

# РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ЛИТИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**И.А. Чусов\*, \*\* , Ю.А. Бабаева\*\*, Г.Е. Новиков\*\*\***

\* АО ОКБ «Гидропресс»

142100, г. Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, 21

\*\* ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249039, г. Обнинск, Калужская обл., Студгородок, 1

\*\*\* Госкорпорация «Росатом»

119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24



Представлены результаты анализа экспериментальных данных, приведенных в открытых публикациях за период с 1950-го по 2020-й гг. Предложены расчетные соотношения для оценки основных свойств литиевого теплоносителя: плотности, коэффициента динамической вязкости, удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и поверхностного натяжения; удельного электрического сопротивления и скорости звука. Указаны величины погрешностей предложенных соотношений и температурные диапазоны их применимости. В анализе использованы экспериментальные результаты, опубликованные в 81-й работе.

**Ключевые слова:** литий, теплоноситель, плотность, теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, поверхностное натяжение, электрическое сопротивление, скорость звука, термодинамические свойства, транспортные свойства.

Чусов И.А., Бабаева Ю.А., Новиков Г.Е. Расчетные соотношения для определения термодинамических и транспортных свойств литиевого теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 28-45. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.03> .

## ВВЕДЕНИЕ

Литература, посвященная свойствам жидкого лития, достаточно обширна. В большинстве монографий и статей отмечается, что литий и его сплавы являются материалами будущего. Литий обладает рядом уникальных свойств, которые являются основой его использования как элемента, контактирующего с плазмой токамака, а также в качестве тритийвоспроизводящего материала и теплоносителя бланкета термоядерных реакторов [1 – 3]. Литий является эффективным теплоносителем для тепловых труб и ядерных энергетических установок [4 – 7]. Среди уникальных свойств, которыми обладает литий, следует выделить следующие: он является самым легким из всех металлов, обладает самой большой теплоемкостью, высокой теплопроводностью и температуропроводностью, сравнительно низкой вязкостью, высокой теплотой парообразования и низким давлением насыщенных паров. Следует отметить, что свойства лития в значительной

© И.А. Чусов, Ю.А. Бабаева, Г.Е. Новиков, 2022

степени зависят от чистоты, наличия остаточных газов в вакуумной среде, в которой он получен и т.д. Учет этих факторов проводился далеко не всегда, а в некоторых случаях с недостаточной точностью.

Именно благодаря сочетанию упомянутых выше свойств литий считается наиболее эффективным теплоносителем для ядерных установок космического назначения большой мощности.

В работе приведены расчетные соотношения, построенные на основании анализа многочисленных экспериментальных данных для жидкого лития. Отметим, что на графиках, представленных в статье, приведены только те данные, которые использовались при численной оценке регрессионных соотношений, а в списке использованной литературы приведены ссылки на все экспериментальные работы, занесенные в базу данных ExThermD Госкорпорации «Росатом».

С 2021 г. предложенные в работе соотношения являются рекомендованными Госкорпорацией «Росатом» для расчета термодинамических свойств лития.

### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Из анализа многочисленных работ по свойствам легких жидкометаллических теплоносителей можно сделать вывод, что экспериментальные данные, полученные в различных лабораториях и разными авторами имеют один и тот же тренд (в подавляющем большинстве случаев), что указывает на сравнительно высокое качество измерений, выполненных после 1950-х гг.

Всего при построении приведенных ниже графических зависимостей использовались результаты многочисленных экспериментальных работ, последние из которых относятся к 2020 г. Работы разных авторов были опубликованы в различных журналах и материалах конференций, в связи с чем их сбор был достаточно трудоемкой задачей. Сводные данные о количестве использованных в анализе экспериментальных работ, количестве опытных точек, временном диапазоне проведения экспериментов и т.д. приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 2 значения погрешностей рекомендуемых соотношений относятся к максимальному значению температуры из приведенного диапазона применимости.

Таблица 1

**Сводные данные, использованные для получения параметрических зависимостей**

Параметр	Число работ*	Период, гг.	Диапазон температур, К	Общее число точек	Число точек в оценке
Плотность	22	1950 – 2011	454 – 2100	564	539
Коэффициент динамической вязкости	19	1952 – 1989	454 – 1800	245	193
Удельная теплоемкость	16	1958 – 2000	454 – 1600	155	78
Коэффициент теплопроводности	13	1950 – 2020	454 – 1500	310	163
Коэффициент поверхностного натяжения	12	1955 – 2000	454 – 1770	169	96
Удельное электрическое сопротивление	19	1961 – 1988	454 – 1770	203	174
Скорость звука	1	1969 – 1981	454 – 1100	65	65
* Число работ, по материалам которых проводился анализ					

**Погрешности расчета физических характеристик лития по уравнениям регрессии в сравнении с данными работ [12, 13], %**

Параметр	Данная работа	[12]	[13]
Плотность	0,37	0,51	0,45
Коэффициент динамической вязкости	5,1	4,2	6,2
Удельная теплоемкость	5,3	6,0	6,0*
Коэффициент теплопроводности	4,6 – 12**	12	5 – 15**
Коэффициент поверхностного натяжения	4,7	5,9	5,9
Удельное электрическое сопротивление	1,7	1,5	1,5
Скорость звука	0,5	–	0,5
* В [13] нет «сквозной» формулы для расчета, но рекомендуются три соотношения в зависимости от температуры			
** Величина погрешности определяется в зависимости от температурного диапазона			

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА**

В большинстве случаев физические свойства лития в жидкой фазе описывались регрессионными функциями вида

$$f = \sum_{i=0}^m a_i T^i,$$

где  $a_i$  – коэффициенты регрессии, вычисляемые методом наименьших квадратов. Расчет конкретного параметра осуществлялся с использованием предварительно оцененного набора данных, который определялся по методике, изложенной в [8]. При построении нелинейной регрессионной функции использовался метод Левенберга-Марквардта [9].

Задача выбора степени регрессионной функции, которая обеспечивала наилучшее приближение регрессии к оцененным экспериментальным значениям, решалась с использованием критерия Фишера [10]

$$\frac{R_i - R_{i+1}}{R_{i+1}} (n - m - 1) \geq F_{z,1,n-m-1},$$

где  $F_{z,1,n-m-1}$  –  $z$ -процентная точка  $F$ -распределения с числом степеней свободы 1 и  $n - m - 1$ ;  $m$  – число членов ряда;  $n$  – число экспериментальных точек. Значения  $F$  вычислялись численно с использованием расчетного модуля из библиотеки процедур «SLATEC» [11]. Величина  $R$  находилась на основе минимизации квадратичного функционала вида

$$R = \sum_{i=0}^n (f_{\text{эксп},i} - f_{\text{расч},i})^2 w_i,$$

где  $f_{\text{эксп},i}$ ,  $f_{\text{расч},i}$  – экспериментальное и рассчитанное по регрессионному соотношению значения искомого термодинамического свойства;  $w_i$  – статистический вес экспериментальной точки, определяемый как отношение погрешности в  $i$ -ой точке к суммарной погрешности всех точек эксперимента.

В силу ограничений по объёму статьи, авторы не приводят сведений о химической чистоте лития, с которым проводились эксперименты, т.е. сведений о наличии в нем примесей, что является одним из определяющих факторов. Однако в печатных материалах, на основании которых выполнялась оценка, чистота лития составляла не менее 99,9%.

## РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РЕГРЕССИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ

Наибольшее количество экспериментальных работ относится к определению плотности лития, что объясняется сравнительной простотой выполнения экспериментов. Рекомендуемое полуэмпирическое расчетное соотношение для плотности лития в жидкой фазе  $\rho$  получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 6, 14 – 33], и имеет вид

$$\rho = (560,3 \pm 1,01) - (91,62 \pm 2,29) \cdot 10^{-3} \cdot T - (4,78 \pm 1,03) \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

(здесь и далее  $T$  – температура, К).

Температурный диапазон применимости соотношения (1) – от 454 до 2000 К. Оцененная погрешность расчета плотности лития по (1) составила  $\pm 0,37\%$ . Приведенная здесь величина погрешности для выражения (1) является оценкой «сверху» для расчета во всем указанном диапазоне температур, т.е. максимальной величиной погрешности. Естественно, что величина погрешности в значительной степени зависит от диапазона температур. Например, для диапазона 454 – 1000 К она составляет  $\pm 0,12\%$ , а для диапазона 1400 – 2000 К становится равной  $\pm 0,37\%$ , что в значительной степени определяется увеличением погрешности эксперимента.

Результаты сравнительного расчета по соотношению (1) и формулам, приведенным в справочнике под ред. П.Л. Кириллова [12], справочнике [13] под ред. В.М. Поплавского приведены в табл. 2. К сожалению, в [12] не указаны диапазон температур и погрешности расчета по рекомендованному соотношению. Графическое представление результатов расчета по соотношению (1) в сравнении с данными экспериментов приведено на рис. 1.

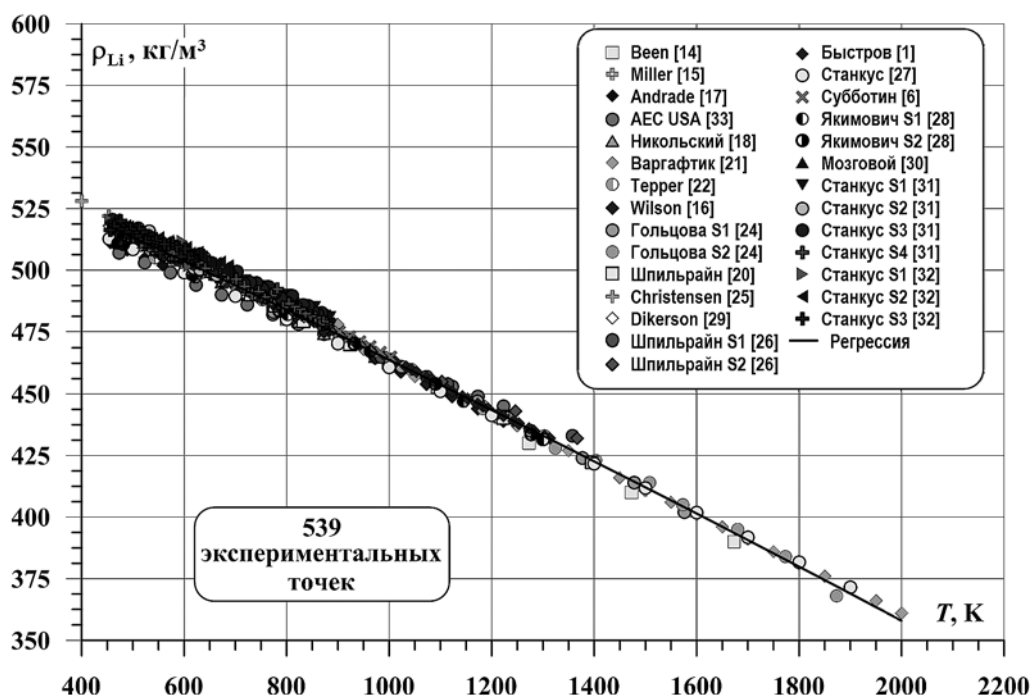


Рис. 1. Зависимость плотности лития от температуры

Полуэмпирическое расчетное соотношение для динамической вязкости лития  $\mu$  в жидкой фазе получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 16 – 19, 23, 34 – 47]:

$$\mu = (1,62 \cdot 10^{-4} \pm 3,410^{-6}) + (1,56 \cdot 10^{-3} \pm 4,9 \cdot 10^{-5}) \cdot \exp[-T/(350,53 \pm 8,96)], \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (2)$$

Температурный диапазон применимости соотношения (2) – от 454 до 1800 К. Результаты сравнительного расчета по соотношениям, указанным в [12, 13], даются в табл. 2.

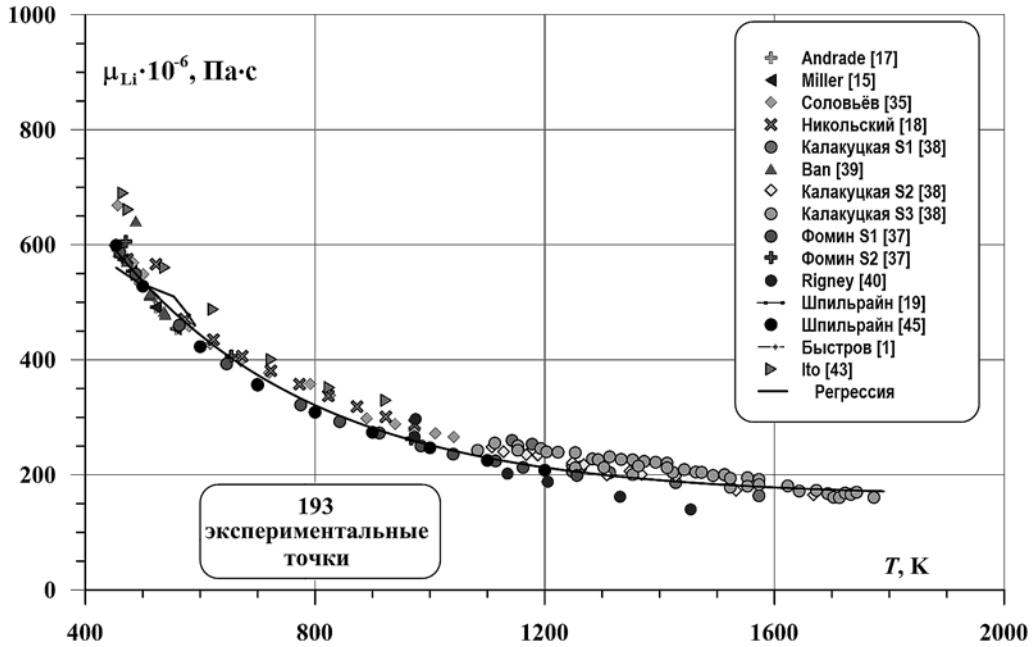


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической вязкости лития от температуры

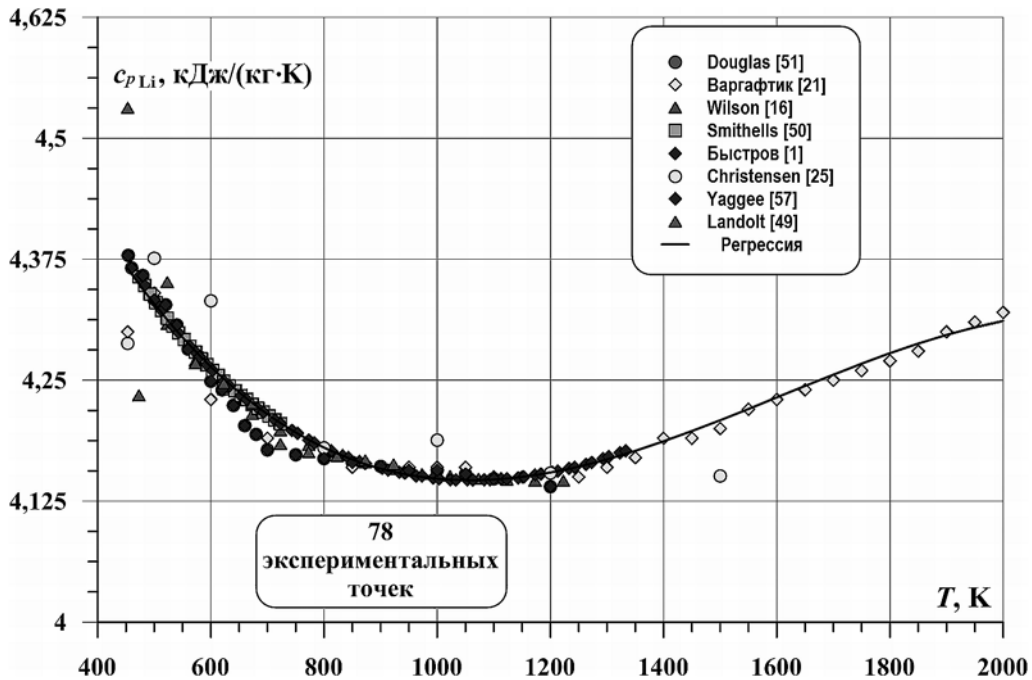


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости жидкого лития от температуры

Графическое представление результатов расчета по соотношению (2) показано на рис. 2. Оценка была выполнена по 193-м экспериментальным точкам.

Расчетное регрессионное полуэмпирическое соотношение для удельной теплоемкости лития  $c_p$  в жидкой фазе получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 16, 18, 19, 21, 25, 48 – 57], и имеет вид

$$c_p = (4,95 \pm 0,03) - (181,52 \pm 9,88) \cdot 10^{-5} \cdot T - (127,89 \pm 9,25) \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + (25,55 \pm 2,67) \cdot 10^{-11} \cdot T^3, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}. \quad (3)$$

Температурный диапазон применимости соотношения (3) – от 454 – 1600 К. Результаты сравнительного расчета величины удельной теплоемкости лития по соотношениям, приведенным в [12, 13], см. в табл. 2. Графическое представление данных эксперимента и расчета по соотношению (3) даётся на рис. 3. Оценка была выполнена по 78-ми экспериментальным точкам. Погрешность рекомендуемого соотношения составляет 5,3%.

Одним из наиболее сложных параметров для оценки является коэффициент теплопроводности. Именно он является наиболее чувствительным к методикам проведения опытов, чистоте исходного материала, среде проведения эксперимента и т.д. При проведении анализа авторами использовался сравнительно большой массив экспериментальных данных, приведенных в работах [16, 18, 19, 25, 48, 49, 53, 58 – 63], который позволил получить рекомендуемое расчетное соотношение для коэффициента теплопроводности лития  $\lambda$  в жидкой фазе, имеющее вид

$$\lambda = (26,83 \pm 3,1) + (38,24 \pm 7,17) \cdot 10^{-3} \cdot T - (6,65 \pm 3,96) \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}. \quad (4)$$

Для температурного диапазона применимости соотношения (4) 454 – 800 К погрешность  $\varepsilon = 4,56\%$ ; для  $T \in [800 \text{ К}, 1200 \text{ К}]$   $\varepsilon = 7,4\%$ ; для  $T \in [1200 \text{ К}, 1500 \text{ К}]$   $\varepsilon \approx 12\%$ .

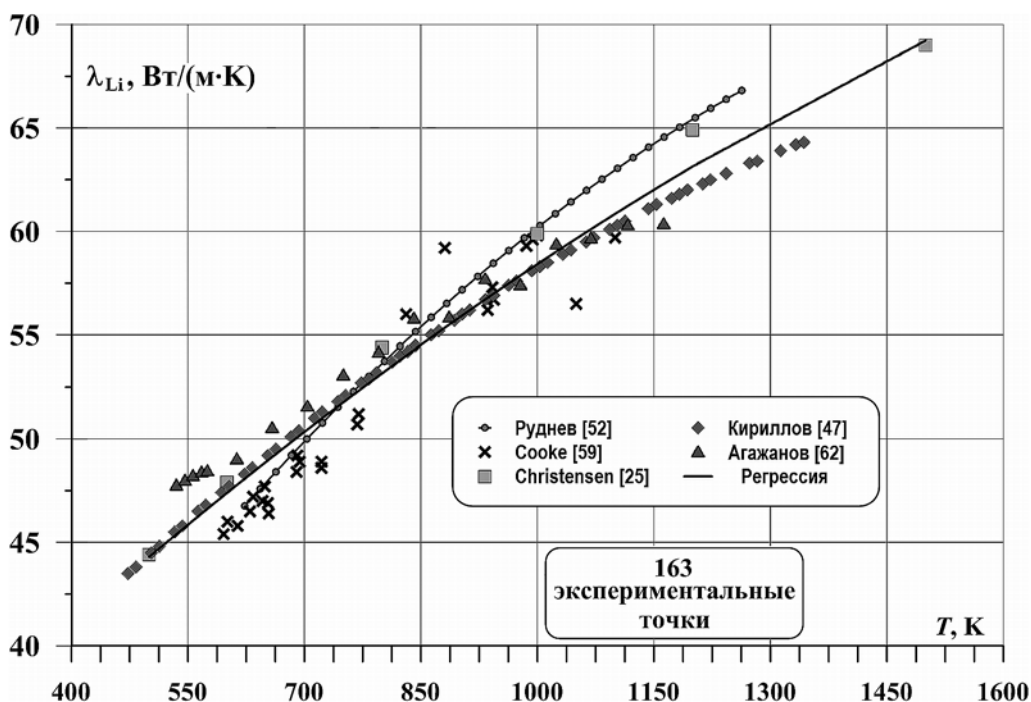


Рис. 4. Результаты экспериментов и расчетная зависимость коэффициента теплопроводности лития от температуры

Результаты сравнительного расчета по соотношениям, приведенным в [12, 13], указаны в табл. 2. На рисунке 4 представлены экспериментальные данные по теплопроводности лития. Отметим, что данные работы [52] представлены в виде полуэмпирических

соотношений без приведения цифрового экспериментального материала. Оценка была выполнена по 163-м экспериментальным точкам.

Расчетное регрессионное полуэмпирическое соотношение для коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  лития в жидкой фазе было получено на основании экспериментальных данных, приведенных в работах [28, 64 – 74], и имеет вид

$$\sigma = (428,77 \pm 0,02) - (17,79 \pm 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot T - (99,197 \pm 6,3) \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + (99,197 \pm 6,3) \cdot 10^{-12} \cdot T^3, \text{ мН/м.} \quad (5)$$

Температурный диапазон применимости соотношения (5) – от 454 до 1770 К. Оцененная величина погрешности расчета по соотношению (5) приведена в табл. 2. Отметим, что в литературных источниках [12, 13] приводится одно и то же выражение для расчета коэффициента поверхностного натяжения.

Графическое представление результатов расчета по соотношению (5) отображено на рис. 5. Оценка была выполнена по 96-ти экспериментальным точкам.

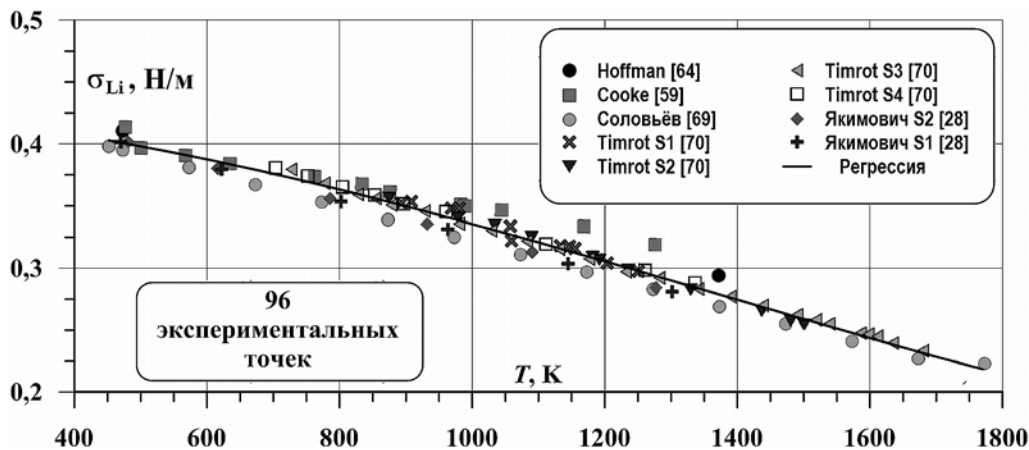


Рис. 5. Результаты экспериментов и расчетная зависимость коэффициента поверхностного натяжения лития от температуры

Рекомендуемое полуэмпирическое расчетное соотношение для удельного электрического сопротивления  $r$  лития в жидкой фазе получено на основании анализа экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 22, 25, 50, 75 – 87, 90], таково:

$$r = (13,04 \pm 2,82) + (28,2 \pm 1,47) \cdot 10^{-3} \cdot T - (10,45 \pm 7,85) \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \text{ Ом·м.} \quad (6)$$

Диапазон применимости соотношения (6) от 454 до 1500 К. Погрешность расчета по соотношению (6) составляет 1,7% (см. табл. 2).

Сравнение с расчетами по соотношениям из [12, 13] показало, что рекомендуемое нами соотношение дает большую на 0,2% погрешность по сравнению с данными [12, 13]. Такой результат объясняется тем, что рекомендуемый диапазон применимости соотношения (6) достигает 1500 К, в то время как в [13] он ограничен значением 1300 К. Графическое представление результатов расчета по соотношению (6) приведено на рис. 6. Оценка была выполнена по 174-м экспериментальным точкам. Отметим, что в справочниках [12, 13] рекомендуется соотношение, заимствованное из работы [1].

При построении регрессионной зависимости для скорости звука  $a$  в жидком литии оказалось, что к настоящему времени есть две работы, опубликованные в открытой печати еще в Советском Союзе [88, 89]. Обработка опытных данных, приведенных в работе [88] (рис. 7), позволила получить следующее соотношение для скорости звука:

$$a = (47,834 \pm 0,095) \cdot 10^2 - (58,84 \pm 0,00117) \cdot 10^{-2} \cdot T, \text{ м/с.} \quad (7)$$

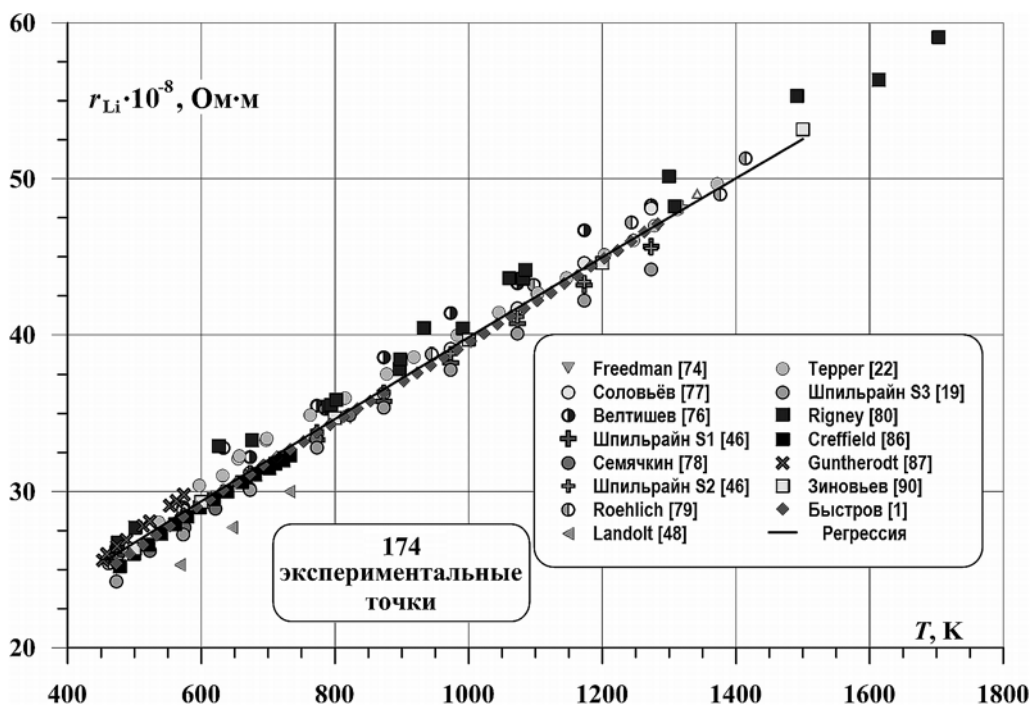


Рис. 6. Результаты экспериментов и расчетная зависимость удельного электрического сопротивления лития от температуры

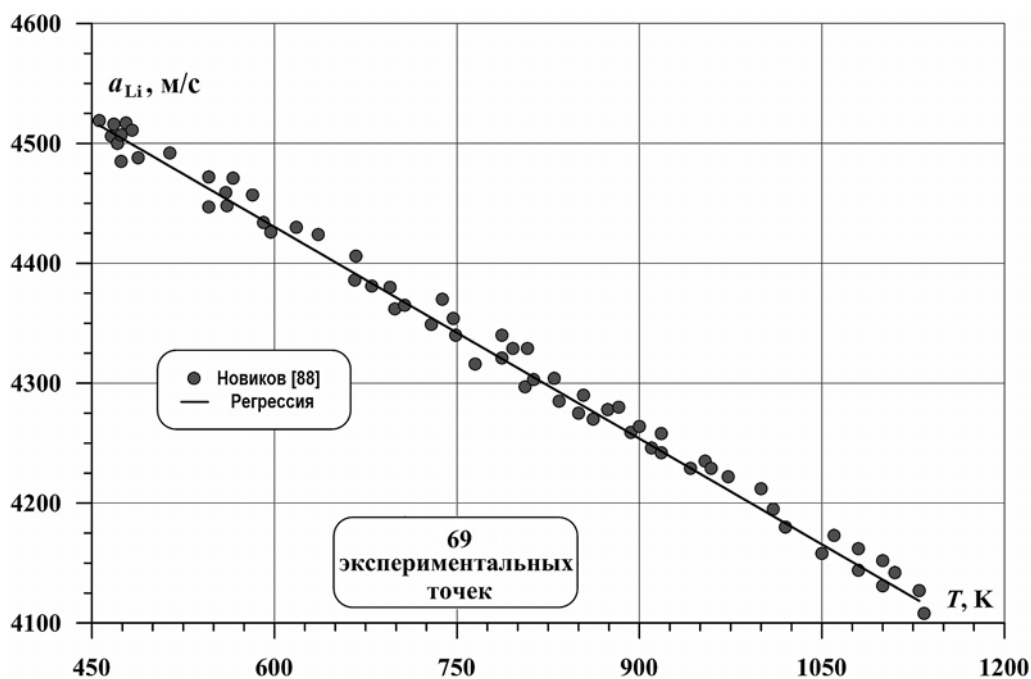


Рис. 7. Результаты эксперимента и расчета по регрессионному соотношению (7) скорости звука в литии в зависимости от температуры

Диапазон применимости соотношения (7) от 454 до 1100 К.

Погрешность расчета величины  $a$  по соотношению (7) составляет 0,5% (см. табл. 2). Влияния частоты на величину скорости звука в диапазоне 1 – 50 МГц не выявлено [6].



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В представленной работе приведены результаты построения регрессионных зависимостей, позволяющих с удовлетворительной степенью точности рассчитывать основные термодинамические свойства лития в жидкой фазе. Зависимости построены на основании анализа большого количества экспериментальных данных, выполненных как отечественными, так и зарубежными авторами за период с 1950-го по 2020-й гг. Анализ основан на применении строго обоснованных с точки зрения математической статистики методик оценки тренда, коррекции и выравнивания данных эксперимента. Оценка погрешности рекомендованных соотношений выполнена на основании расчета удельного веса каждого из экспериментов, использованного в анализе. Для всех рекомендованных соотношений указан температурный диапазон их применимости.

**Литература**

1. Быстров П.И., Каган Д.Н., Кречетова Г.А., Шпильрайн Э.Э. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. – М.: Наука, 1988. – 263 с.
2. Люблинский И.Е., Евтихин В.А., Вертков А.В. Применение жидкого лития в системах энергетического термоядерного реактора. // Перспективные материалы. – 2005. – № 6. – С. 5-17.
3. Nygren R.E., Rognlien T.D., Rensink M.E. et al. A fusion reactor design with a liquid first wall and divertor. // Fus. Eng. Des. 2004. – Vol. 72. – PP. 181-221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2004.07.007>.
4. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970. – 296 с.
5. Грязнов Г.М., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
6. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А. Литий. – М.: ИздАТ, 1999. – 262 с.
7. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. – М.: Атомиздат, 1978. – 256 с.
8. Чусов И.А., Новиков Г.Е., Обысов Н.А., Проняев В.Г. Расчетные соотношения для определения термодинамических свойств свинцового теплоносителя. // ВАНТ. Серия «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. – 30 p.
10. Худсон Д. Статистика для физиков. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 293 с.
11. Vandevender W.H. and 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. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 3 (под ред. П.Л. Кириллова). – М.: Издат, 2014. – 686 с.
13. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Т. 1 (под ред. В.М. Поплавского). – М.: Издат, 2011. – 392с.
14. 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.
15. 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. – 257 p.
16. Wilson J.R. The Structure of Liquid Metals and Alloys. // J. Met. Rev. – 1965. – Vol. 10. – PP. 381-590. Электронный ресурс: <http://www.gotrawama.eu/Fonderia/StructureLiquidMetalsAlloysWilson.pdf> (дата доступа 22.07.2022).
17. Andrade E.N. da C. and Dobbs E.R. The Viscosities of Liquid Lithium, Rubidium and Caesium. // Proc. Roy. Soc., Ser. A. – Feb. 7, 1952. – Vol. 211. – No. 1104. – PP. 12-30. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0022>.

18. 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.
19. Шпильрайн Э.Э., Солдатенко Ю.А., Якимович К.А. и др. Экспериментальное исследование теплофизических и электрофизических свойств жидких щелочных металлов при высоких температурах. // ТВТ. – 1965. – Т. 3. – Вып. 6. – С. 930-933.
20. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А. Плотность жидких лития, рубидия и цезия при высоких температурах. // ТВТ. – 1967. – Т. 5. – Вып. 2. – С. 239-245.
21. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
22. Tepper F., Zelenak J., Roehlich F. and May V. Thermophysical and Transport Properties of Liquid Metals. Report AFML TR-65-99. – Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA: Air Force Materials Lab., 1965. – 112 p.
23. Гришин В.К., Глазунов М.Г., Аракелов А.Г. и др. Свойства лития. – М.: Metallurgizdat. 1963. – 116 с.
24. Гольцова Е.И. Плотность лития, натрия и калия до 1500 – 1600 С. // ТВТ. – 1966. – Т. 4. – Вып. 3. – С. 360-363.
25. Christensen N.E., Fenrbacher B. Volume and Surface Photoemission from Tungsten. Calculation of Band Structure and Emission Spectra. // Phys. Rev. B. – 1974. – V. 10. – No. 6. – PP. 2349-2361. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2349>.
26. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Мозговой А.Г., Цицаркин А.Ф. Экспериментальное исследование плотности жидкого лития при высоких температурах. // ТВТ. – 1984. – Т. 22. – Вып. 4. – С. 802-803.
27. Станкус С.В., Хайруллин Р.А. Плотность природного лития в конденсированном состоянии. // ТВТ. – 1999. – Т. 377. – Вып. 2. – С. 216-219.
28. Якимович К.А., Мозговой А.Г. Экспериментальное исследование плотности и поверхностного натяжения расплавленного лития при температурах до 1300 К. // ТВТ. – 2000. – Т. 38. – Вып. 4. – С. 680-682.
29. Дикерсон Р., Грей Г., Хейт Дж. Основные законы химии. – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 652 с.
30. Мозговой А.Г., Новиков И.И., Покрасин М.А., Рошупкин В.В., Теряев В.В. Давление насыщенных паров щелочных металлов. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1985. – № 1 (51). – С. 3-108.
31. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Мозговой А.Г. Термические свойства перспективных тритийвоспроизводящих материалов и теплоносителей жидкометаллического blankets термоядерного реактора. Литий. // Перспективные материалы. – 2006. – № 1. – С. 48-51.
32. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Мозговой А.Г. Экспериментальное исследование плотности и термического расширения перспективных материалов и теплоносителей жидкометаллических систем термоядерного реактора. Литий. // ТВТ. – 2011. – Т. 49. – Вып. 2. – С. 196-200.
33. Ядерные реакторы. II. Техника ядерных реакторов. / Материалы Комиссии по атомной энергии США. Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1957. – 782 с.
34. Miller R.R. Physical Properties of Liquid Metals. Liquid Metals Handbook. R.N. Lyon (Ed.), 2nd ed. Report NAVEXOSP-733. – Atomic Energy Commission and Dept. Of the Navy, Washington, USA, June 1952 (rev. 1954). – 56 p.
35. Соловьев А.Н. Вязкость расплавленных щелочных металлов (Na, K, Li). Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва. МИФИ. 1954. – 25 с.
36. Новиков И.И., Соловьев А.Н., Хабахпашева Е.М., Груздев В.А., Приданцев А.И., Васенина М.Я. Теплоотдача и теплофизические свойства расплавленных щелочных металлов. // Атомная энергия. – 1956. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 92-106.
37. Фомин В.А. Вязкость жидких щелочных металлов. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва. МИФИ. 1966. – 20 с.
38. Калакуцкая Н.А. Вязкость жидких щелочных металлов калия, натрия и лития при высоких температурах (до 1500°C). // ТВТ. – 1968. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 455-460.
39. Van N.T., Randall C.M. and Montgomery D.J. Effect of Isotopic Mass on Viscosity of Molten Lithium. // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 128. – No. 1. – PP. 6-11. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.128.6>.

40. *Rigney D.V., Kapelner S.M. and Cleary R.E.* The Viscosity of Lithium. Pratt & Whitney Aircraft-CANEL Report TIM-849. 1965. – 37 p.
41. *Achener P.Y.* Viscosity of Liquid Sodium and Lithium. AGN-8181 Vol. 5. Aerojet-General Nucleonics Report. 1965. – 46 p.
42. *Achener P.Y. and Fisher D.L.* Viscosity of Liquid Sodium and Lithium. Vol. 5 of Alkali Metals Evaluation Program. Rep. AGN-8191. Vol. 5. Aerojet-General Corp. May 1967. – 53 p.
43. *Ito Y., Minami K., Nagashima A.* Viscosity of Liquid Lithium by an Oscillating-Cup Viscometer in the Temperature Range 464 – 923 K. // International Journal of Thermophysics. – 1989. – Vol. 10. – No. 1. – PP. 173-182. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00500717>.
44. *Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Тоцкий Е.Е., Тимрот Д.П., Фомин В.А.* Теплофизические свойства щелочных металлов. – М.: Наука, 1970. – 487 с.
45. *Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Сквородько С.Н., Мозговой А.Г.* Плотность и тепловое расширение жидких щелочных металлов. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1983. – № 6 (44). – С. 1-92.
46. *Shpilrain E.E., Yakimovich K.A., Mozgovoia G.* In: Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals. Ed. Ohse R. – Oxford, UK: BlackwellSci.Publ. 1985. – PP. 435-469.
47. *Кириллов П.Л., Денискина Н.Б.* Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей (справочные таблицы и соотношения). ФЭИ-0291. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2000. – 41 с.
48. Справочник по редким металлам. / Под ред. Плющева В.М. – М.: Мир, 1965. – С. 343-383.
49. *Lando, P.E. and Sittig M.* Lithium. In: Rare Metals Handbook, 2nd ed. – New York: Reinhold, 1961. – PP. 239-252.
50. Metals Reference Book. 5th Edition. / Ed.: Colin J. Smithells. – Butterworth-Heinemann, 1976. – 1582 p. ISBN: 9781483192529.
51. *Douglas T.B., Dever J.L., Epstein L.F. and Howland W.H.* The Heat Capacity of Lithium from 250 to 900°C. The Heat of Fusion and the Triple Point. Thermodynamic Properties of the Solid and Liquid. / Rep. 2879. – National Bureau of Standards, Oct. 16, 1953. – 74 p.
52. *Руднев И.И., Ляшенко В.С., Абрамович М.Д.* Температуропроводность натрия и лития. // Атомная энергия. – 1961. – Т. 11. – Вып. 3. – С. 230-232. Электронный ресурс: [http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t11-3\\_1961/go,22/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-3_1961/go,22/) (дата доступа 22.07.2022).
53. *Соловьев А.Н.* Термодинамическое подобие и вязкость расплавленных металлов. // Атомная энергия. – 1957. – Т. 3. – Вып. 12. – С. 550-552. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/256/249> (дата доступа 22.07.2022).
54. *Redmond R.F., Lones J.* Enthalpies and Heat Capacities of Stainless Steel (316), Zirconium, Lithium at Elevated Temperature. – Reactor Experimental Engineering Division. ORNL-1342, 1952. – 24 p.
55. *Cabbage, A.M.* Enthalpy, Mean Heat Capacity, and Absolute Heat Capacity of Solid and Liquid Lithium. / Rep. NEPA-1370. – Fairchild Engine and Airplane Corp. (AECD-3240), Mar. 31, 1950. – 132 p.
56. *Bates A.G. and Smith D.J.* Specific Heat and Enthalpy of Liquid Lithium in the Range of 500°C to 1000°C. – Massachusetts Inst. Tech. (AEC Rep. K-729), Mar. 28, 1951. – 31 p.
57. *Yaggee F.L., Untermeyer S.* The Relative Thermal Conductivities of Liquid Lithium, Sodium, and Eutectic NaK, and the Specific Heat of Liquid Lithium. – ANL-4458, 1950. – 27 p.
58. *Webber H.A., Goldstein D., Fellingner R.C.* Determination of the Thermal Conductivity of Molten Lithium. // Tran. ASME. – 1955. – Vol. 77. – PP. 97-101. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4014245>.
59. *Cooke J.W.* Experimental Determination of the Thermal Conductivity of Liquid Lithium of Molten Lithium from 320 to 830°C. // J. Chem. Phys. – 1964. – Vol. 40. – Iss. 7. – P. 1902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1725421>.
60. *Новиков И.И., Груздев В.А., Краев О.А., Одинцов А.А., Рошупкин В.В.* Экспериментальное исследование теплофизических свойств жидких щелочных металлов при высоких температурах. // ТВТ. – 1969. – Т. 7. – Вып. 1. – С. 71-74.

61. Шпильрайн Э.Э., Крайнова И.Ф. Экспериментальное определение теплопроводности жидкого лития. // ТВТ. – 1970. – Т. 8. – Вып. 5. – С. 1103-1106.
62. 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. – PP. 760-768. DOI: <https://doi.org/10.1080/00319104.2019.1636377>.
63. Taylor J.W. The Surface Energies of the Alkali Metals. // Phys. Mag. – 1955. – Vol. 46. – PP. 867-876. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440808561239>.
64. Hoffman H.W. and Keyes J.J. Jr. Studies in Heat Transfer and Fluid Mechanics Progress. / Report QRNL/TM-1148, August 1965. – 38 p.
65. Achener P.Y. Surface Tension and Contact Angle of Lithium and Sodium. / Report AGN-8191. Vol. 3. – San Ramon, California. USA: Aerojet-General Corporation, 1969. – 55 p.
66. Bohdansky J., Schins H.J. The Surface Tension of the Alkali Metals. // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1967. – Vol. 29. – No. 9. – P. 2173. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(67\)80271-9](https://doi.org/10.1016/0022-1902(67)80271-9).
67. Cooke J.W. Thermophysical Property Measurements of Alkali Liquid Metals. / Report ORNL-3605, Vol. 1. – 1964. – PP. 66-87.
68. Соловьев А.Н., Макарова О.П. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения расплавленных щелочных металлов. / Труды Всесоюзной конференции «Теплофизические свойства жидкостей и газов при высоких температурах». Т. 2. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – С. 112.
69. Соловьев А.Н., Макарова О.П., Кирияненко А.А. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения расплавленных щелочных металлов. / В сб. «Исследование теплофизических свойств веществ». – Новосибирск: Наука, 1967. – С. 29.
70. Тимрот Д.Л., Реутов Б.Ф., Архипов А.П., Еремин Н.М. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения лития. // ТВТ. – 1990. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 601.
71. Шебзухов А.А., Осико Т.П., Кожокова Ф.М., Мозговой А.Г. Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и их сплавов. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1981. – № 5. – С. 1-141.
72. Алчагиров Б.Б., Лазарев В.Б., Хоконов Х.Б. Работа выхода электронов щелочных металлов и сплавов с их участием. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1989. – № 5. – С. 76-147.
73. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1957. – 491 с.
74. Freedman J.F. and Robertson W.D. Electrical Resistivity of Liquid Sodium, Liquid Lithium and Dilute Liquid Sodium Solutions. // J. Chem. Phys. – 1961. – Vol. 34 (3). – PP. 769-780. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1731673>.
75. Kapelner S.M. Samuel M. The Electrical Resistivity of Lithium and Sodium-Potassium Alloy. / Pratt & Whitney Aircraft Div. – United Aircraft Corp., Middeltown, 1961, 33 p.
76. Вельтищев Н.А. Отчет ЭНИН. – 1962. – № 32. – 56 с.
77. Соловьев А.Н. Экспериментальное определение электропроводности жидких натрия, калия и лития. // ПМТФ. – 1963. – № 1. – С. 158-160.
78. Семьячкин Б.Е., Соловьев А.Н. Экспериментальное определение электрического сопротивления жидких щелочных металлов до 1000°C. // ПМТФ. – 1964. – № 2. – С. 176.
79. Roehlich F. and Tepper F. Electrical and Thermal Conductance of Alkali Metals at Elevated Temperatures. // Electrochemical Technology. – 1965. – Vol. 3. – No. 9. – PP. 234-239.
80. Rigney D.V., Kapelner S.M., Cleary R.E. The Electrical Resistivity of Lithium and Columbium-1 wt% Zirconium Alloy to 1430°C. / USAEC Report TIM-849. Pratt-Whitney Aircraft-Canal. – Division of United Aircraft Corp. September 1965. – 98 p.
81. Faber T.E. The Resistivity of Dilute Solutions of Magnesium in Lithium in the Liquid and Solid States. // The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. – 1967. – Vol. 15. – Ser. 8. – PP. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786436708230346>.
82. Арнольдov М.Н., Ивановский М.Н., Субботин В.И., Шматко Б.А. Влияние диссоциирующих и термически прочных газовых примесей на электросопротивление щелочных металлов. // ТВТ. – 1967. – Т. 5. – Вып. 5. – С. 812-816.

83. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат. 1968. – 484 с.
84. Шпильрайн Э.Э., Савченко В.А. Экспериментальное исследование электропроводности лития и цезия в конденсированной фазе при температурах до 1200 К. // ТВТ. – 1968. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 254-260.
85. Ioannides P., Nguyen V.T., Enderby J.E. Measurement of the Absolute Thermoelectric Power of Liquid Conductors Enclosed in Metallic Tubes. // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1975. – Vol. 8. – No. 4. – PP. 315-316. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/8/4/023>.
86. Creffield G.K., Down M.G. and Pulham R.J. Electrical Resistivity of Liquid and Solid Lithium. // Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions. – 1974. – Iss. 21. – PP. 2325-2329. DOI: <https://doi.org/10.1039/dt9740002325>.
87. Guntherodt H.J., Kunzi H.U., Muller U. and Evans R. Hall Coefficient and Electrical Resistivity of Liquid Lithium. // Physics Letters. – 1975. – Vol. 54A. – No. 2. – PP. 155-156. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(75\)90846-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(75)90846-4).
88. Новиков И.И., Трелин Ю.С., Цыганова Т.А. Экспериментальные данные по скорости звука в литии до 1100 К. // ТВТ. – 1969. – Т. 7. – Вып. 6. – С. 1220-1221.
89. Новиков И.И., Рошупкин В.В., Трелин Ю.С., Цыганова Т.А., Мозговой А.Г. Скорость звука в жидких щелочных металлах. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – 1981. – № 6 (32). – С. 65-99.
90. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 382 с.

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

#### Авторы

Чусов Игорь Александрович, профессор, д.т.н.,  
E-mail: [igrch@mail.ru](mailto:igrch@mail.ru)

Бабаева Юлия Андреевна, аспирант  
E-mail: [jule4ka-96@mail.ru](mailto:jule4ka-96@mail.ru)

Новиков Григорий Евгеньевич, главный специалист, секретарь Совета по метрологии  
E-mail: [genovikov@rosatom.ru](mailto:genovikov@rosatom.ru)

UDC 621.039.5

### **CALCULATED RATIOS FOR DETERMINING THE LITHIUM COOLANT THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES**

Chusov I.A.\* \*\*, Babaeva Yu.A.\*\* , Novikov G.E.\*\*\*

\* ОКБ Hidropress JSC

21, Ordzhonikidze Str., 142100 Podolsk, Moscow Reg., Russia

\*\* IATE MEFhI

1, Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

\*\*\* Rosatom State Atomic Energy Corporation

24, Bol'shaya Ordynka Str., 119017 Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of analyzing the experimental data found in open publications for the period from 1950 to 2020. Calculated ratios are proposed to evaluate the key properties of lithium coolant, including density, dynamic viscosity coefficient, specific heat capacity, thermal conductivity coefficient, surface tension coefficient, electrical resistivity and sound velocity.

Values of errors in the proposed ratios and temperature ranges of their applicability are presented. The analysis uses experimental data published in 81 works.

**Key words:** lithium coolant, density, heat capacity, thermal conductivity, dynamic viscosity, surface tension, electrical resistivity, sound velocity, thermodynamic properties, transport properties.

Chusov I.A., Babaeva Yu.A., Novikov G.E. Calculated Ratios for Determining the Lithium Coolant Thermodynamic and Transport Properties. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no., pp. 28-45; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.03> (in Russian).

## REFERENCES

1. Bystrov P.I., Kagan D.N., Krechetova G.A., Shpil'rajn E.E. *Liquid Metal Heat Carriers of Heat Pipes and Power Plants*. Moscow. Nauka Publ., 1988, 263 p. (in Russian).
2. Lyublinskij I.E., Evtihin V.A., Vertkov A.V. Application of Liquid Lithium in Thermonuclear Power Reactor Systems. *Perspektivnye Materialy*. 2005, no. 6, pp. 5-17 (in Russian).
3. Nygren R.E., Rognlien T.D., Rensink M.E., Rensink M., Smolentsev S., Youssef M., Sawan M., Merrill B., Eberle C., Fogarty P., Nelson B., Sze D., Majeski R. A Fusion Reactor Design with a Liquid First Wall and Divertor. *Fus. Eng. Des.* 2004, v. 72, pp. 181-221; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2004.07.007>.
4. Subbotin V.I., Ivanovskij M.N., Arnol'dov M.N. *Physical and Chemical Foundations of Application of Liquid Metal Heat Coolants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1970, 296 p. (in Russian).
5. Gryaznov G.M., Evtihin V.A., Lyublinskij I.E. *Materials Science of Liquid Metal Systems of Thermonuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 240 p. (in Russian).
6. Subbotin V.I., Arnol'dov M.N., Ivanovskij M.N., Mosin A.A., Tarbov A.A. *Lithium*. Moscow. Izdat Publ., 1999, 262 p. (in Russian).
7. Ivanovskij M.N., Sorokin V.P., Yagodkin I.V. *Physical Foundations of Heat Pipes*. Moscow. Atomizdat Publ., 1978, 256 p. (in Russian).
8. Chusov I.A., Novikov G.E., Obysov N.A., Pronyaev V.G. Calculation Relations for Determination of Thermodynamic Properties of Lead Coolant. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh 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, April 2004, 30 p.
10. Hudson D. *Statistics for Physicists*. Moscow. Mir Publ., 1979, 293 p. (in Russian).
11. Vandevender W.H. and Haskell K.H. The SLATEC Mathematical Subroutine Library. *Signum Newsletter*. 1982, v. 17, no. 3, pp. 16-21; DOI: <https://doi.org/10.1145/1057594.1057595>.
12. *Handbook of Thermohydraulic Calculations in Nuclear Power*. Vol. 3. Kirillov P.L. (Ed.). Moscow. Izdat Publ., 2014, 686 p. (in Russian).
13. *Handbook on the Properties of Materials for Advanced Reactor Technologies*. Vol. 1. Poplavskiy V.M. (Ed.). Moscow. Izdat Publ., 2011, 392 p. (in Russian).
14. 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.
15. 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, 257 p.
16. Wilson J.R. The Structure of Liquid Metals and Alloys. *J. Met. Rev.* 1965, v. 10, pp. 381-590. Available at: <http://www.gotrawama.eu/Fonderia/StructureLiquidMetalsAlloysWilson.pdf> (accessed Jul. 22, 2022).
17. Andrade E.N. da C. and Dobbs E.R. The Viscosities of Liquid Lithium, Rubidium and Caesium. *Proc. Roy. Soc., Ser. A*. 1952, v. 211, no. 1104, pp. 12-30; DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0022>.
18. Nikol'skij N.A., Kalakutskaya N.A., Pchelkin I.M., Klassen T.V., Vel'tishcheva V.A. Thermophysical Properties of Molten Metals. *Teplotenergetika*. 1959, no. 2, pp. 92-95 (in Russian).

19. Shpil'rajn E.E., Soldatenko Yu.A., Yakimovich K.A., Fomin V.A., Savchenko V.A., Belova A.M., Kagan D.N., Krajnova I.F. Experimental Investigation of Thermophysical and Electrophysical Properties of Liquid Alkali Metals at High Temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1965, v. 3, iss. 6, pp. 930-933 (in Russian).
20. Shpil'rajn E.E., Yakimovich K.A. Density of Liquid Lithium, Rubidium and Caesium at High Temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1967, v. 5, iss. 2, pp. 239-245 (in Russian).
21. Vargaftik N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow. Nauka Publ., 1972, 720 p. (in Russian).
22. Tepper F., Zelenak J., Roehlich F. and May V. *Thermophysical and Transport Properties of Liquid Metals*. Report AFML TR-65-99. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA: Air Force Materials Lab., 1965, 112 p.
23. Grishin V.K., Glazunov M.G., Arakelov A.G., Vol'dejt A.V., Makedonskaya G.S. Lithium Properties. Moscow. Metallurgizdat Publ., 1963, 116 p. (in Russian).
24. Gol'tsova E.I. The Density of Lithium, Sodium and Potassium is up to 1500 – 1600!. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1966, v. 4, iss. 3, pp. 360-363 (in Russian).
25. Christensen N.E., Fenrbacher B. Volume and Surface Photoemission from Tungsten. Calculation of Band Structure and Emission Spectra. *Phys. Rev. B*. 1974, v. 10, no. 6, pp. 2349-2361; DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2349>.
26. Shpil'rajn E.E., Yakimovich K.A., Mozgovoj A.G., Tsitsarkin A.F. Experimental Study of the Density of Liquid Lithium at High Temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1984, v. 22, iss. 4, pp. 802-803 (in Russian).
27. Stankus S.V., Hajrullin R.A. Density of natural lithium in the condensed state. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1999, v. 377, iss. 2, pp. 216-219 (in Russian).
28. Yakimovich K.A., Mozgovoj A.G. Experimental Investigation of the Density and Surface Tension of Molten Lithium at Temperatures up to 1300 K. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2000, v. 38, iss. 4, pp. 680-682 (in Russian).
29. Dickerson R., Gray G., Hayt J. *Basic Laws of Chemistry*. Vol. 1. Moscow. Mir Publ., 1982, 652 p. (in Russian).
30. Mozgovoj A.G., Novikov I.I., Pokrasin M.A., Roshchupkin V.V., Teryaev V.V. The Pressure of Saturated Alkali Metal Vapors. *Obzory po Teplofizicheskim Svoystvam Veschestv*. 1985, no. 1 (51), pp. 3-108 (in Russian).
31. Stankus S.V., Hajrulin R.A., Mozgovoj A.G. Thermal Properties of Promising Tritium Reproducing Materials and Coolants of a Liquid Metal Blanket of a Thermonuclear Reactor. Lithium. *Perspektivnye Materialy*. 2006, no. 1, pp. 48-51.
32. Stankus S.V., Hajrulin R.A., Mozgovoj A.G. Experimental Study of Density and Thermal Expansion of Promising Materials and Coolants of Liquid Metal Systems of a Thermonuclear Reactor. Lithium. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2011, v. 49, iss. 2, pp. 196-200 (in Russian).
33. Nuclear Reactors. II. Technique of Nuclear Reactors. *Materials of the US Atomic Energy Commission*. Moscow. Inostrannaya Literatura Publ., 1957, 782 p. (in Russian).
34. Miller R.R. *Physical Properties of Liquid Metals*. *Liquid Metals Handbook*. R.N. Lyon (Ed.), 2nd ed. Report NAVEXOSP-733. Atomic Energy Commission and Dept. Of the Navy, Washington, USA, June 1952 (rev. 1954), 56 p.
35. Solov'ev A.N. *Viscosity of Molten Alkali Metals (Na, K, Li)*. Abstract Cand. Sci. (Engineering) Diss. Moscow. MIFI Publ., 1954, 25 p. (in Russian).
36. Novikov I.I., Solov'ev A.N., Habakhpasheva E.M., Gruzdev V.A., Pridancev A.I., Vasenina M.Ya. Heat Transfer and Thermophysical Properties of Molten Alkali Metals. *Atomnaya Energiya*. 1956, v. 1, iss. 4, pp. 92-106 (in Russian).
37. Fomin V.A. *Viscosity of Liquid Alkali Metals*. Abstract Cand. Sci. (Engineering) Diss. Moscow. MIFI Publ., 1966, 20 p. (in Russian).
38. Kalakutskaya N.A. Viscosity of Liquid Alkali Metals of Potassium, Sodium and Lithium at High Temperatures (up to 1500°C). *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1968, v. 6, iss. 3, pp. 455-460 (in Russian).
39. Ban N.T., Randall C.M. and Montgomery D.J. Effect of Isotopic Mass on Viscosity of Molten Lithium. *Phys. Rev.* 1962, v. 128, no. 1, pp. 6-11; DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.128.6>.

40. Rigney D.V., Kapelner S.M. and Cleary R.E. *The Viscosity of Lithium*. Pratt & Whitney Aircraft-CANEL Report TIM-849, 1965, 37 p.
41. Achener P.Y. *Viscosity of Liquid Sodium and Lithium*. AGN-8181 Vol. 5. Aerojet-General Nucleonics Report. 1965.– 46 p.
42. Achener P.Y. and Fisher D.L. *Viscosity of Liquid Sodium and Lithium*. Vol. 5 of Alkali Metals Evaluation Program. Rep. AGN-8191. Vol. 5. Aerojet-General Corp. May 1967. – 53 p.
43. Ito Y., Minami K., Nagashima A. Viscosity of Liquid Lithium by an Oscillating-Cup Viscometer in the Temperature Range 464 – 923 K. *International Journal of Thermophysics*. 1989, v. 10, no. 1, pp. 173-182; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00500717> .
44. Shpil'rajn E.E., Yakimovich K.A., Totsckij E.E., Timrot D.P., Fomin V.A. *Thermophysical Properties of Alkali Metals*. Moscow. Nauka Publ., 1970, 487 p. (in Russian)
45. Shpil'rajn E.E., Yakimovich K.A., Skovorod'ko S.N., Mozgovoij A.G. Density and Thermal Expansion of Liquid Alkali Metals. *Obzory po Teplofizicheskim Svoystvam Veschestv*. 1983, no. 6 (44), pp.1-92 (in Russian).
46. Shpilrain E.E., Yakimovich K.A., Mozgovoij A.G. In: *Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals*. Ohse R. (Ed.), Oxford, UK. BlackwellSci.Publ., 1985, pp. 435-469.
47. Kirillov P.L., Deniskina N.B. *Thermophysical Properties of Liquid Metal Coolants (Reference Tables and Ratios)*. FEI-0291. Moscow. CNIAtominform Publ., 2000, 41 p. (in Russian).
48. *Handbook of Rare Metals*. Plyushchev V.M. (Ed.). Moscow. Mir Publ., 1965, pp. 343-383 (in Russian).
49. Landol P.E. and Sittig M. Lithium. In: *Rare Metals Handbook*, 2nd ed. New York. Reinhold, 1961, pp. 239-252.
50. *Metals Reference Book*. 5th Edition. Colin J. Smithells (Ed.). Butterworth-Heinemann, 1976, 1582 p. ISBN: 9781483192529.
51. Douglas T.B., Dever J.L., Epstein L.F. and Howland W.H. *The Heat Capacity of Lithium from 250 to 900°C. The Heat of Fusion and the Triple Point. Thermodynamic Properties of the Solid and Liquid*. Rep. 2879. National Bureau of Standards, Oct. 16, 1953, 74 p.
52. Rudnev I.I., Lyashenko V.S., Abramovich M.D. Thermal Conductivity of Sodium and Lithium. *Atomnaya Energiya*. 1961, v. 11, iss. 3, pp. 230-232. Available at: [http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t11-3\\_1961/go,22/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-3_1961/go,22/) (accessed Jul. 22, 2022) (in Russian).
53. Solov'ev A.N. Thermodynamic Similarity and Viscosity of Molten Metals. *Atomnaya Energiya*. 1957, v. 3, iss. 12, pp. 550-552. Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/256/249> (accessed Jul. 22, 2022) (in Russian).
54. Redmond R.F., Lones J. *Enthalpies and Heat Capacities of Stainless Steel (316), Zirconium, Lithium at Elevated Temperature*. Reactor Experimental Engineering Division. ORNL-1342, 1952, 24 p.
55. Cabbage, A.M. *Enthalpy, Mean Heat Capacity, and Absolute Heat Capacity of Solid and Liquid Lithium*. Rep. NEPA-1370. Fairchild Engine and Airplane Corp. (AEC-3240), Mar. 31, 1950, 132 p.
56. Bates A.G. and Smith D.J. *Specific Heat and Enthalpy of Liquid Lithium in the Range of 500°C to 1000°C*. Massachusetts Inst. Tech. (AEC Rep. K-729), Mar. 28, 1951, 31 p.
57. Yaggee F.L., Untermeyer S. *The Relative Thermal Conductivities of Liquid Lithium, Sodium, and Eutectic NaK, and the Specific Heat of Liquid Lithium*. ANL-4458, 1950, 27 p.
58. Webber H.A., Goldstein D., Fellingner R.C. Determination of the Thermal Conductivity of Molten Lithium. *Tran. ASME*. 1955, v. 77, pp. 97-102; DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4014245> .
59. Cooke J.W. Experimental Determination of the Thermal Conductivity of Liquid Lithium of Molten Lithium from 320 to 830°C. *J. Chem. Phys.* 1964, v. 40, iss. 7, p. 1902; DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1725421> .
60. Novikov I.I., Gruzdev V.A., Kraev O.A., Odintsov A.A., Roshchupkin V.V. Experimental Study of Thermophysical Properties of Liquid Alkali Metals at High Temperatures. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1969, v. 7, iss. 1, pp. 71-74 (in Russian).
61. Shpil'rajn E.E., Krajnova I.F. Experimental Determination of Thermal Conductivity of



- Liquid Lithium. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1970, v. 8, iss. 5, pp. 1103-1106 (in Russian).
62. 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, v. 58, no. 6, pp. 760-768; DOI: <https://doi.org/10.1080/00319104.2019.1636377> .
63. Taylor J.W. The Surface Energies of the Alkali Metals. *Phys. Mag.* 1955, v. 46, pp. 867-876; DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440808561239> .
64. Hoffman H.W. and Keyes J.J. Jr. *Studies in Heat Transfer and Fluid Mechanics Progress*. Report QRNL/TM-1148, August 1965, 38 p.
65. Achener P.Y. *Surface Tension and Contact Angle of Lithium and Sodium*. Report AGN-8191. V. 3. San Ramon, California. USA: Aerojet-General Corporation, 1969, 55 p.
66. Bohdansky J., Schins H.J. The Surface Tension of the Alkali Metals. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1967, v. 29, no. 9, p. 2173; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(67\)80271-9](https://doi.org/10.1016/0022-1902(67)80271-9) .
67. Cooke J.W. *Thermophysical Property Measurements of Alkali Liquid Metals*. Report ORNL-3605, v. 1, 1964, pp. 66-87.
68. Solov'ev A.N., Makarova O.P. Experimental Study of the Surface Tension of Molten Alkali Metals. *Proc. of the Conf. «Thermophysical Properties Of Liquids and Gases at High Temperatures»*. Vol. 2. Moscow. Izdatelstvo Standartov Publ., 1969, p. 112 (in Russian).
69. Solov'ev A.N., Makarova O.P., Kiriyanenko A.A. Experimental Study of the Surface Tension of Molten Alkali Metals. In Book: *Investigation of Thermophysical Properties of Substances*. Novosibirsk. Nauka Publ., 1967, p. 29 (in Russian).
70. Timrot D.L., Reutov B.F., Arhipov A.P., Eremin N.M. Experimental Study of Lithium Surface Tension. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1990, v. 28, iss. 3, p. 601 (in Russian).
71. Shebzukhov A.A., Osiko T.P., Kozhokova F.M., Mozgovoj A.G. Surface Tension of Liquid Alkali Metals and their Alloys. *Obzory po Teplofizicheskim Svoystvam Veschestv*. 1981, no. 5, pp. 1-141 (in Russian).
72. Alchagirov B.B., Lazarev V.B., Hokonov H.B. The Work of the Electron Output of Alkali Metals and Alloys with their Participation. *Obzory po Teplofizicheskim Svoystvam Veschestv*. 1989, no. 5, pp. 76-147 (in Russian).
73. Semenchenko V.K. *Surface Phenomena in Metals and Alloys*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1957, 491 p. (in Russian).
74. Freedman J.F. and Robertson W.D. Electrical Resistivity of Liquid Sodium, Liquid Lithium and Dilute Liquid Sodium Solutions. *J. Chem. Phys.* 1961, v. 34 (3), pp. 769-780; DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1731673> .
75. Kapelner S.M. Samuel M. *The Electrical Resistivity of Lithium and Sodium-Potassium Alloy*. Pratt & Whitney Aircraft Div. United Aircraft Corp., Middeltown, 1961, 33 p.
76. Vel'tishchev N.A. ENIN Report. 1962, no. 32, 56 p. (in Russian).
77. Solov'ev A.N. Experimental Determination of Electrical Conductivity of Liquid Sodium, Potassium and Lithium. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*. 1963, no. 1, pp. 158-160 (in Russian).
78. Semyachkin B.E., Solov'ev A.N. Experimental Determination of the Electrical Resistance of Liquid Alkali Metals up to 1000°C. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*. 1964, no. 2, p. 176 (in Russian).
79. Roehlich F. and Tepper F. Electrical and Thermal Conductance of Alkali Metals at Elevated Temperatures. *Electrochemical Technology*. 1965, v. 3, no. 9, pp. 234-239.
80. Rigney D.V., Kapelner S.M., Cleary R.E. *The Electrical Resistivity of Lithium and Columbium-1 wt% Zirconium Alloy to 1430°C*. USAEC Report TIM-849. Pratt-Whitney Aircraft-Canal. Division of United Aircraft Corp. September 1965, 98 p.
81. Faber T.E. The Resistivity of Dilute Solutions of Magnesium in Lithium in the Liquid and Solid States. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 1967, v. 15, ser. 8, pp. 1-8; DOI: <https://doi.org/10.1080/14786436708230346> .
82. Arnol'dov M.N., Ivanovskij M.N., Subbotin V.I., Shmatko B.A. The Effect of Dissociating and Thermally Strong Gas Impurities on the Electrical Resistance of Alkali Metals. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1967, v. 5, iss. 5, pp. 812-816 (in Russian).
83. Chirkin V.S. *Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials*. Handbook. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 484 p. (in Russian)

84. Shpil'rajn E.E., Savchenko V.A. Experimental Study of the Electrical Conductivity of Lithium and Caesium in the Condensed Phase at Temperatures up to 1200 K. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1968, v. 6, iss. 2, pp. 254-260 (in Russian).

85. Ioannides P., Nguyen V.T., Enderby J.E. Measurement of the Absolute Thermoelectric Power of Liquid Conductors Enclosed in Metallic Tubes. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1975, v. 8, no. 4, pp. 315-316; DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/8/4/023>.

86. Creffield G.K., Down M.G. and Pulham R.J. Electrical Resistivity of Liquid and Solid Lithium. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*. 1974, iss. 21, pp. 2325-2329; DOI: <https://doi.org/10.1039/dt9740002325>.

87. Guntherodt H.J., Kunzi H.U., Muller U. and Evans R. Hall Coefficient and Electrical Resistivity of Liquid Lithium. *Physics Letters*. 1975, v. 54A, no. 2, pp. 155-156; [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(75\)90846-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(75)90846-4)

88. Novikov I.I., Trelin Yu.S., Tsyganova T.A. Experimental Data on the Speed of Sound in Lithium up to 1100 K. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1969, v. 7, iss. 6, pp. 1220-1221 (in Russian).

89. Novikov I.I., Roshchupkin V.V., Trelin Yu. S., Tsyganova T.A., Mozgovoj A.G. The Speed of Sound in Liquid Alkali Metals. *Obzory po Teplofizicheskim Svoystvam Veschestv*. 1981, no. 6 (32), pp. 65-99 (in Russian).

90. Zinov'ev V.E. *Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures*. Handbook. Moscow. Metallurgiya Publ., 1989, 384 p. (in Russian).

#### Authors

Chusov Igor Alexandrovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [igrch@mail.ru](mailto:igrch@mail.ru)

Babaeva Yulia Andreevna, PhD Student

E-mail: [jule4ka-96@mail.ru](mailto:jule4ka-96@mail.ru)

Novikov Grigory Evgenievich, Chief Specialist of Department, Secretary of the Metrology Council

E-mail: [genovikov@rosatom.ru](mailto:genovikov@rosatom.ru)