

УДК 536.223

Измерение коэффициентов теплопроводности жидкостей и жидких сред при различных температурах*

В.В. Черепанов, С.Б. Бобошина, Е.В. Лихушина, С.Ю. Побережский

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия

e-mail: ps801801@yandex.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-6-253-257

Поступила в редакцию 15.05.2021

После доработки 19.05.2021

Принята к публикации 24.05.2021

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости теплопроводности ряда органических жидкостей от температуры. Для измерений применялась компенсационная схема с включенными в плечи моста измерительными датчиками – зондами, снабженными резистивными элементами. Коэффициент теплопроводности определялся с помощью кратковременных измерений в стадии иррегулярного теплового режима. Для охлаждения элементов измерительного устройства применялся лед с солью или смесь снега с солью. Приведены результаты измерения теплопроводности жидких диметилформамида и циклогексана для температур 20–100°C и тетрахлорметана для температур 0–75°C. В работе также представлены результаты исследования температурной зависимости теплопроводности парафина вблизи точки плавления–отвердевания. Эти данные могут быть отнесены к фундаментальным и будут интересны специалистам, занимающимся теплообменом и фазовыми переходами.

Ключевые слова: теплопроводность, измерение, метод нагретой нити, органические жидкости, компенсационная схема, ассоциированные жидкости.

Введение

Как известно, жидкости занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами. Их теоретическое описание осложняется целым рядом особенностей таких сред и далеко от своего завершения. Среди большого количества жидкостей наиболее сложным поведением отличаются ассоциированные жидкости, в которых благодаря водородным связям атомы и молекулы объединяются в комплексы – ассоциации. Для ассоциированных жидкостей применяются методы описания, основанные исключительно на результатах эксперимента. Теплофизические свойства подобных жидкостей могут

существенно зависеть от параметров состояния. Поэтому результаты экспериментального исследования таких зависимостей всегда имеют научный и практический интерес. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований при нормальном давлении зависимости от температуры теплопроводности однокомпонентных органических жидкостей, свойства которых ранее не анализировались, но могут быть полезны для решения различных технических задач, в области теплообмена, гидродинамики, проектирования систем контурного охлаждения, в атомном машиностроении и др.

Методика измерений

В ходе исследования коэффициент теплопроводности веществ определялся по их откли-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 20-08-00465.

ку на кратковременное тепловое воздействие при реализации иррегулярного теплового режима. Применялась компенсационная схема с включенными в плечи моста измерительными датчиками – зондами, снабженными резистивными элементами [1–3].

В работе [4] было показано, что расчетное соотношение, которое определяет искомую теплопроводность жидкости при температуре T , имеет вид

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \times \left[\frac{R_1(T_0)}{R_1(T)} \right]^3 \frac{R_{i0}(T) \left[1 + \frac{2\beta(T-T_0)}{\alpha} \right]}{R_{i0}(T_0)}, \quad (1)$$

где T_0 – начальная температура жидкости; $\lambda(T_0)$ – теплопроводность жидкости при температуре T_0 ; $R_1(T_0)$ и $R_1(T)$ – сопротивления в плече измерительного моста при температурах T_0 и T ; $R_{i0}(T_0)$ и $R_{i0}(T)$ – сопротивления измерительного зонда при температурах T_0 и T ; α и β – коэффициенты при линейном и квадратичном членах зависимости сопротивления от температуры зонда.

Для заданной величины δT нагрева резистивного элемента сопротивление зонда будет зависеть от длины его активной части:

для плоского зонда:

$$L = \frac{e}{\delta T^{3/2}} \frac{2\sqrt{ht}^{1/2}}{\alpha\sqrt{\rho\epsilon\pi}^{1/2}}, \quad (2)$$

для линейного зонда:

$$L = \frac{e}{\delta T^{3/2}} \frac{r_0\sqrt{4at}}{\alpha\sqrt{\rho\lambda}}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление материала зонда; ϵ – тепловая активность; a – температуропроводность; t – время; α – коэффициент при линейном члене зависимости сопротивления от температуры зонда; e – электрический сигнал (напряжение) с измерительных точек моста; h и r_0 – толщина и радиус резистивного элемента соответственно.

Важно отметить, что длина L измерительного зонда зависит от характеристического размера. Как показывают расчеты, при использовании, например, нитяного зонда с радиусом

50 мкм при уровне полезного сигнала в 10^{-2} В для проведения измерений с максимальным импульсным перегревом в 0.1 К потребуется применение измерительного зонда длиной более 10 м. Понятно, что изготовление таких зондов невозможно. Однако использование малоинерционных резистивных элементов дает существенный выигрыш в их длине. Особенно заметен он становится при использовании напыленных элементов, которые обладают очень малой толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$ [4].

Измерительный цикл содержит следующую последовательность действий. Перед началом исследований измерительный и компенсационный зонды вводились в контакт с эталонной жидкостью, на них подавалась периодическая последовательность измерительных прямоугольных импульсов длительностью 40 мс, частота которых выбиралась из условий наибольшего удобства визуального наблюдения сигнала на экране осциллографа и составляла 1 Гц. В паузе между импульсами, когда происходило практически полное исчезновение возникшего возмущения температурного поля, осуществлялись компенсация переменного сигнала и баланс мостовой схемы.

Далее в сосуде с измерительным зондом менялась температура. Сосуд с компенсационным зондом был заполнен трансформаторным маслом, температура в сосуде оставалась постоянной и равной 0°C .

Для охлаждения элементов измерительного устройства в эксперименте использовался лед с солью из расчета тридцать килограммов соли на сто килограммов льда. Такой состав позволяет понизить температуру плавления льда до -21°C и измерять характеристики жидкости, в том числе и при температурах меньших 0°C . Для нагревания использовался термостат фирмы Medingen (Dresden, Germany) с мощностью 1.3 кВт и абсолютной погрешностью 0.1°C .

Источники погрешности полученных результатов включают связанную с методикой проведения исследований методическую погрешность, погрешность приборов, используемых для регистрации измеряемых величин – приборную погрешность, а также погрешность измерительных зондов – инструментальную погрешность. По сделанным оценкам, полная погрешность всех измерений не превышала 2%.

Результаты экспериментов

Измерения теплопроводности жидких диметилформамида и циклогексанола проводились при нормальном давлении для диапазона температур 20–100°C, теплопроводности тетрахлорметана (четырёххлористого углерода) – для температур 0–75°C.

Результаты исследования теплопроводности указанных жидкостей показаны на рис. 1.

Экспериментальные данные на рис. 1 отмечены точками, линии – аппроксимационные зависимости, полученная методом наименьших квадратов (МНК). Они имеют следующий вид:

диметилформамид $\lambda = 0.1958 - 0.000378T$,

циклогексанон $\lambda = 0.1438 - 0.00018T$,

тетрахлорметан $\lambda = 0.1084 - 0.00021T$.

Точки, соответствующие температуре 20°C, взяты для сравнения из справочника [6].

Молекулы диметилформамида и циклогексанола имеют донор электронов, но у них отсутствует активный водород, т.е. они объединяются в один класс жидких растворов по классификации Эвелла [5]. Молекулы тетрахлорметана содержат активный водород и не содержат донора электронов и, таким образом, относятся к другому классу жидкостей по Эвеллу.

Видно, что коэффициент теплопроводности жидкостей на рис. 1 практически линейно уменьшается с ростом температуры, что полностью соответствует общепринятым представлениям о теплопроводном теплопереносе в жидкостях. Абсолютные значения теплопроводностей обусловлены индивидуальными особенностями исследованных жидкостей. Существенных различий в угле наклона аппроксимационных прямых для жидкостей разных классов не выявлено.

В таблице для полноты картины приведены некоторые дополнительные физические свойства исследованных жидкостей [6].

Известные свойства исследуемых жидкостей

№№ п/п	Название жидкости	Характеристики жидкости				
		Химическая формула	Плотность (при 20°C) ρ , кг/м ³	Молярная масса μ , кг/моль	Удельная теплоемкость (при 20°C) c_p , Дж/(кг·К)	Температура кипения, °C
1	Диметилформамид	(CH ₃) ₂ NC(O)H	944.5	0.07309	2061	153
2	Циклогексанон	C ₆ H ₁₂	947.8	0.09814	1800	155.6
3	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод)	CCl ₄	1594	0.15382	862	76.5

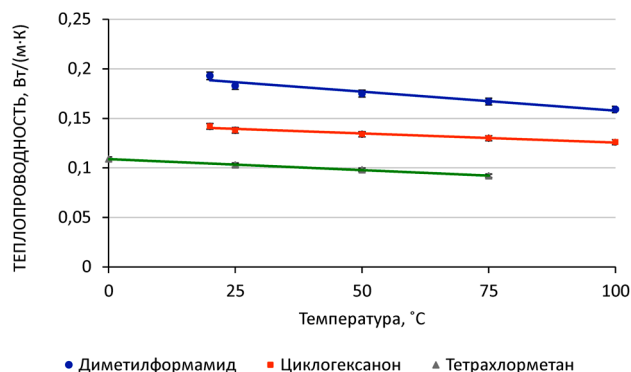


Рис. 1. Графики зависимости теплопроводности диметилформамида, циклогексанола и тетрахлорметана от температуры при давлении 101 кПа

Согласно формуле Предводителя–Варгафтика [5], теплопроводность пропорциональна плотности жидкости в степени 4/3:

$$\lambda = \frac{B}{\alpha} \rho^{4/3}, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости; α – коэффициент, характеризующий степень ассоциации жидкости; комплекс $B = A c_p \mu^{-1/3}$ включает теплоемкость c_p и величину A , по отдельности зависящие от температуры, но имеющие независимое от температуры произведение [7]. Поэтому такие величины в относительно небольшом диапазоне исследованных температур можно приблизительно считать постоянными. Значение c_p приведено в таблице, величина A принималась равной $A = 4.28 \cdot 10^{-9} \frac{\text{М}^3}{\text{с} \cdot \text{моль}^{1/3}}$. С помощью соотношения (4) по результатам измерений теплопроводности для исследованных жидкостей был рассчитан коэффициент ассоциации α жидкостей:

диметилформамид – $\alpha = 1.013$;

циклогексанон – $\alpha = 1.095$;

тетрахлорметан – $\alpha = 1.222$.

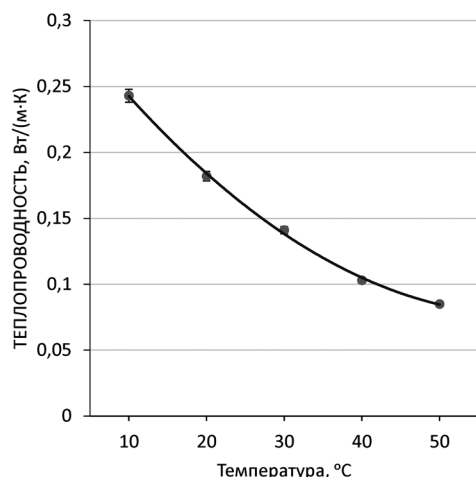


Рис. 2. Зависимость теплопроводности парафина от температуры в окрестности точки плавления–отвердевания 47,5°C

Таким образом, первые две жидкости ассоциированы слабо, а тетрахлорметан можно отнести к ассоциированным жидкостям с образованием внутри них молекулярных комплексов, обусловленных водородными связями.

В исследовании также были проведены измерения коэффициента теплопроводности парафина при различных температурах. Парафин – это химическое соединение, которое было открыто в 1830 г. немецким химиком Карлом фон Райкенбахом и представляет собой воскоподобную смесь предельных углеводородов (алканов) преимущественно нормального строения и состава от $C_{18}H_{38}$ (октадекан) до $C_{35}H_{72}$ (пентатриоконтан). В парафинах обычно содержится некоторое количество изопарафиновых углеводородов, а также углеводородов с ароматическим или нафтеновым ядром в молекуле.

Ниже представлены результаты исследования температурной зависимости теплопроводности парафина вблизи точки плавления–отвердевания, которая при нормальном давлении лежит в диапазоне 45–65°C. На рис. 2 приведен график зависимости теплопроводности парафина от температуры. Полученная в результате исследования зависимость, как видим, имеет существенно нелинейный характер и содержит точку плавления–отвердевания, которая для данного вещества составляет 47,5°C.

Эти данные могут быть востребованы при более глубоких исследованиях физических процессов, происходящих в веществах на микро- и наномасштабах и сопровождающих изменение их агрегатных состояний [5, 6].

Заключение

Для ряда жидкостей, представляющих практический интерес, при нормальном давлении проведено исследование зависимости их теплопроводности от температуры. Выявлен линейный характер, практически не зависящий от классов жидкостей по классификации Эвелла. Для исследованных жидкостей установлены значения коэффициента ассоциации, позволяющего выявить наличие водородных связей у их молекул. Аналогичные исследования в окрестности температуры плавления–отвердевания проведены для парафина, который может рассматриваться как эталонное вещество при исследовании процессов изменения агрегатного состояния.

Полученные результаты могут быть использованы в различных областях машиностроения, энергетики, транспорта, фармацевтики, а также в авиационной и космической отраслях при проектировании и эксплуатации различных типов теплообменных установок, при подборе компонент хладагентов, используемых в контурах охлаждения, где большое значение имеют проблемы термокомпенсации в условиях достаточно большого хода температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобошина С.Б., Климов А.В., Побережский С.Ю., Черепанов В.В., Широкова Е.К.** Аддитивность коэффициентов теплопроводности в бинарных растворах некоторых жидкостей. Эксперимент // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 7. С. 313–319.
2. **Побережский С.Ю.** Теплопроводность бинарных растворов органических жидкостей по группам классификации Эвелла // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4.
3. **Спирин Г.Г.** Методические особенности кратковременных измерений в стадии иррегулярного теплового режима // ИФЖ. 1980. Т. 38. № 3. С. 403–410.
4. **Василевский Д.В.** Экспресс-диагностика теплофизических свойств полупрозрачных сред: дис...канд. техн. наук: 01.04.14. Москва, 1999. 138 с.
5. **Филиппов Л.П.** Подobie свойств веществ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 256 с.
6. **Варгафтик Н.Б. и др.** Справочник по теплопроводности жидкостей и газов М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
7. **Цедерберг Н.В.** Теплопроводность газов и жидкостей. М.: Гостехиздат, 1963. 468 с.
8. **Петров В.А., Марченко Н.В.** Перенос энергии в частично прозрачных твердых материалах. М.: Стандарты, 1977. 189 с.
9. **Спирин Г.Г., Накашидзе Е.А., Кудрявцева Л.Н.** Кратковременные измерения тепловой активности в области плавления веществ // ИФЖ. 1985. Т. 48. № 1.

Measuring heat conductivity factors of liquids and liquid media at various temperatures

V.V. Cherepanov, S.B. Boboshina, E.V. Likhushina, S.Yu. Poberezhsky

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia
e-mail: ps801801@yandex.ru*

Theoretical description of liquids behavior occupying an intermediate position between solids and gases faces serious difficulties. In associated liquids atom form complexes, i.e. associations, and methods for such liquids description are based on experimental studies. Thermal-physical properties of liquids depend drastically on pressure and temperature. Thus, studying temperature dependencies of liquids characteristics is of high relevance.

The article presents the results of experimental studies of a number of organic liquids thermal conductivity in dependence on temperature. The heat conductivity factor was being determined with the short-time measurements at the stage of irregular thermal mode. Compensation circuit with measuring sensor-probes equipped with resistive elements connected to the bridge legs was employed. A periodic sequence of measuring rectangular pulses was being fed to the probes. Variable signal compensation and the bridge circuit balancing were being realized during the pause between the pulses when almost complete disappearance of the of the originated temperature field disturbance was taking place. The heat conductivity factor measurements were performed for liquid dimethylformamide and cyclohexanone at the temperatures of 200°C – 1000°C, and for carbon tetrachloride at temperatures of 0°C – 75°C. Ice with salt, or snow and salt mixture were being applied for the measuring facility elements cooling. Measurement error was no more than 2%. The heat conductivity factor of all liquids decreases linearly with temperature increase. Approximations of experimental dependences were obtained by the least squares method. The association degree of the studied liquids was computed with the Predvoditelev-Vargaftik formula. The article presents also the results of paraffin heat conductivity factor studies in the vicinity of melting-solidification point. These data are fundamental and may present interest for the specialists dealing with heat exchange and phase transitions.

The obtained results can be used in various fields of mechanical engineering, energetics, transport, pharmaceuticals, as well as in the aerospace field. They may come in handy while design and operation of various types of heat exchange plants, as components of refrigerants used in cooling circuits, as well as when the problems of thermal compensation are of great importance in conditions of a sufficiently large variation of temperature and a wide temperature range during the operation of modern equipment.

Keywords: heat conductivity; measurement; heated thread method; organic liquids; compensation scheme, associated liquids.

REFERENCES

1. **Boboshina S.B., Klimov A.V., Poberezhsky S.Yu., Cherepanov V.V., Shirokova E.K.** Additivnost' koeffitsientov teploprovodnosti v binarnykh rastvorakh nekotorykh zhidkostej. Eksperiment [An additivity of thermal conductivity coefficients in binary solutions of some liquids. Experiment] // *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 7, pp. 313–319. In Russ.
2. **Poberezhskiy S.Yu.** Teploprovodnost' binarnykh rastvorov organicheskikh zhidkostej po gruppam klassifikatsii Evella [Thermal Activity Measurement of Surface Tissues of Biomedical Object Pulse Methods] // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 4. In Russ. <http://www.science-education.ru/118-13977>. In Russ.
3. **Spirin G.G.** Metodicheskie osobennosti kratkovremennykh izmereniy v stadii iregulyarnogo teplovogo rezhima [Methodological peculiarities of short measurements at the stage of irregular thermal regime] // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1980, vol. 38, no. 3, pp. 227–232. In Russ.
4. **Vasilevsky D.V.** *Ekspress-dagnostika teplofizicheskikh svoystv poluprozrachnykh sred.* Diss. cand. tekhn. nauk [Express diagnostics of thermophysical properties of semitransparent media. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 1999. 138 p. In Russ.
5. **Filippov L.P.** *Podobyie svoystv veshchestv* [Similarity of substances properties]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1978. 256 p. In Russ.
6. **Vargaftik N.B., Filippov L.P., Tarzimanov A.A., Totky E.E.** *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostej i gazov* [Reference book on thermal conductivity of liquids and gases]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p. In Russ.
7. **Tsederberg N.V.** *Teploprovodnost gazov i zhidkostej* [Heat conductivity of gases and liquids]. Moscow: Gostekhizdat, 1963. 468 p. In Russ.
8. **Petrov V.A., Marchenko N.V.** *Perenos energy v chastichno prozrachnykh zhidkiykh materiyalah* [Energy transfer in partially transparent solid materials]. Moscow: Standards, 1977. 189 p. In Russ.
9. **Spirin G.G., Nakashidze E.A., Kudryavtseva L.N.** *Kratkovremennyye izmereniya teplovoy aktivnosti v oblasti plavleniya veshchestv* [Short-time measurement of thermal activity in the substance melting region] // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1985, vol. 48, no. 1, pp. 77–82. In Russ.