

## Температуропроводность диспрозия в интервале температур 293 – 1273 К

Д. А. Самошкин, А. Ш. Агажанов, И. В. Савченко,  
С. В. Станкус, О. С. Яцук

---

Измерена температуропроводность диспрозия в интервале температур от 293 до 1273 К, полученная методом лазерной вспышки с погрешностью 3 – 4 %. Проведено сопоставление результатов с имеющимися литературными данными. В пересекающихся температурных интервалах результаты измерений хорошо согласуются с большинством литературных данных. Для области температур 293 – 700 К температуропроводность диспрозия измерена впервые. Рассчитана теплопроводность диспрозия в исследованном интервале температур с использованием литературных данных о плотности и теплоемкости. Разработаны справочные таблицы по коэффициентам переноса тепла диспрозия для научного и практического использования. Используя закон Видемана – Франца – Лоренца и литературные данные об электросопротивлении, рассчитана электронная компонента теплопроводности. Показано, что максимальная разница между теплопроводностью и ее электронной компонентой соответствует минимальной температуре экспериментов и уменьшается по мере ее увеличения.

**Ключевые слова:** температуропроводность, теплопроводность, диспрозий, твердое состояние, метод лазерной вспышки, закон Видемана – Франца – Лоренца.

---

### Введение

Имеющаяся в литературе экспериментальная информация о коэффициентах переноса тепла диспрозия немногочисленна. Если не брать в расчет большое количество низкотемпературных измерений, имеется лишь три работы [1 – 3], в которых приведены высокотемпературные данные по температуропроводности диспрозия. Оригинальных работ, в которых бы приводились экспериментальные данные по тепло- и температуропроводности диспрозия для интервала температур 293 – 700 К, найти не удалось.

Цель работы — экспериментально определить тепло- и температуропроводность диспрозия в интервале температур 293 – 1273 К, а также уточнить существующую информацию о коэффициентах переноса тепла диспрозия в интервале температур 293 – 1273 К.

### Экспериментальная техника

Температуропроводность  $\alpha$  измеряли лазерно-импульсным методом на установке LFA-427 по

методике, описанной в [4]. Экспериментальную установку поверяли как с использованием стандартных образцов инконеля и пирокерама, так и в экспериментах с хорошо изученными переходными d-металлами: никелем, кобальтом и железом. Отличие полученных и справочных данных не превышало 2 – 4 %.

Образцы диспрозия вырезали из слитков и имели форму дисков диаметром 12,6 мм, толщиной около 2 мм. Исходные слитки были получены многократной вакуумной дистилляцией технически чистого металла на конденсатор с регулируемой температурой и последующей переплавкой полученного диспрозия в танталовом тигле. По данным химического анализа содержание основного компонента в рафинированном металле превышало 99,98 масс. %, основные примеси, масс. %: O < 0,002, C < 0,002, Cu < 0,005, сопутствующие редкоземельные металлы < 0,005. Эксперименты с диспрозием выполняли в атмосфере аргона особой чистоты (99,992 масс. %). Объем печи трижды вакуумировали и промывали аргоном до начала измерений. В экспериментах использовали только танталовую оснастку (держатель, крышка).

Таблица 1

Измеренные значения температуропроводности диспрозия

T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	T, К	a, мм <sup>2</sup> /с
296,8	6,07	421,4	6,95	671,5	7,95	872,5	8,29	1072,9	8,41
297,8	6,08	469,1	7,27	672,8	7,99	872,6	8,35	1073,4	8,42
298,3	6,07	469,4	7,26	721,7	8,19	873,2	8,29	1074,9	8,45
299,0	6,13	470,9	7,23	722,3	8,21	873,4	8,32	1122,6	8,54
299,2	6,11	519,6	7,44	724,0	8,18	875,2	8,37	1123,4	8,52
299,2	6,11	519,7	7,45	772,0	8,18	875,2	8,26	1125,1	8,53
323,0	6,32	520,6	7,45	772,2	8,17	922,6	8,38	1222,2	8,57
325,3	6,36	570,1	7,58	772,5	8,17	923,4	8,39	1222,8	8,62
326,5	6,36	570,3	7,60	773,1	8,19	925,2	8,38	1224,3	8,59
346,7	6,51	571,2	7,59	774,3	8,19	972,8	8,38	1272,2	8,61
348,5	6,48	620,7	7,77	774,8	8,17	973,6	8,37	1272,7	8,62
352,3	6,53	621,1	7,76	822,2	8,30	1022,8	8,44	1273,9	8,61
418,9	6,97	622,8	7,78	822,9	8,26	1023,6	8,44	419,5	6,99
671,3	8,00	824,8	8,30	1025,4	8,42				

**Результаты измерений и обсуждение**

Результаты измерений температуропроводности диспрозия приведены на рис. 1 и в табл. 1. Данные получены в нескольких сериях измерений как при нагреве, так и при охлаждении образца. Значимого отличия в результатах для разных серий и термической истории не наблюдалось. Первичные экспериментальные данные аппроксимировались методом наименьших квадратов полиномом третьей степени:

$$a = 2,77 + 1,48 \cdot 10^{-2} T - 1,33 \cdot 10^{-5} T^2 + 4,14 \cdot 10^{-9} T^3, \tag{1}$$

где  $a$  — температуропроводность, мм<sup>2</sup>/с,  $T$  — температура измерения, К. Среднеквадратичное отклонение первичных данных от формулы (1) не превышало 0,2 %.

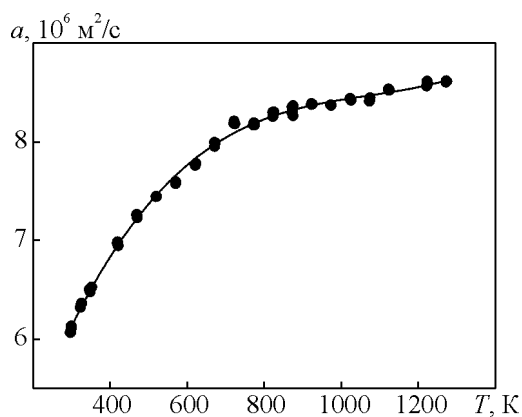


Рис. 1. Первичные экспериментальные данные по температуропроводности диспрозия. Линией обозначена аппроксимация по формуле (1).

Используя литературные данные по теплоемкости [5] и плотности [6], а также известное соотношение для расчета теплопроводности

$$\lambda = \rho C_p,$$

где  $\rho$  — плотность,  $C_p$  — теплоемкость, были рассчитаны значения теплопроводности во всем исследованном интервале температур. Аппроксимация результатов расчета методом наименьших квадратов дала уравнение:

$$\lambda = 4,91 + 1,79 \cdot 10^{-2} T - 1,64 \cdot 10^{-5} T^2 + 7,6 \cdot 10^{-9} T^3, \tag{2}$$

где  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К). Среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений от полученных по формуле (2) не превосходит 0,1 %. Рекомендуемые значения тепло- и температуропроводности диспрозия, а так же оценка погрешности их определения приведены в табл. 2.

На рис. 2 представлено сопоставление полученных результатов с известными литературными данными. Видно, что измеренные нами значения температуропроводности, в пересекающихся интервалах

Таблица 2

Рекомендуемые значения тепло- и температуропроводности диспрозия с оценкой их погрешности ( $\delta\lambda$ ,  $\delta a$ )

T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\delta\lambda$ , %	$\delta a$ , %	T, К	a, мм <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\delta\lambda$ , %	$\delta a$ , %
293	6,1	8,3	3,5	3,5	800	8,2	12,9	4	4
300	6,1	8,4	3,5	3,5	900	8,3	13,6	4,5	4,5
400	6,8	9,5	3,5	3,5	1000	8,4	14,2	4,5	4,5
500	7,4	10,6	3,5	3,5	1100	8,5	14,9	4,5	4,5
600	7,8	11,5	4	4	1200	8,6	15,7	5	5
700	8,0	12,2	4	4	1300	8,7	16,6	5	5

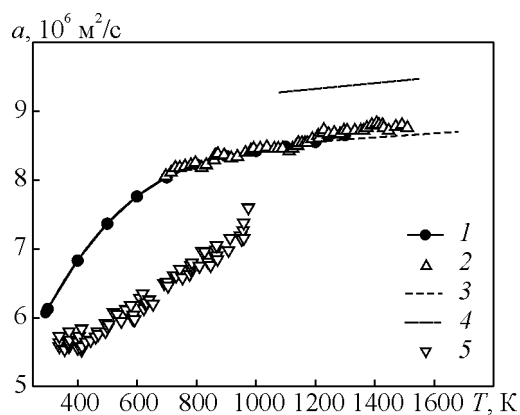


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений температуропроводности диспрозия (1) с литературными данными: 2 – [1], 3 – [2], 4 – [3], 5 – [7].

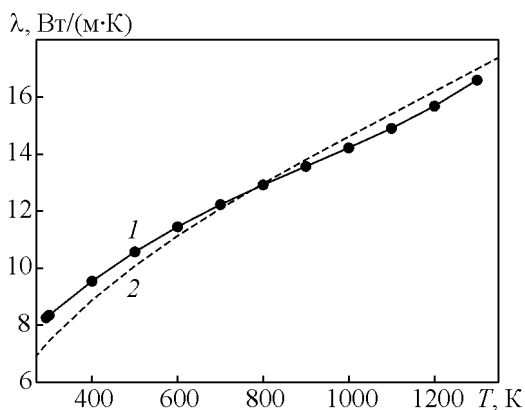


Рис. 3. Теплопроводность диспрозия: 1 – результаты, рассчитанные из данных о температуропроводности, плотности и теплоемкости, 2 – результаты расчета по закону Видемана – Франца – Лоренца.

параметров состояния, практически совпадают с результатами [1, 2] и удовлетворительно согласуются с данными [3] в пределах суммарных погрешностей измерений. В работах [1 – 3] измерения выполняли нестационарными методами периодического нагрева, помимо температуропроводности измеряли и теплоемкость в интервалах температур 697 – 1510 [1], 1200 – 1680 [2] и 1100 – 1550 К [3]. Как уже было отмечено ранее экспериментальных данных по тепло- и температуропроводности диспрозия для интервала температур 293 – 697 К не было найдено. Однако, в справочнике [7] приведены результаты измерений температуропроводности, полученные методом Ангстрема в интервале температур 339 – 975 К. Эти результаты сильно отличаются от наших данных, к сожалению, найти оригинальный источник данных опубликованных в [7] и разобраться, с чем связано столь значительное отличие результатов, не представляется возможным.

Применимость закона Видемана – Франца – Лоренца к редкоземельным металлам достоверно не установлена. Поэтому, используя литературные данные об электросопротивлении диспрозия [8], нами была рассчитана электронная компонента его теплопроводности. В расчетах было использовано теоретическое значение числа Лоренца для газа свободных электронов  $L_0 = 2,445 \cdot 10^{-8}$  (Вт·Ом)/К<sup>2</sup>, полученное Зоммерфельдом [9]. Сопоставление результатов расчета теплопроводности из данных о температуропроводности и электропроводности представлено на рис. 3. Видно, что максимальное расхождение соответствует комнатной температуре (отличие почти на 20%). С увеличением температуры разница между теплопроводностью и ее электронной компонентой уменьшается и при температурах выше 500 К не превосходит 5%. Известно [10], что особенности изменения кинетических характеристик редкоземельных металлов при высоких температурах обусловлены двухполосным характером энергетического спектра коллективизированных электронов. В частности, рост теплопроводности возникает вследствие снижения плотности состояний тяжелых электронов при нагреве и снижении эффективности магнитного рассеяния в РЗМ по мере приближения к температуре плавления.

## Вывод

Получены новые экспериментальные данные по температуропроводности диспрозия в широком интервале температур твердого состояния. В пересекающихся интервалах результатов измерений хорошо согласуются с большинством литературных данных.

Показано, что с увеличением температуры разница между теплопроводностью и ее электронной компонентой уменьшается и при температурах выше 500 К не превосходит 5%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00602).*

## Литература

1. Kurichenko A.A., Ivliev A.D., Zinovev V.E. Study of the thermophysical properties of rare-earth metals with the use of molecular laser radiation. *High Temperature*, 1986, v. 24, no. 3, pp. 369 – 375.
2. Banchila S.N., Filippov L.P. Experimental study of the set of thermal properties of certain rare-earth metals at high temperatures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1974, v. 27, no. 1, p. 839 – 841.
3. Мардыкин И.П. Фазовые переходы в тяжелых лантаноидах и их тепловые свойства. В сб. “Физико-

- механические и теплофизические свойства металлов”. М.: Наука, 1976, с. 105 – 111.
4. Stankus S.V., Savchenko I.V., Agadzhanov A.Sh., Yatsuk O.S., Zhmurikov E.I. Thermophysical properties of MPG-6 graphite. *High Temperature*, 2013, v. 51, no. 2, p. 179 – 182.
  5. Baginskii A.V., Lyapunov K.M., Stankus S.V. High-temperature enthalpy of dysprosium. *Russ. J. Engin. Thermophys.*, 1997, v. 7, no. 3 – 4, p. 221 – 229.
  6. Kozlovskii Yu.M., Stankus S.V. The density and thermal expansion of dysprosium in the temperature range 110 – 1950 K. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, v. 22, no. 4, p. 501 – 508.
  7. Touloukian Y.S., Powell R.W., Ho C.Y., Nicolaou M.C. Thermal Diffusivity. *Thermophysical Properties of Matter. V. 10*. Washington: Plenum Publish Corporation, 1970, 670 p.
  8. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Metallurgiya, 1989, 384 с.
  9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1966, 416 с.
  10. Ивлиев А.Д. Кинетические свойства твердого иттрия при высоких температурах. *Физика металлов и металловедение*, 1993, т. 75, № 2, с. 9 – 14.
  3. Mardykin I.P. *Fazovye perekhody v tyazhelykh lantanoidakh i ikh teplovyie svoystva* [Phase transitions in heavy lanthanides and their thermal properties]. *V sbornike Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoystva metallov* [In the collection of physico-mechanical and thermophysical properties of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 105 – 111.
  4. Stankus S.V., Savchenko I.V., Agadzhanov A.Sh., Yatsuk O.S., Zhmurikov E.I. Thermophysical properties of MPG-6 graphite. *High Temperature*, 2013, vol. 51, no. 2, pp. 179 – 182.
  5. Baginskii A.V., Lyapunov K.M., Stankus S.V. High-temperature enthalpy of dysprosium. *Russ. J. Engin. Thermophys.*, 1997, vol. 7, no. 3–4, pp. 221 – 229.
  6. Kozlovskii Yu.M., Stankus S.V. The density and thermal expansion of dysprosium in the temperature range 110–1950 K. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 501 – 508.
  7. Touloukian Y.S., Powell R.W., Ho C.Y., Nicolaou M.C. Thermal Diffusivity. *Thermophysical Properties of Matter. Volume 10*. Washington: Plenum Publish Corporation, 1970, 670 p.
  8. Zinoviev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Reference Book, Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, 384 p.
  9. Zaiman J. *Printsipy teorii tverdogo tela* [Principles of solid body theory]. Moscow, Mir Publ., 1966, 416 p.
  10. Ivliev A.D. Kineticheskie svoystva tverdogo ittriya pri vysokikh temperaturakh [Kinetic properties of solid yttrium at high temperatures]. *Fizika Metallov i Metallovedenie — The Physics of Metals and Metallography*, 1993, vol. 75, no. 2, pp. 9 – 14.

## References

Статья поступила в редакцию 19.05.2016 г.

**Самошкин Дмитрий Андреевич** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1), аспирант, инженер-исследователь, специалист в области теплофизических свойств веществ и материалов. E-mail: [d.a.samoshkin@gmail.com](mailto:d.a.samoshkin@gmail.com).

**Агажанов Алибек Шаяхметович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1), младший научный сотрудник, специалист в области теплофизических свойств веществ и материалов. E-mail: [scousekz@gmail.com](mailto:scousekz@gmail.com).

**Савченко Игорь Васильевич** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области теплофизических свойств веществ и материалов. E-mail: [savchenko@itp.nsc.ru](mailto:savchenko@itp.nsc.ru), [savchenko.igor@gmail.com](mailto:savchenko.igor@gmail.com).

**Станкус Сергей Всеволодович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1), доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора, специалист в области теплофизических свойств веществ и материалов. E-mail: [stankus@itp.nsc.ru](mailto:stankus@itp.nsc.ru).

**Яцук Олег Сергеевич** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1), лаборант, специалист в области теплофизических свойств веществ и материалов. E-mail: [osyatsuk@gmail.com](mailto:osyatsuk@gmail.com).

---

## Thermal diffusivity of dysprosium in the temperature range 293 – 1273 K

**D. A. Samoshkin, A. Sh. Agazhanov, I. V. Savchenko,  
S. V. Stankus, O. S. Yatsuk**

The measurement results of the thermal diffusivity of dysprosium obtained by the Laser Flash technique with an error of 3 – 4 % in the temperature range from 293 to 1273 K are adduced. A comparison of results with the available literature data has been carried out. The results of measurements are in good agreement with most of the published data in the overlapping temperature intervals. For the temperature range 293 – 700 K thermal diffusivity of dysprosium has been measured for the first time. The thermal conductivity in the investigated temperature interval has been calculated using literature data on the heat capacity and density. The reference tables for the heat transfer coefficients of dysprosium have been developed for scientific and practical use. Using the Wiedemann – Franz – Lorenz law and published data on electrical resistivity the electronic component of the thermal conductivity has been calculated. It is shown that the maximum difference between the thermal conductivity and its electronic component corresponds to the minimum temperature of experiments and decreases as the temperature increase.

**Key words:** Thermal diffusivity, thermal conductivity, dysprosium, solid state, Laser Flash technique, Wiedemann – Franz – Lorenz law.

---

**Samoshkin Dmitriy** — Institute of Thermophysics SB RAS (Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Avenue, 1), postgraduate, research engineer, specialist in the field of thermophysical properties of substances and materials. E-mail: [d.a.samoshkin@gmail.com](mailto:d.a.samoshkin@gmail.com).

**Agazhanov Alibek** — Institute of Thermophysics SB RAS (Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Avenue, 1), junior researcher, specialist in the field of thermophysical properties of substances and materials. E-mail: [scousekz@gmail.com](mailto:scousekz@gmail.com).

**Savchenko Igor** — Institute of Thermophysics SB RAS (Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Avenue, 1), Ph.D., senior researcher, specialist in the field of thermophysical properties of substances and materials. E-mail: [savchenko@itp.nsc.ru](mailto:savchenko@itp.nsc.ru).

**Stankus Sergei** — Institute of Thermophysics SB RAS (Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Avenue, 1), Dr.Sci, prof., deputy director, specialist in the field of thermophysical properties of substances and materials. E-mail: [stankus@itp.nsc.ru](mailto:stankus@itp.nsc.ru).

**Yatsuk Oleg** — Institute of Thermophysics SB RAS (Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentiev Avenue, 1), laboratory assistant, specialist in the field of thermophysical properties of substances and materials. E-mail: [osyatsuk@gmail.com](mailto:osyatsuk@gmail.com).