

УДК 536.223

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0014

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ И СМЕШАННЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

©2021

Зеленков Геннадий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор,
начальник кафедры «Системный анализ и управление процессами на водном транспорте»

Данцевич Игорь Михайлович, кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»

Мышкина Алена Николаевна, аспирант

Государственный морской университет им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова

(353924, Россия, Новороссийск, пр-т Ленина, 93,

e-mails: mathshell@mail.ru, dantsevich65@mail.ru, alena--n@mail.ru)

Аннотация. Повышение теплонапряженности составляющих судовой энергетической установки основано на использовании широчайшего ассортимента рабочих тел и теплоносителей, среди которых основное место занимают водные растворы электролитов. Высокоэффективное внедрение водных растворов электролитов требует исследования их теплофизических свойств в широком спектре характеристик состояния. Наличие данных по теплопроводности водных растворов способствует увеличению производительности, уменьшению материальных затрат на проектирование и эксплуатацию, а также гарантирует безаварийную работу судовых энергетических установок. Экспериментальные данные по теплопроводности бинарных смесей и смешанных растворов электролитов кроме практической значимости, представляют и значительный научный интерес, поскольку позволяет выявить температурные, барические и концентрационные зависимости теплопроводности, развить положения теории переноса тепла в жидкостях. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов в зависимости от их концентрации и температуры и оценке погрешностей ее измерения.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, водный раствор, бинарный раствор, электролит, смешанный раствор, теплопроводность, раствор солей, погрешность, достоверная вероятность.

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF BINARY AND MIXED ELECTROLYTE SOLUTIONS

©2021

Zelenkov Gennady Anatolyevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor,
head of the department "System analysis and process control in water transport"

Dantsevich Igor Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the department "operation of ship electrical equipment and automation equipment"

Myshkina Alena Nikolaevna, postgraduate student

State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov

(353924, Russia, Novorossiysk, Lenin Ave., 93,

e-mails: mathshell@mail.ru, dantsevich65@mail.ru, alena--n@mail.ru)

Abstract. The increase in the heat intensity of the components of the ship's power plant is based on the use of the widest range of working fluids and coolants, among which the main place is occupied by aqueous solutions of electrolytes. The highly efficient introduction of aqueous solutions of electrolytes requires the study of their thermophysical properties in a wide range of state characteristics. The availability of data on the thermal conductivity of aqueous solutions contributes to an increase in productivity, a decrease in material costs for design and operation, and also guarantees the trouble-free operation of ship power plants. Experimental data on the thermal conductivity of binary mixtures and mixed solutions of electrolytes, in addition to practical significance, are also of considerable scientific interest, since they allow one to reveal the temperature, baric and concentration dependences of thermal conductivity, and to develop the provisions of the theory of heat transfer in liquids. This work is devoted to the experimental study of the thermal conductivity of binary and mixed solutions of electrolytes, depending on their concentration and temperature and estimation of errors of its measurement.

Keywords: marine power plant, aqueous solution, binary solution, electrolyte, mixed solution, thermal conductivity, salt solution, error, confidence level.

Введение. Водные растворы электролитов широко используются в судовых энергетических установках [1]. Одной из основных задач исследования бинарных и смешанных растворов электролитов является изучение их теплофизических свойств, в особенности теплопроводности [2]. Практически все технологиче-

ские процессы в промышленности сопряжены с подводом и отводом теплоты. Знание теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов необходимо для надежного проектирования и правильной эксплуатации, для увеличения экономичности и снижения аварийности энергетических установок. Хотя

исследованию теплопроводности бинарных растворов и уделяется внимание в научной литературе [6], для практического их применения необходимы дополнительные усилия.

Целью статьи является оценка погрешностей измерения коэффициента теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов – водных растворов солей KF , KCl , KBr , KI в зависимости от изменения их концентрации и температуры.

Материалы и результаты исследования. В таблицах 1, 2 перечислены виды исследованных растворов электролитов разной концентрации и приведены сведения об условиях проведения измерений – диапазонах изменения температуры и давления среды.

Таблица 1 – Условия исследования теплопроводности бинарных растворов электролитов [7]

Второй компонент раствора	Содержание электролита		Параметры состояния	
	Массовые доли	Мольные доли	Температура Т °К	Давление Р Мпа
KI	0,0689	0,0080	293-473	0,1-100
	0,1119	0,0135		
	0,1752	0,0225		
KBr	0,0439	0,0069	293-473	0,1-100
	0,0698	0,0112		
	0,1139	0,0191		
	0,1747	0,0310		
KCl	0,0506	0,0127	293-473	0,1-100
	0,1001	0,0262		
KF	0,0477	0,0150	293-473	0,1-100
	0,1313	0,0441		
	0,1992	0,0705		
KBr	0,1162	0,0195	293=503	0,1-100
	0,2225	0,0415	293-503	0,1-100
	0,3062	0,0626		
KI	0,1150	0,0139	263-503	0,1-100

Метод исследований: изучение теплопроводности водных растворов теплоносителей и рабочих тел в широкой области характеристик состояния реализован на закономерностях стационарного термического режима [8]. Из стационарных способов использован метод коаксиальных цилиндров. Измерительная ячейка состоит из 2-ух коаксиально расположенных

цилиндров, образующих конденсатор, измерение емкости которого позволяет вычислить коэффициент теплопроводности (рис.1).

Ввиду неизотермичности по длине цилиндра измерительной ячейки, измеренное значение разности температур в измерительном зазоре подвергалась корректировке в соответствии с расчетным изменением температур по длине цилиндра – вводилась поправка на неизотермичность. Необходимость такой корректировки обоснована, в частности, в работе [15], где подобная поправка применялась в отношении измерительной ячейки, сделанной из нержавеющей стали.

При обработке результатов экспериментального исследования теплопроводности учитывалось также рассредотачивание температуры в поперечном сечении измерительной ячейки, и рассчитывалась поправка на установку термопар.

Способом электротепловых аналогий изучено температурное поле нагревателя измерительной ячейки. Установлено, что на расстоянии, равном трем диаметрам провода нагревателя, изотермы вырождаются в прямые линии, параллельные оси нагревателя. Это обстоятельство позволяет сделать равномерным тепловой поток нагревателя во внутреннем цилиндре [15].

Значение коэффициента теплопроводности для всех исследованных жидкостей не зависит от толщины слоя исследованного вещества, поэтому, воздействие радиационной составляющей теплового потока незначительно и лежит в границах погрешности измерений, поправки на излучение к измеренному значению коэффициента теплопроводности не требуется [16].

Коэффициент теплопроводности определяется косвенно по результатам измерений физических величин, вследствие чего погрешность полученного численного значения коэффициента зависит от точности методов измерений величин [18]. Общая погрешность определяется композицией случайной составляющих погрешности [19].

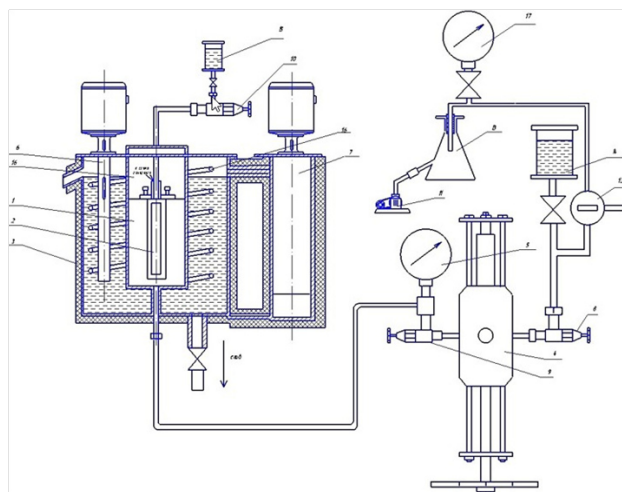


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности

- 1 – автоклав; 2 – измерительная ячейка; 3 – жидкостный термостат; 4 – гидравлический пресс;
5, 17 – манометры; 6 – насос; 7 – камера тангенциального ввода; 8, 10 – вентили; 9 – вентиль системы заполнения;
11 – вакуумный насос; 12 – отсекающий кран; 13 – вакуумная колба; 14, 15 – стеклянные сосуды (контроля заполнения);
16 – медный холодильник

Расчет систематических случайных погрешностей определения коэффициента теплопроводности осуществлен для двух экспериментальных установок [19].

Результаты расчета погрешностей и доверитель-

ной вероятности представлены в таблицах 3 и 4 соответственно (I – смешанного раствора $H_2O-KBr-KI$ и воды, II – бинарного раствора H_2O-KBr и воды) Те же данные для наглядности представлены в виде графиков на рисунках 2, 3.

Таблица 2 – Условия исследования теплопроводности смешанных растворов электролитов [17]

Наименование раствора	Количество электролита в растворе, г		Общая концентрация солей М, %	Область изменения параметров состояния	
				Температура Т° К	Давление Р Мпа
$H_2O-KI-KF$	KI	KF		300,7-471,5	0,1-100
	28,600	61,431	19,36		
	83,460	20,02	20,73		
	51,120	61,152	21,77		
	84,460	60,446	26,59		
$H_2O-KBr-KI$	KBr	KI		299,5-471,5	0,1-100
	17,876	30,870	11,66		
	30,860	51,150	17,51		
	17,270	85,430	21,43		
	83,110	28,750	22,16		
$H_2O-KCl-KI$	KCl	KI		300,7-471,5	0,1-100
	45,170	51,240	19,25		
	45,680	85,630	25,19		
	KCl	KBr			
	44,480	51,700	19,38		
$H_2O-KCl-KBr$	KCl	KBr		299,5-471,5	0,1-100
	44,480	84,500	24,38		
	KF-	NaF			
	20,010	4,720	4,86		
	20,015	9,800	5,80		

Таблица 3 – Результаты расчетов погрешностей измерения коэффициента теплопроводности

Наименование погрешности	Систематическая погрешность, Р		Оценка среднего квадратического отклонения S	
	I	II	I	II
Количество тепла, выделяемого нагревателем измерительной ячейки, Вт	0,024	0,022	0,0024	0,0022
Перепад температур в слое исследуемого вещества, К	0,0028	0,0024	0,1511	0,1495
Постоянная измерительной ячейки, м	0,0560	0,0611	0,2560	0,2579
Температура опыта, К	0,0127	0,0200	0,1801	0,4321
Теплопроводность исследуемого вещества, %	0,722	0,458	0,134	0,114
Концентрация раствора, %	0,232	-	0,232	-
Поправка на установку термопары, К	4,748	4,763	0,7941	0,7632
Поправка на падение напряжения в токоподводящих проводах нагревателя, Вт	0,2465	0,2379	0,062	0,059
Поправка на «неизотермичность» поверхностей коаксиальных цилиндров, %	0,0061	0,0093	0,193	0,229

Таблица 4 – Результаты расчетов доверительной вероятности общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности и его составляющих

Наименование погрешности	Значение	
	I	II
Проверка выполнения неравенств $P_1: S_1 \geq 8$ и $P_2: S_2 \leq 0,8$	8,96 > 8	9,26 > 8
Коэффициент функции распределения композиции случайной и неисключенной систематической составляющих соответствующий доверительной вероятности	1,83	1,99
Оценка среднего квадратического отклонения	0,67	0,65
Доверительные границы погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности, %	1,23	1,3

Результаты расчетов систематической и случайной погрешности измерения коэффициента теплопроводности на экспериментальной установке



Рисунок 2 – Результаты расчетов систематической и случайной погрешности измерения коэффициента теплопроводности

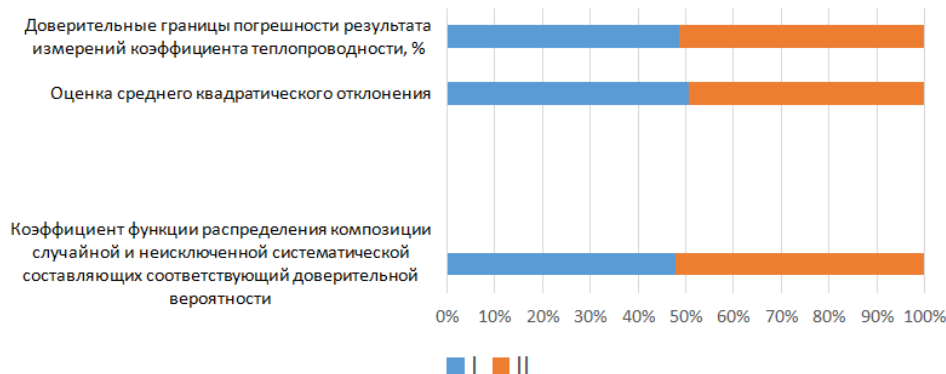


Рисунок 3 – Результаты расчетов доверительных границ общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности и его составляющих

Закключение. В результате анализа результатов экспериментального исследования получено, что доверительная вероятность общей погрешности результата измерений коэффициента теплопроводности смешанного раствора $H_2O-KBr-KI$ и воды в интервале температур 283–463°K составляет $\pm(1,23 - 1,3)\%$ при коэффициенте доверительной вероятности 0,95.

В результате измерений коэффициента теплопроводности бинарного раствора H_2O-KBr и воды в интервале температур 293–523°K граница общей погрешности составляет: $\pm(1,6 - 1,9)\%$ при коэффициенте доверительной вероятности 0,95.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Косолап, Ю.Г. Теплопроводность смешанных растворов электролитов. Дис...канд. техн. наук. – Баку, 1990. – 194 с.
2. Сафронов, Г.А. Теплопроводность водных растворов электролитов. Дис...канд. техн. наук. – Баку, 1985. – 220 с.
3. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с.
4. Рабинович, С.Г. Погрешность измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 261 с. В кн.: Исследование в области тепловых измерений. – Л.: Энергия, 1976. – С. 32-40.
5. Кудрявцева, Ж.Ф. Рабинович, С.Г. Методы обработки результатов наблюдений при косвенных измерениях. В кн. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. – Л.: ВНИИМ, 1975. – С. 3-35.
6. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, – 1967. – 599 с.
7. Григорьев, Е.Б., Сафронов, Г.А., Косолап, Ю.Г. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Теплопроводность бинарных водных растворов солей галлоидов щелочных металлов в диапазонах температур 290...470 K и давлениях 0,1...100 МПа. РСД ГСССД Р № 465, Деп. во ВНИЦСМВ 21.10.2002г. № 801-ООКК Госстандарта РФ, 2002. – 20 с.
8. Цедерберг, И.В. Теплопроводность газов и жидкостей. – М.: Наука, – 1963. – 409 с.
9. Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 239 с.
10. Ишханов, А.М. Экспериментальное исследование теплопроводности воды и шестифтористой серы при высоких давлениях. Дис...канд. техн. наук. – Грозный, 1978. – 288 с.
11. Васильев, В.П. Термодинамические свойства раствора электролита. – М.: Высшая школа, 1982. – 320 с.
12. Капустинский, А.Ф., Рузавин, И.И. Тепло – и электропроводность ионных растворов // Химия и хим. технология. – 1958. – №7. – С.11-16.
13. Литвиненко, И.В. Теплопроводность водных растворов электролитов и ее связь со структурой воды. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1968. – 20 с.
14. Сулейманов, Л.Л., Гуренкова, Т.В., Усманов, А.Г. Зависимость радиационной составляющей коэффициента теплопроводности жидкостей от температуры // Химия и хим. технология. – 1958. – №7. – С.6-11.
15. Бубеева, И.А., Танганов, Б.Б. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности растворов электролитов // Тр. 5-й междунар. конф. молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки». Естественные науки. Химия. Физическая химия, – Ч. 8.

– Самара, 2004. – С. 13-15.

16. Танганов, Б.Б., Бубеева, И.А. Теплопроводность водных растворов индивидуальных электролитов и их смесей // Актуальные проблемы современной науки: Тр. 3-й междунар. конф. молодых ученых. Естественные науки. 4.4-6. Секции: Физика. Химия. Науки о Земле, – С. 39-40. – Электронное издание. – Самара, 2002. – Web-сайт, – Системные требования: IBM PC, Internet Explorer (<http://povnian.sstu.edu.ru>). Гос. Пер. 0320201180.

17. Григорьев Е.Б., Григорьев Б.А. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Теплопроводность смешанных водных растворов солей лантаноидов в диапазонах температур 290...470 K и давлениях 0,1...100 МПа. РСД ГСССД Р № 464, Деп. во ВНИЦСМВ 21.10.2002 г. № 800-ООКК Госстандарта РФ, 2002. – 20 с.

18. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 438 с.

19. Григорьев, Е.Б. Относительная теплопроводность воды и водных растворов в зависимости от давления. Тезисы докладов шестой научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса». РГУ нефти и газа. – Москва, 26-27 января, 2005. – С.46.

20. Григорьев Е.Б. Кинематическая вязкость бинарных водных растворов солей лантаноидов. Известия вузов, Нефть и газ, №3, 1993. – С.44.

Статья поступила в редакцию 15.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021