

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛОТНОСТИ, ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКОГО КАЛИЯ

Ю.А. Бабаева

АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»

249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 6

Для цитирования: Бабаева Ю.А. Полуэмпирические соотношения для расчета плотности, динамической вязкости и удельной теплоемкости жидкого калия. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 134-139.
DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.11>

Калий является одним из наиболее перспективных теплоносителей для атомной энергетики. Его сплавы с натрием активно используются как модельная жидкость при проведении экспериментов в обоснование безопасности реакторных установок типа БН. Литература, посвященная его термодинамическим и транспортным свойствам, достаточно обширна [1–5]. Однако со времени выхода в свет последних справочных материалов по его свойствам прошло около 15-ти лет. К настоящему времени появились новые работы, в которых свойства жидкого калия были исследованы с использованием новой приборной базы и новых методов измерения.

Центр данных термодинамических свойств (ЦТДС) ГК «Росатом» ведет работы по сбору, обработке и обоснованию соотношений для расчета основных свойств жидкометаллических теплоносителей, таких как плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоемкости, удельное электрическое сопротивление и скорость звука как функций температуры.

В таблице 1 приведены сведения о некоторых собранных экспериментальных работах по свойствам жидкого калия за период 1954–2023 гг.

При анализе экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 3, 6–24], проверки их согласованности было получено рекомендуемое полуэмпирическое расчетное соотношение для плотности калия в жидкой фазе

$$\rho = (903,768 \pm 6,02) - (0,211 \pm 0,0258) \cdot T - (6,174 \pm 3,75) \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + (7,695 \pm 2,24) \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - (2,786 \pm 0,47) \cdot 10^{-11} \cdot T^4, \quad (1)$$

где ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К. Диапазон применимости соотношения (1) $T = 366–2000$ К. Погрешность расчета динамической вязкости по соотношению (1) равна 0,34%.

На рисунке 1 показано сравнение результатов расчета по зависимости (1) и экспериментальных данных.

Таблица 1

Сведения о работах по свойствам жидкого калия

Параметр	Число работ*	Период, г.	Диапазон температур, К	Общее число точек	Число точек в оценке
Плотность	33	1954–2011	336–2200	422	524
Коэффициент динамической вязкости	23	1954–2011	336–2100	365	312
Удельная теплоемкость	14	1959–2020	336–2200	286	266

* Число работ, по материалам которых проводился анализ

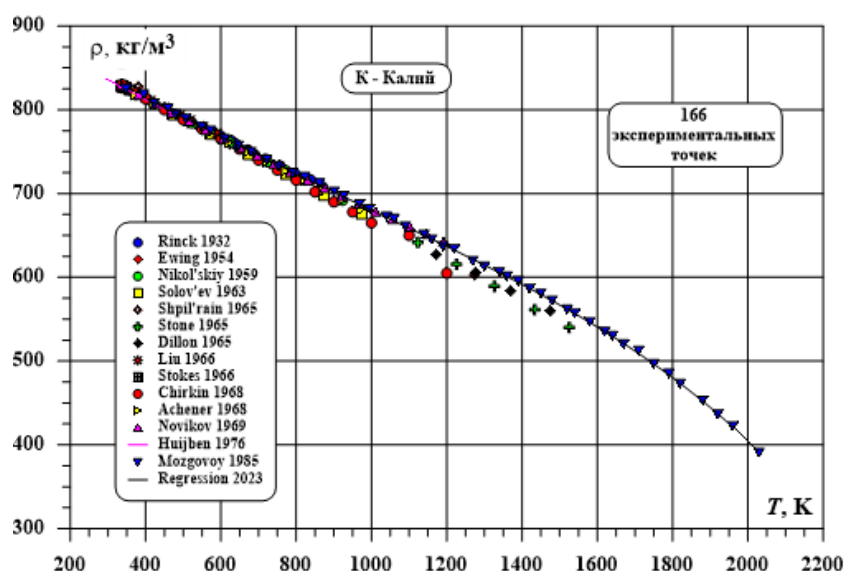


Рис. 1. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей плотностей калия от температуры

В ходе выполнения анализа данных и проведения их оценки были получены полуэмпирические соотношения для расчета динамической вязкости калия в жидкой фазе:

$$\mu \cdot 10^6 = (119,12 \pm 6,08) + (2361,27 \pm 149,3) \cdot \exp\left(-\frac{T}{(195,1 \pm 9,45)}\right), \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с. Диапазон применимости соотношения (2) $T = 336–1000$ К. Погрешность расчета динамической вязкости по соотношению (2) равна 2,9%.

Другое соотношение пригодно в более широком диапазоне температур $T = 336–1400$ К и имеет вид

$$\mu \cdot 10^6 = (69,858 \pm 7,03) + (25,89 \pm 9,76) \cdot 10^6 \cdot T^{-(1,873 \pm 0,07)}, \quad (3)$$

Погрешность расчета вязкости по соотношению (3) составляет 2,86%.

Расчетное регрессионное полуэмпирическое соотношение для теплоемкости калия в жидкой фазе получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 6, 7, 9, 13, 14, 16–18, 20, 25–30] и имеет вид

$$c_p = (950,66 \pm 3,84) - (48,39 \pm 2,2) \cdot 10^{-2} \cdot T + (31,06 \pm 1,36) \cdot 10^{-5} \cdot T^2, \quad (4)$$

где T – температура, К. Погрешность соотношения (4) составляет в диапазоне температур $T = 337\text{--}1000$ К $\varepsilon = 3,0\%$; в диапазоне $1000\text{--}1600$ К $\varepsilon = 4,2\%$. Размерность c_p [Дж/(кг·К)].

Все полученные соотношения по плотности, динамической вязкости и удельной теплоемкости калия в жидкой фазе являются согласованными в пределах заявленных погрешностей. Из этого следует, что данные соотношения могут быть использованы в качестве рекомендованных при расчете термодинамических свойств легких жидкометаллических теплоносителей.

Литература

1. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / Под ред. П.Л. Кириллова, в 3-х томах. – М.: Издат, 2014.
2. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / Под ред. П.Л. Кириллова. – М.: Издат, 2007. – 194 с.
3. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. / Под ред. В.М. Поплавского. – М.: Издат, 2011. – Т. 1. – 392 с.
4. Дриц М.Е., Будберг П.Б., Бурханов Г.С., Дриц А.М., Пановко В.М. Свойства элементов. Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
6. Грязнов Г.М., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
7. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. – М.: Атомиздат, 1978.
8. Чусов И.А., Новиков Г.Е., Обысов Н.А., Проняев В.Г. Расчетные соотношения для определения термодинамических свойств свинцового теплоносителя. // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2019. – Вып. 2. – С.83-91.
9. Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O. Methods for Non-Linear Least Squares Problems. Technical University of Denmark. 2nd Edition, April 2004.
10. Худсон Д. Статистика для физиков. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 293 с.
11. Vandevender W.H., Haskell K.H. The SLATEC mathematical subroutine library. Signum Newsletter, 17, 3, 1982. – p.16-21. DOI: <https://doi.org/10.1145/1057594.1057595>
12. Been S.A., Edwards H.S., Teeter C.E. and Calkins V.P. The Densities of Liquids at Elevated Temperatures. I. The Densities of Lead, Bismuth, Lead-Bismuth Eutectic and Lithium in the Range from Melting Point to 1000°C (1832 F) NEPA Report 1585 (Oak Ridge, TN: Fairchild Engine and Airplane Corp.) 1950. Sept. 7. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/12732258>
13. Miller R.R. Physical Properties of Liquid Metals, in: Liquid Metals Handbook, Lyon, R.N. (Ed.), 2nd Ed., Report NAVEXOS P-733, Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, 1954.
14. Wilson J.R. The Structure of Liquid Metals and Alloys. // J. Met. Rev. – 1965. – V. 10. – P. 381-590. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066065790138401>
15. Andrade E.N. da C., Dobbs E.R. The Viscosities of Liquid Lithium, Rubidium and Caesium / Proc. Roy. Soc., Feb. 7, 1952. Ser. A. V. 211, no. 1104, pp. 12-30. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0022>
16. Никольский Н.А., Калакуцкая Н.А., Пчелкин И.М., Классен Т.В., Вельтищева В.А. Теплофизические свойства расплавленных металлов. // Теплоэнергетика. – 1959. – № 2. – С. 92-95.
17. Шпильрайн Э.Э., Солдатенко Ю.А., Якимович К.А., Фомин В.А., Савченко В.А., Белова А.М., Каган Д.Н., Крайнова И.Ф. Экспериментальное исследование теплофизических и электрофизических свойств жидких щелочных металлов при высоких температурах. // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Т.3. Вып. 6. – С. 930-933.
18. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

19. *Tepper F., Zelenak J., Rochlich F. and May V.* Thermophysical and Transport Properties of Liquid Metals. M.S.A. Res. Corp., Callery, Pa., 1965. 25 p.
20. *Гольцова Е. И.* Плотность лития, натрия и калия до 1500–1600° С. // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4. Вып. 3. – С. 360–363.
21. *Christensen N. E., Feurbacher B.* Volume and surface photoemission from tungsten. I. Calculation of band structure and emission spectra. // J. Phys. Rev. B. 1974. – V. 10 – № 6. – P. 2349–2361. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2349>
22. *Дикерсон Р., Грей Г., Хейт Дж.* Основные законы химии. – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 652 с.
23. *Мозговой А. Г., Новиков И. И., Покрасин М. А., Роцупкин В. В., Теряев В. В.* Давление насыщенных паров щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1985. № 1(51). – С. 3–108.
24. Ядерные реакторы. II. Техника ядерных реакторов / Материалы Комиссии по атомной энергии США / Перев. с англ. М.: ИЛ, 1957. 782 с.
25. *Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А., Тоцкий Е. Е., Тимрот Д. П., Фомин В. А.* Теплофизические свойства щелочных металлов. – М.: Москва, 1970. – 487 с.
26. *Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А., Сквородько С. Н., Мозговой А. Г.* Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1983. – № 6(44). – С. 1–92.
27. *Кириллов П. Л., Денискина Н. Б.* Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей (справочные таблицы и соотношения). ФЭИ-0291. ЦНИИатоминформ, 2000. – 41 с. Обзор.
28. Справочник по редким металлам / Под ред. В. М. Плющева – М.: Мир, 1965. – С. 343–383.
29. *Landolt P. E., Sittig M.* Lithium. In: Rare Metals Handbook, 2nd ed., New York, NY: Reinhold. 1961. pp. 239–252.
30. Metals Reference Book. 5th Edition. / Ed.: Colin J. Smithells. Butterworth-Heinemann. 1st January 1976. 1582p. ISBN: 9781483192529.

Поступила в редакцию 26.02.2023 г.

Автор

Бабаева Юлия Андреевна – ведущий инженер АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова»
E-mail: babaeva@karpovipc.ru

UDC 621.039.5

Semi-empirical Relations for Calculation of Density, Dynamic Viscosity and Specific Heat Capacity of Liquid Potassium

Babaeva Y. A.

Joint Stock Company «Karpov Institute of Physical Chemistry»
Kievskoye shosse, 6, 249035, Obninsk, Kaluga region, Russia

ABSTRACT

This paper presents the results of analysis of experimental data on the density, dynamic viscosity and specific heat capacity of potassium in the liquid phase. Publications from the open literature from 1954 to the present time have been reviewed and analyzed. Further, calculated relations for evaluation of thermodynamic properties are proposed, error values of the proposed relations and the range of their applicability are given. The results given in 30 experimental and computational papers are used in the analysis. The obtained relations can be used as recommended for calculation of thermodynamic properties of light liquid-metal coolants.

Key words: potassium, coolant, density, dynamic viscosity, heat capacity, thermodynamic properties.

For citation: Babaeva Y.A. Semi-Empirical Relations For Calculation Of Density, Dynamic Viscosity And Specific Heat Capacity Of Liquid Potassium. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 4, pp. 134-139; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.11> (in Russian).

REFERENCES

1. Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering. Edit. by P.L. Kirillov, in 3 vol., Moscow: Izdat, 2014, 686 p. (In Russian).
2. Thermophysical properties of nuclear engineering materials. Edit. by P.L. Kirillov. M.: Izdat., 194 p. (In Russian).
3. Handbook on the properties of materials for advanced reactor technologies. Edited by V.M. Poplavsky. M.: Izdat, 2011, 392 p. (In Russian).
4. Drits M.E., Budberg P.B., Burkhanov G.S., Drits A.M., Panovko V.M., Properties of elements. Handbook. M: Metallurgiya, 1985, 672 p. (In Russian).
5. Chirkin V.S., Thermophysical properties of nuclear engineering materials. Handbook. M.: Atomizdat, 1968, 484 p. (In Russian).
6. Gryaznov G.M., Evtikhin V.A., Lublinsky I.E. et al. Materials science of liquid metal systems of thermonuclear reactors. M.: Energoatomizdat, 1989, 240 p. (In Russian).
7. Ivanovsky M.N., Sorokin V.P., Yagodkin I.V. Physical foundations of heat pipes. M.: Atomizdat, 1978, 256 p. (In Russian).
8. Chusov I.A., Novikov G.E., Obysov N.A., Pronyaev V.G. Calculation relations for determining the thermodynamic properties of a lead coolant. *VANT. Ser.: Fizika yadernyh reaktorov*. 2019, iss. 2, pp. 83–91 (In Russian).
9. Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O. Methods for Non-Linear Least Squares Problems. Technical University of Denmark, 2nd Edition, 2004, 30 p.
10. Hudson D. Statistics for physicists. M.: Mir, 1979. 293 p. (In Russian).
11. Vandevender W.H., Haskell K.H. The SLATEC mathematical subroutine library. *Signum Newsletter*, 1982, vol. 17, no. 3, pp. 16-21. DOI: <https://doi.org/10.1145/1057594.1057595>
12. Been S.A., Edwards H.S., Teeter C.E., Calkins V.P. The Densities of Liquids at Elevated Temperatures. I. The Densities of Lead, Bismuth, Lead-Bismuth Eutectic and Lithium in the Range from Melting Point to 1000 °C (1832 F). NEPA Report 1585 (Oak Ridge, TN: Fairchild Engine and Airplane Corp.), 1950, 26 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/12732258>
13. Miller R.R. Physical Properties of Liquid Metals, in: Liquid Metals Handbook, 2nd Ed., Report NAVEXOSP-733. Atomic Energy Commission and Dept. of the Navy, Washington, USA, 1954.
14. Wilson J.R. The Structure of Liquid Metals and Alloys. *J. Met. Rev.*, 1965, vol. 10, pp. 381-590. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066065790138401>
15. Andrade E.N. da C., Dobbs E.R. The Viscosities of Liquid Lithium, Rubidium and Caesium. *Proc. Roy. Soc., ser. A*, vol. 211, no. 1104, 1952, pp. 12–30. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0022>
16. Nikolsky N.A., Kalakutskaya N.A., Pchelkin I.M., Klassen T.V., Veltischeva V.A. Thermophysical properties of molten metals. *Teploenergetika*, 1959, no. 2, pp. 92–95. (In Russian).
17. Shpilrain E.E., Soldatenko Yu.A., Yakimovich K.A., Fomin V.A., Savchenko V.A., Belova A.M., Kagan D.N., Krainova I.F. Experimental study of thermophysical and electrophysical properties of liquid alkali metals at high temperatures. *Teplofizika vysokih temperature*, 1965, vol. 3, iss. 6, pp. 930–933. (In Russian).
18. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. 2nd ed. M.: Nauka, 1972, 720 p. (In Russian).
19. Tepper F., Zelenak J., Rochlich F., May V. Thermophysical and Transport Properties of Liquid Metals. M.S.A. Res. Corp., Callery, Pa., 1965, 25p.
20. Goltsova E. I. Density of lithium, sodium and potassium up to 1500-1600C. *Teplofizika vysokih temperature*, 1966, vol.4., iss. 3, pp. 360-363. (In Russian).

21. Christensen N.E., Feurbacher B. Volume and surface photoemission from tungsten. I. Calculation of band structure and emission spectra. *J. Phys. Rev. B*, 1974, vol. 10, no 6, pp. 2349-2361. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2349>
22. Dickerson R., Gray G., Hayt J. The basic laws of chemistry. M.: Mir, 1982, vol. 1. 652 p.
23. Mozgovoij A.G., Novikov I.I., Pokrasin M.A., Roshchupkin V.V., Teryaev V.V. Pressure of saturated alkali metal vapors. Reviews on the thermophysical properties of substances. 1985, no 1(51), pp. 3-108. (In Russian).
24. Nuclear reactors. II. Technique of nuclear reactors. Materials of the US Atomic Energy Commission (Transl. From English). M.: IL, 1957, 782 p. (In Russian).
25. Shpilrain E.E., Yakimovich K.A., Totsky E.E., Timrot D.P., Fomin V.A. Thermophysical properties of alkali metals. M.: Moscow, 1970, 487 p. (In Russian).
26. Shpilrain E.E., Yakimovich K.A., Skovorodko S.N., Mozgovoij A.G. Teplofizicheskie svojstva shchelochnyh metallov. *Obzory po teplofizicheskim svojstvam veshchestv*. 1983, no. 6(44), pp. 1-92 (In Russian).
27. Kirillov P.L., Deniskina N.B. Thermophysical properties of liquid metal heat carriers (reference tables and ratios). Review. FEI-0291. CNIAtominform, 2000, 41 p. (In Russian).
28. Handbook of Rare Metals (Edit. Plushev V.M.). M.: Mir, 1965, pp. 343-383 (In Russian).
29. Landolt P.E., Sittig M. Lithium. In: Rare Metals Handbook, 2nd ed., New York, NY: Reinhold, 1961, pp. 239-252.
30. Metals Reference Book. 5th Edition (Ed.: Colin J. Smithells). Butterworth-Heinemann, 1976, 1582 p. ISBN: 9781483192529.

Author

Yuliya A. Babaeva, leading engineer,
E-mail: babaeva@karpovipc.ru