T_{\text{пл}} = 2041.4 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 4098.0 \text{ K}$	1402	0.170	
	548	0.109		2065	0.212	
	592	0.115		2200	0.230	
	650	0.123		2350	0.245	
	705	0.131		2400	0.253	
	780	0.141		1839	0.227	
	852	0.155	Палладий [12] $T_{\text{пл}} = 1828.5 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 3236.1 \text{ K}$	1878	0.232	
	934	0.162		1898	0.236	
	1004	0.171		1936	0.239	
	1081	0.182		1970	0.241	
	1150	0.192		Никель [12] $T_{\text{пл}} = 1726.0 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 3005.0 \text{ K}$	1766	0.240
	1277	0.211			1789	0.243
1305	0.216	1825	0.246			
1341	0.220	1935	0.265			
950	0.070	2007	0.274			
1023	0.076	2067	0.285			
Алюминий [13] $T_{\text{пл}} = 933.5 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2792.0 \text{ K}$	1055	0.082	Цинк [13] $T_{\text{пл}} = 692.6 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 1179.2 \text{ K}$	693	0.107	
	1103	0.088		720	0.112	
	1158	0.091		805	0.129	
	1200	0.095		910	0.155	
	1252	0.100		1002	0.162	
	1780	0.253		Свинец [10] $T_{\text{пл}} = 600.6 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 2022.0 \text{ K}$	616	0.149
1789	0.256	649	0.162			
1824	0.259	674	0.172			
1842	0.264	717	0.181			
1878	0.271	761	0.19			
1900	0.275	774	0.197			
1935	0.279	789	0.198			
1967	0.285					
2007	0.288					
2030	0.294					
2049	0.296					
Кобальт [12] $T_{\text{пл}} = 1768.0 \text{ K}$ $T_{\text{кип}} = 3143.0 \text{ K}$						

Таблица 2. Алгоритм расчета масштабного потока для жидкого золота

T, K	ε_n	ε	$q, \text{Вт/м}^2$	$\rho_{\text{пл}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$q^* = q \left(\frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho} \right)^{2/3}, \text{Вт/м}^2$	$S, \frac{\text{Дж}}{\text{К моль}}$	S/R	$q_1^*, \text{Вт/м}^2$
эксперимент		по (4)	по (3)	[22]		—	[17]	—	—
1365	0.122	0.146	28842.45	17298	17211	28939.57	99.2	11.9	1543
1480	0.129	0.157	42873.32		17056	43277.90	101.4	12.2	
1622	0.145	0.174	68372.65		16850	69579.24	103.6	12.4	
1700	0.154	0.180	85281.58		16703	87295.02	105.6	12.7	

Таблица 3. Масштабные потоки ряда жидких металлов

Металл	Cu	Ag	Au	Sn	Co	Pb	Pt	Pd	Ni
$q_1^*, \text{Вт/м}^2$	32257	5128	1543	616	9442	322	3321	8511	15135

ных электронов и происходит увеличение координационного числа [7, 34, 35].

В табл. 2 приведен алгоритм расчета масштабного потока для жидкого золота.

Как отмечено выше, для термодинамически подобных веществ зависимости $q^* = f(S/R)$, согласно теории подобия [7], различаются постоянным множителем. Для золота при выбранном произвольно начале отсчета по оси $S/R = 10$ такой множитель имеет значение 1543. Стоит отметить, что при изменении начала отсчета множитель для каждого металла будет изменяться.

Масштабные потоки q_1^* рассмотренных выше жидких металлов в диапазоне значений $9 < S/R \leq 14$ представлены в табл. 3.

Усредняющее уравнение (5) дает возможность спрогнозировать поведение полусферической интегральной излучательной способности ε жидких металлов до температур их кипения. В явном виде зависимость $\varepsilon = f(T)$ записывается так

$$\varepsilon = \frac{q_1^* \times 10^{(0.627(S/R) - 6.297)}}{5.67 \left(\frac{T}{100} \right)^4}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены экспериментальные значения интегральной полусферической излучательной способности ε из [10–12] и рассчитанные по (6). Получено хорошее согласование экспериментальных и рассчитанных значений полусферической интегральной излучательной способности ε жидких металлов в пределах погрешности измерений [10–13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена расчетная зависимость (6), позволяющая определять интегральную полусферическую излучательную способность ряда жидких металлов при температурах, для которых экспериментальные данные отсутствуют.

Результаты по заявленной методике расчета применимы в рассматриваемом диапазоне S/R от 9 до 14.

Предложенная методика позволила впервые произвести расчет с сопоставлением с последними экспериментальными результатами по ε для ряда металлов подгрупп меди и никеля Периодической системы Менделеева. Показано, что отклонения рассчитанных значений ε от экспериментальных данных не превышает 6%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

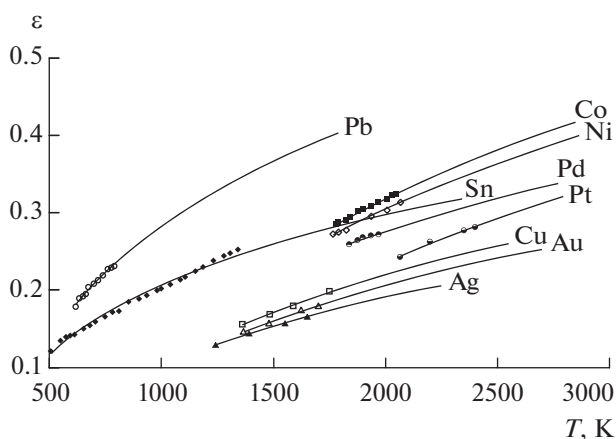


Рис. 2. Зависимости интегральной полусферической излучательной способности ε ряда металлов от температуры: сплошные линии — расчет по (6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Subbotin V., Arnoldov M., Kozlov F.A., Shimkevich A.* Liquid-metal Coolant for Nuclear Power // Atomic Energy. 2002. V. 92. P. 31.
2. *Dragunov A., Saltanov E., Pioro I., Harvel G., Ikeda B.* Study on Primary and Secondary Heat-transport Systems for Sodium-cooled Fast Reactor // Proc. 21st Int. Conf. Nuclear Engineering. V. 6. Beyond Design Basis Events, Student Paper Competition. Chengdu, China. July 29–August 2, 2013.
3. *Zrodnikov A.V., Toshinsky G., Komlev O., Dragunov Yu.G., Stepanov V., Klimov N., Generalov V., Kopytov I., Krushelnitsky V.* Innovative Nuclear Technology Based on Modular Multi-purpose Lead–Bismuth Cooled Fast Reactors // Progress in Nuclear Energy. 2008. V. 50. P. 170.
4. Излучательные свойства твердых материалов: Спр. / Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
5. *Touloukian Y.S., DeWitt D.P.* Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. V. 7. Thermophysical Properties of Matter / Eds. Y.S. Touloukian, C.Y. Ho. N.Y.: IFI/Plenum, 1970.
6. *Вукалович М.П., Новиков И.М.* Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972.
7. *Глазов В.М., Айвазов А.А.* Энтропия плавления металлов и полупроводников. М.: Металлургия, 1980. 172 с.
8. *Панфилович К.Б.* Тепловое излучение твердых оксидов, карбидов и нитридов // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 155.
9. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.
10. *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.
11. *Косенков Д.В., Сагадеев В.В.* Результаты измерения относительной излучательной способности ряда металлов подгруппы меди при температурах перехода через точку плавления // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 12. С. 1909.
12. *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.
13. *Сагадеев В.В., Аляев В.А.* Излучательная способность жидких металлов и сплавов: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2018.
14. *Волков А.И., Жарский И.М.* Большой химический справочник. М.: Советская школа, 2005. 608 с.
15. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник. В 4-х т. / Под ред. В.П. Глушко и др. М.: Наука, 1978.
16. *Arblaster J.* Thermodynamic Properties of Silver // J. Phase Equilibria and Diffusion. 2015. V. 36. P. 573.
17. *Arblaster J.* Thermodynamic Properties of Gold // J. Phase Equilibria and Diffusion. 2016. V. 37. P. 229.
18. *Gao M.C., Widom M.* Information Entropy of Liquid Metals // J. Phys. Chem. B. 2018. V. 122. P. 3550.
19. Химическая информационная сеть. <http://www.chem.msu.ru>
20. *Arblaster J.W.* The Thermodynamic Properties of Platinum // Platinum Met. Rev. 2005. V. 49. № 3. P. 141.
21. *Arblaster J.* A Re-assessment of the Thermodynamic Properties of Palladium // Johnson Matthey Technology Review. 2018. V. 62. P. 48.
22. *Paradis P.-F., Ishikawa T., Koike N.* Density of Liquid Gold Measured by a Non-contact Technique // Gold Bulletin. 2008. V. 41. P. 242.
23. *Abdullaev R., Khairulin R., Stankus S.* Density and Thermal Expansion of Silver in the Solid and Liquid States // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1675. 012087.
24. *Brillo J., Egly I.* Density Determination of Liquid Copper, Nickel, and Their Alloys // Int. J. Thermophys. 2003. V. 24. P. 1155.
25. *Алчагиров Б.Б., Чочаева А.М.* Температурная зависимость плотности жидкого олова // ТВТ. 2000. Т. 38. № 1. С. 44.
26. *Kaban I., Mhiaooui S., Hoyer W., Gasser J.-G.* Surface Tension and Density of Binary Lead and Lead-free Sn-based Solders // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. P. 7867.
27. *Савватимский А.И., Коробенко В.Н.* Плотность жидкого гафния от точки плавления до точки кипения // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 187.
28. *Leitner M., Leitner T., Schmon A., Aziz K., Pottlacher G.* Thermophysical Properties of Liquid Aluminum // Metallurgical and Materials Transactions A. 2017. V. 48. № 6. P. 3036.
29. *Ченцов В.П., Шевченко В.Г., Мозговой А.Г., Покрасин М.А.* Плотность и поверхностное натяжение тяжелых жидкометаллических теплоносителей. Галлий и индий // Перспективные материалы. 2011. № 3. С. 46.
30. *Abdullaev R., Khairulin R., Kozlovskii Y., Agazhanov A., Stankus S.* Density of Magnesium and Magnesium-Lithium Alloys in Solid and Liquid States // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2019. V. 29. № 3. P. 507.
31. *Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Качалов В.В.* Плотность и поверхностное натяжение кальция, стронция и бария в жидкой фазе // ТВТ. 1986. Т. 24. № 2. С. 259.
32. *Arblaster J.W.* Selected Values for the Densities and Molar Volumes of the Liquid Platinum Group Metals and of the Initial Melting Curves of Iridium, Rhodium and Ruthenium // Johnson Matthey Technology Review. 2017. V. 61. P. 80.
33. *Assael M., Armyra I., Brillo J., Stankus S., Wu J., Wakeham W.* Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Cadmium, Cobalt, Gallium, Indium, Mercury, Silicon, Thallium, and Zinc // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2012. V. 41. 033101.
34. *Татаринова Л.И.* Структура твердых аморфных и жидких веществ. М.: Наука, 1983. 152 с.
35. *Скрышевский А.Ф.* Структурный анализ жидкостей. М., 1971. С. 123.