

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э. БАУМАНА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
ЦЕНТР ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

---

# **НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ**

ДЕСЯТАЯ  
ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
(Москва, 29–31 января 2019 года)

Труды  
В трех частях  
Часть II

Москва  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

2019

УДК 536.75

ББК 22.317

Н 52

Необратимые процессы в природе и технике : Десятая  
Н 52 Всерос. конф. : Труды : в 3 ч. / Министерство науки и  
высшего образования Российской Федерации, Московский  
государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.

ISBN 978-5-7038-5083-1

Ч. II. – 380, [1] с.

ISBN 978-5-7038-5085-5

В трудах Десятой Всероссийской конференции приведены  
результаты, полученные авторами в области исследования  
необратимых процессов в природе и технике.

Труды конференции предназначены для студентов, аспирантов и  
научных работников.

УДК 536.75

ББК 22.317

ISBN 978-5-7038-5085-5 (Ч. II)

ISBN 978-5-7038-5083-1

© Центр прикладной физики

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

# УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА В ЖИДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛАХ

*Я.З. Вильф, А.В. Мокшин*  
*Казанский Федеральный Университет*

Жидкие щелочные металлы обладают уникальными физико-химическими свойствами. Из металлических систем они обладают самой низкой плотностью и вязкостью, высокой электро- и теплопроводностью, низкими значениями поверхностного натяжения и работы выхода электрона, рекордно низкой температурой плавления и широкой областью жидкого состояния, и т.д. Благодаря этим свойствам, жидкие щелочные металлы, их сплавы и содержащие их соединения имеют широкое практическое применение, например, (1) в ядерно-космической энергетике и тепловых трубах, как легкие эффективные теплоносители, способные обеспечить быстрый и высокоэффективный отвод тепла; (2) в области химических источников тока – как аккумуляторы, топливные элементы с высокой удельной энергоемкостью, надежностью, долговечностью и миниатюрностью; (3) как добавка к жидким топливам для повышения удельной теплоты сгорания, и т.д. С другой стороны, они обладают высокой химической активностью и большой упругостью собственных паров, что сильно осложняет исследование их транспортных свойств.

В данной работе на основе экспериментальных данных [1-2] обнаружено, что температурные зависимости ряда (транспортных) характеристик жидких щелочных проявляют универсальность.

Как известно, равновесная жидкость характеризуется температурным диапазоном  $T_M \leq 0 \leq T_B$ , где  $T_M$  и  $T_B$  – значения температур плавления и кипения конкретной жидкости (в градусах Кельвина) соответственно. Очевидно, что для сопоставления температурных зависимостей какой-либо величины для разных систем (жидкостей) необходимо использовать приведенную температурную шкалу. Например, в работе [3] для проверки закона соответственных состояний для жидких щелочных металлов использовалась приведенная температура  $\tilde{T} = \frac{k_B T}{\varepsilon}$ , где  $\varepsilon$  – характеристическая энергия. Неоднозначность выбора такой приведенной температурной шкалы заключается в том, что приведенные

температуры, тем не менее, остаются зависимыми от системы (материала) и могут быть разными даже для систем одного и того же типа. Поэтому, такие приведенные температуры нельзя рассматривать, как удобные параметры, относительно которых можно было бы произвести оценку универсальности температурных зависимостей транспортных свойств жидких щелочных металлов.

Нами предлагается следующий подход. Необходимо ввести температурную шкалу  $\tilde{T}$ , в которой упомянутые выше контрольные точки – температура плавления и температура кипения – фиксированы и имеют одинаковые значения для всех систем. Для этого определим следующее соответствие между значениями для температур плавления и кипения:

$$\begin{aligned}\tilde{T} &= 1 \text{ при } T = T_M, \\ \tilde{T} &= 2 \text{ при } T = T_B.\end{aligned}$$

Данные условия выполняются при простой линейной зависимости:

$$\tilde{T} = 1 + \frac{T - T_M}{T_B - T_M}$$

При известных  $T_M$  и  $T_B$  для системы это соотношение обеспечивает преобразование температурной шкалы  $T$  в абсолютных единицах (например, в градусах Кельвина) в температурную шкалу  $\tilde{T}$ , где все температуры на заданном диапазоне  $T \in [T_M, T_B]$  калибруются одинаковым образом (см. Рис.1).

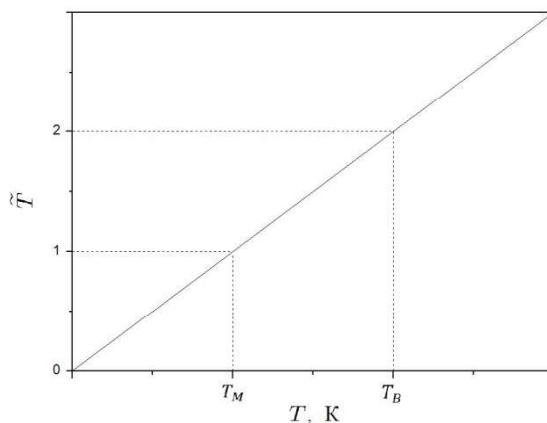


Рис. 1.: Демонстрация преобразования абсолютной температурной шкалы  $T$  в приведенный масштаб  $\tilde{T}$ , который не зависит от системы и характеризуется фиксированными значениями температуры плавления  $T_M = 1$  и температурой кипения  $T_B = 2$ .

В соответствии с данным подходом были пересчитаны известные экспериментальные данные, приводимые в [1]. В таблице 1 приводятся полученные универсальные модели для температурных зависимостей таких

характеристик, как вязкость, удельная теплоемкость при постоянном давлении, теплопроводность и скорость звука жидких щелочных металлов.

Таблица 1. Универсальные уравнения транспортных свойств (вязкость, теплопроводность, теплоемкость при постоянном давлении, скорость звука) для жидких щелочных металлов.

| Величина         | Универсальное уравнение  | Li              | Na              | K               | Rb              | Cs              |
|------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Вязкость         | $\left(\ln\left(\frac{\eta}{\eta_M}\right)\right)^\alpha = -074(\ln \tilde{T})^{0.75}$                                       | $\alpha = 1.08$ | $\alpha = 1.18$ | $\alpha = 1.15$ | $\alpha = 1.13$ | $\alpha = 1.17$ |
| Теплопроводность | $\left(\frac{\lambda(\tilde{T})}{\lambda(\tilde{T}_M)}\right)^\beta = -0.38\frac{\tilde{T}}{\tilde{T}_M} + 1.38$             | $\beta = 0.70$  | $\beta = 0.85$  | $\beta = 0.93$  | $\beta = 1.05$  | $\beta = 1.55$  |
| Теплоемкость     | $\left(\frac{C_P(\tilde{T})}{C_P(\tilde{T}_{min})}\right)^\sigma = \left(\frac{\tilde{T}}{\tilde{T}_{min}} - 1\right)^2 + 1$ | $\sigma = 2.65$ | $\sigma = 1.52$ | $\sigma = 1.88$ | $\sigma = 1.5$  | $\sigma = 0.45$ |
| Скорость звука   | $\left(\frac{v}{v_M}\right)^\gamma = -\frac{7}{36}\tilde{T} + \frac{43}{36}$   | $\gamma = 1.18$ | $\gamma = 1.18$ | $\gamma = 0.98$ | $\gamma = 0.96$ | $\gamma = 0.90$ |

Полученные результаты убедительно подтверждают применимость принципа соответствующих состояний к семейству жидких щелочных металлов. Эти результаты могут служить для построения теоретических моделей транспортных характеристик в жидкостях, а также, развития общей теории жидкого состояния.

1. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Рипол Классик, 1963.
2. *Davison H. W.* Compilation of thermophysical properties of liquid lithium. – 1968.
3. *Prakash S. G., Ravi R., Chhabra R. P.* Corresponding states theory and transport coefficients of liquid metals //Chemical physics. – 2004. – Т. 302. – №. 1-3. – С. 149-159.