

3. Voznesensky V.A. Statistical methods of designing an experiment in technical and economic research - M.: Finance and Statistics, 1981 - 263 p.
4. Ivobotenko B. L., Ilyinsky N. F., Kopylov N. P. Planning an experiment in electromechanics -M.: Energy, 1975 – 184 p.
5. Asaturian V.N. Theory of experimental design-M.: Radio and communications, 1983 – 248 p.
6. Adler Yu.P. and others. Planning an experiment in the search for optimal conditions - M.: Nauka, 1976 – 285 p.
7. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. Development and application of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. Collection of abstracts of the national scientific and technical conference of teaching staff Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping. SPb.: Publishing house Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping, 2018. P. 91–92
8. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Development of methodology, methods and analysis model the influence of various options for building the structure and maintenance and recovery modes operability of ship electric power systems (part 1). Operation of maritime transport. 2016. No 3 (80). p. 54-60.
9. Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. Mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. Bulletin Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping 11.4 (2019)
10. Karakaev A.B., Kostenko A.V., Epikhin A.I. Electromagnetic moment and mechanical characteristic of a special single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems - Operation of maritime transport. - 2019.- No. 3 (92).- p.120-126.
11. Karakaev A.B., Kagan A.V. Polynomial model of a single-phase asynchronous motor. - Leningrad, 1984 -7s. - The manuscript is presented by the North-West Journal. Dep. at Informelectro in 1985, No. 408 et. - 84 Dep.
12. Markitantov B.S., Karakaev A.B. Study of the starting properties of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices by experimental design methods. V.Sb.: - Abstracts of the start-up technical conference of the teaching staff of the school - L.: VVMU im.V.I. Lenin, 1983, p. 82-86

УДК 536.2

DOI: 10.34046/aumsuomt94/25

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И РАБОЧИХ СРЕД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Ю.Г. Косолап, кандидат технических наук, доцент

В работе проведен анализ существующих методов определения теплопроводности водных растворов KF. Приводятся результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности воды и водного раствора соли KF в интервале температур 293–473K и давлений до 100 МПа. Исследования теплопроводности воды λ_w проводились методом коаксиальных цилиндров в абсолютном варианте. Основное внимание уделено растворам с повышенным содержанием соли. Установлены закономерности в поведении температурных и барических коэффициентов теплопроводности исследованных бинарных растворов. Получены регрессионные зависимости, описывающие связи теплопроводности воды и раствора KF-вода, на основании которых могут быть определены оптимальные технические параметры энергетических установок. По сравнению с существующими методиками расчета теплопроводности расширен диапазон параметров. Результаты экспериментальных данных внесены в рекомендуемые справочные данные в Всероссийском научно-исследовательском центре стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ.

Ключевые слова: теплопроводность, бинарный раствор, температура, давление

The paper analyzes existing methods for determining the thermal conductivity of aqueous solutions of KF. The article presents the results of an experimental study of the thermal conductivity of water and an aqueous solution of KF salt in the temperature range of 293–473K and pressures up to 100 MPa. Studies of the thermal conductivity of water were carried out by the method of coaxial cylinders in the absolute version. The main attention is paid to solutions with a high salt content. The regularities in the behavior of temperature and pressure coefficients of thermal conductivity of the studied binary solutions are established. Regression dependences are obtained that describe the connections between the thermal conductivity of water and the KF-water solution. With their help, the optimal technical parameters of power plants can be determined. Compared with existing methods for calculating thermal conductivity, the range of parameters has been expanded. The results of the experimental data are included in the recommended reference data at the All-Russian Research Center for Standardization, Information and Certification of Raw Materials, Materials and Substances.

Key words: thermal conductivity, binary solution, temperature, pressure

Водные растворы электролитов широко применяются в энергетических установках на тепловых и атомных электростанциях, установках с использованием солнечной и геотермальной энергии, нефтяной и газовой промышленности. А также, в таких производствах, как производство минеральных удобрений, электрохимические способы получения неорганических соединений металлов электролизом водных растворов. При этом эффективное использование водных растворов электролитов во многом определяется точностью сведений по их теплофизическим свойствам, и, в частности, по теплопроводности в широком диапазоне параметров состояния.

Основная часть

Обзор существующих методик расчета теплопроводности. Как показывает анализ результатов обработки экспериментальных данных и соответствующих теоретических исследований, определение теплопроводности растворов носит эмпирический и полуэмпирический характер. Причем намечены две тенденции в обработке экспериментальных данных. Одна основывается на понятии 100% гипотетического раствора. Вторая - на основных положениях теории электролитической диссоциации.

Для смешанных растворов электролитов коэффициент теплопроводности можно определить по способу Риделя [1]. Этот способ предполагает, что в водном растворе анион и катион влияют аддитивно на теплопроводность воды. Коэффициент теплопроводности раствора определяют по формуле:

$$\lambda_p = \lambda_{H_2O} + \sum_i \lambda_i \alpha_i C_i \quad (1)$$

где λ_p – коэффициент характеризующий изменение теплопроводности раствора при увеличении концентрации иона на 1г-ион/л; C_i – мольная концентрация раствора; λ_{H_2O} – теплопроводность воды при 293К.

В работе [1] приводятся данные по α_i для 20 анионов и 16 катионов в предположении $\alpha_{N_{\alpha^+}} = 0$.

Соотношение (1), как утверждается в [6], позволяет рассчитать с погрешностью, не превышающую погрешность эксперимента, теплопроводность водных растворов электролитов в координатах λ_p при T=293К. Способ, предложенный Риделем, не приемлем для расчета температурной зависимости λ_p растворов. Кроме того, он не обладает достаточной полнотой, и вычисления λ_p для некоторых растворов этим способом приводят к существенным расхождениям с экспериментальными данными.

В работе [6] приводится несколько видоизменённое уравнение Риделя:

$$\lambda_p = \lambda_0 (1 - \sum_{i=1}^n \beta_i C_i)$$

где λ_p – теплопроводность раствора; Вт/м · К; λ_0 – теплопроводность воды, Вт/м · К; β_i – коэффициенты; C_i – концентрация вещества, 1 кг вещества на 1 кг раствора. Коэффициенты β_i получают путем математической обработки экспериментальных данных.

Например, в работе [7] теплопроводность воды в интервале температур 273-373К со среднеквадратичным отклонением 0,01 аппроксимирована полиномом:

$$\lambda_p(T) = 0,5545 + 0,00246 \cdot T - 0,00001184 \cdot T^2 \quad (2)$$

Н.Б. Варграфтик и Ю.П. Осьминин предложили выражение для расчета $\lambda_{эл}$ водных растворов солей, кислот и щелочей:

$$\lambda_{эл} = \lambda_{H_2O} \left(\frac{C_{p,эл}}{C_{p,H_2O}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{эл}}{\rho_{H_2O}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{эл}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

где λ_{H_2O} – теплопроводность воды; $C_{p,эл}$, C_{p,H_2O} – удельная теплоемкость раствора электролита и воды при постоянном давлении; $\rho_{эл}$, ρ_{H_2O} – плотность электролита и воды; $M_{эл}$ – мольные массы воды и раствора электролита.

Мольная масса раствора электролита определяется по формуле:

$$M_{эл} = M_{H_2O} \cdot N_{H_2O} + M_c \cdot N_c,$$

где N_{H_2O} , N_c – мольная концентрация воды и электролита, M_c – мольная масса электролита

Расчет теплопроводности раствора электролита по формуле (3) требует либо знания данных по теплоемкости $C_{p,эл}$ и плотности раствора данной концентрации, либо самостоятельного проведения измерений теплоемкости и плотности.

В работе [4] предлагается следующая формула для расчета теплопроводности водных растворов солей:

$$\lambda = \lambda_B [C^2 + \gamma'(1 - C)^2 + 2\gamma' \frac{C - (1 - C)}{(\gamma' C + 1 - C)}] \quad (4)$$

где $\gamma' = \frac{\alpha'_э}{\alpha_B}$,

$\lambda'_э$ – теплопроводность соли в растворе, определяется по формуле:

$$\lambda'_э = 9,3 \cdot 10^{-2} P \sqrt{\rho T_{пл}} (M)^{-\frac{5}{6}}, \quad (5)$$

где M – мольная масса;

P – число атомов в молекуле;

ρ – плотность электролита;

λ_B – теплопроводность воды;

$T_{пл}$ – температура плавления; C – параметр решетки, связанный с объемной концентрацией

P_2 второго компонента раствора выражением:

$$P_2 = 2C^3 - 3C^2 + 1$$

Сопоставление расчетных значений λ_p по (4) с экспериментальными данными [1] с теплопроводностью растворов щелочных металлов

показало, что при $T=293\text{K}$ среднеквадратическое расхождение в широкой области концентрации составляет 2%. Формула (4) позволяет описать только концентрационную зависимость λ_p в узком температурном интервале из-за отсутствия рекомендаций по расчету $\lambda_{эл}$ в функции от температуры.

В работе [5] установлена корреляционная связь между коэффициентом теплопроводности двухкомпонентных водных растворов солей и скоростью распространения звука в растворе. Авторами предполагается следующее полуэмпирическое соотношение для теплопроводности водных растворов электролитов.

$$\lambda'_{э} = \lambda_B \left(\frac{\delta_B}{\delta_э} \right)^2 (1 - 2\Delta) \frac{U_э}{U_B}, \quad (6)$$

где $\Delta = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\beta_э}{\beta_B} \right)$; λ_B – коэффициент теплопроводности; $U_B, U_э$ – скорости звука в воде и в растворе; $\beta_э, \beta_B$ – ожимаемость раствора и воды; δ_B – межмолекулярное расстояние в чистой воде; $\delta_э$ – среднее расстояние между молекулами воды и ионов в растворе электролита, вычисляется по формуле:

$$\delta_э = \sqrt{M_э / \rho_э N},$$

где $M_э$ – мольная масса раствора; $\rho_э$ – плотность раствора электролита; N – число Авогадро.

Необходимые для расчета данные по формуле (6) авторы [5] заимствовали в справочной литературе. Максимальное отклонение солей, рассчитанных по формуле 6 и экспериментальных значений составляет 2.5%. Сравнение проводилось в интервале температур 283-313K при массовой концентрации солей 5-45% и атмосферном давлении.

Для большинства водных растворов солей в первом приближении можно подсчитать коэффициент теплопроводности при $T=293\text{ K}$ по формуле:

$$\lambda = 0,515(1 - 0,8\sum \vartheta\alpha), \quad (7)$$

где $\sum \vartheta\alpha$ – суммарная объемная концентрация растворенных солей.

По формуле (7) можно определить коэффициент теплопроводности раствора с точностью не менее 3%, если $\sum \vartheta\alpha \leq 20\%$, что соответствует весовым концентрациям 30-40% [2].

Если значения объемов или плотностей рассматриваемых растворов отсутствуют, то следует определить коэффициент теплопроводности 100%-ного гипотетического раствора по формуле [2]:

$$\lambda = 0,08N \frac{(F\rho)^{1/2}}{M^{5/6}}, \quad (8)$$

где N – число атомов в молекуле соли; F – температура плавления соли; ρ – плотность соли; M – мольная масса соли.

В работе [2] имеются графики, по которым, зная коэффициент теплопроводности 100%-ного гипотетического раствора, можно найти значение теплопроводности раствора. Расчет λ_p с помощью (7) и (8) приводит к значительным погрешностям (до 20%), и эти расчеты следует рассматривать как ориентировочные.

Для растворов, которые в координатах – состав имеют положительные отклонения от аддитивности, расчет теплопроводности можно вести по формуле [8]:

$$\lambda = \frac{\alpha_B \cdot \alpha_B}{N_B + (2\frac{V_э}{V_B} - 1)N_э} + \frac{\alpha_э(2\frac{V_э}{V_B} - 1)N_э}{N_B - (2\frac{V_э}{V_B} - 1)N_э}, \quad (9)$$

где $\alpha_э$ – теплопроводность 100%-ного гипотетического раствора соли, рассчитанная по [8],

$$V_э = V_a N_a + V_k N_k - \text{мольный объем соли.}$$

Сопоставление экспериментальных данных [1] со значениями теплопроводности растворов, вычисленным по формуле (9), показало, что средняя погрешность расчета составляет 1.6%, максимальная – 4% при температуре 298K. Погрешность расчета находится в прямой зависимости от концентрации соли и определяется достоверностью значения $\alpha_э$ [1].

Из анализа, проведенного выше, следуют расчетные возможности уравнений (1) – (9), которые заключаются в том, что они позволяют описать концентрационную зависимость теплопроводности растворов в узком температурном интервале и в основном при атмосферном давлении. Это свидетельствует о недостаточном объеме существующего экспериментального материала по λ_p бинарных и смешанных водных растворов электролитов. Ограничены сведения по влиянию температуры и давления на теплопроводность растворов электролитов.

Исследование теплопроводности воды. Исследования теплопроводности воды λ_B проводились методом коаксиальных цилиндров в абсолютном варианте. Цилиндры изготавливались из нержавеющей стали и меди с последующим нанесением на медный цилиндр слоя никеля. Корректность введения поправок на изотермичность внутреннего цилиндра, распределение температур в поперечном сечении измерительной ячейки, расчет поправки на установку температурного поля нагревателя измерительной ячейки, поправка на радиационную составляющую жидкости позволили оценить погрешность измерения

λ_B на нержавеющей цилиндрах в размере $\pm(1,6 - 1,9)\%$ при уровне доверия 0,95, и на медных цилиндрах $-\pm(1,23 - 1,3)\%$.

Исследование коэффициента теплопроводности воды посвящено достаточное количество работ. Измерения λ_v выполнены различными методами и охватывают широкую область параметров состояния. При анализе температурных и барических коэффициентов теплопроводности растворов важно сохранить источники систематических погрешностей, а это возможно при

следовании теплопроводности воды как одного из компонентов раствора (бинарного и смешанного) на одной установке.

В таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования теплопроводности воды в указанных диапазонах варьируемых параметров.

Таблица 1 – Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности воды λ_v

T, К	Давление, МПа					
	0,1	20	40	60	80	100
301,3	0,6110	0,6215	0,6316	0,6404	0,6492	0,6576
327,3	0,6431	0,6505	0,6591	0,6681	0,6750	0,6845
345,7	0,6600	0,6662	0,6753	0,6838	0,6914	0,7000
374,0	0,6751	0,6824	0,6925	0,7007	0,7100	0,7185
397,9	0,6805	0,6901	0,7010	0,7099	0,7193	0,7263
420,6	0,6791	0,6910	0,7020	0,7118	0,7217	0,7313
446,6	0,6701	0,6846	0,6955	0,7067	0,7170	0,7288
471,4	0,6523	0,6706	0,6804	0,6940	0,7050	0,7210

По результатам эксперимента с помощью регрессионного анализа получено семейство функций, описывающее связь теплопроводности воды λ_v с температурой T, Кв диапазоне давления 0,1-100 МПа. Например, для давления 0,1 МПа такое выражение имеет вид:

$$\lambda_v(T) = -7 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0053T - 0,3886. \quad (10)$$

На рисунке 1 представлена зависимость теплопроводности от температуры в диапазоне 293-471К при давлении 0,1 МПа.

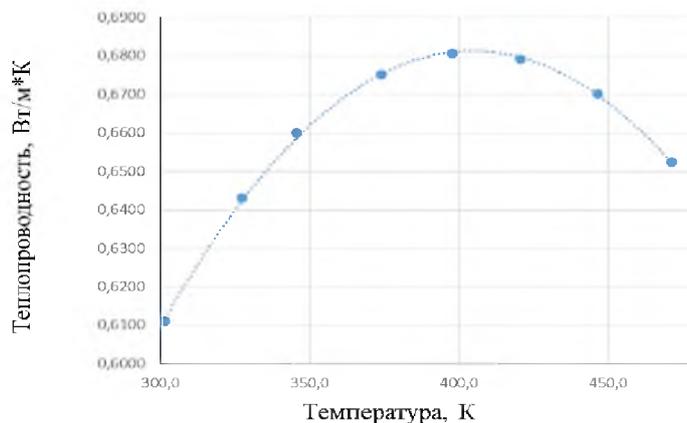


Рисунок 1 – Зависимость теплопроводности воды от температуры при P=1 МПа

Из рисунка 1 видно, зависимость имеет оптимальное значение давления, дающее максимальную теплопроводность.

В таблице 2 приведены зависимости, описывающие связь теплопроводности с температурой в диапазоне давления 0,1-100 МПа.

На рисунке 2 приведено семейство кривых, описывающих зависимость теплопроводности воды от температуры для диапазона давлений

0,1-100 МПа.

Аналогично, зависимость теплопроводности от давления может быть аппроксимирована линейной функцией. Например, для фиксированной температуры T=301,3К зависимость имеет вид:

$$\lambda_v(P) = 0,0093P + 0,6027 \quad (11)$$

Таблица 2 – Зависимость теплопроводности от температуры в диапазоне давлений 0,1-100 МПа

Давление, МПа	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
P=0,1	$\lambda_v(T) = -7 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0053T - 0,3886$	R ² = 0,9991
P=20	$\lambda_v(T) = -6 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0047T - 0,2761$	R ² = 0,9998
P=40	$\lambda_v(T) = -6 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0048T - 0,2793$	R ² = 0,9987
P=60	$\lambda_v(T) = -5 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0045T - 0,2255$	R ² = 0,9993
P=80	$\lambda_v(T) = -5 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0044T - 0,21$	R ² = 0,9981

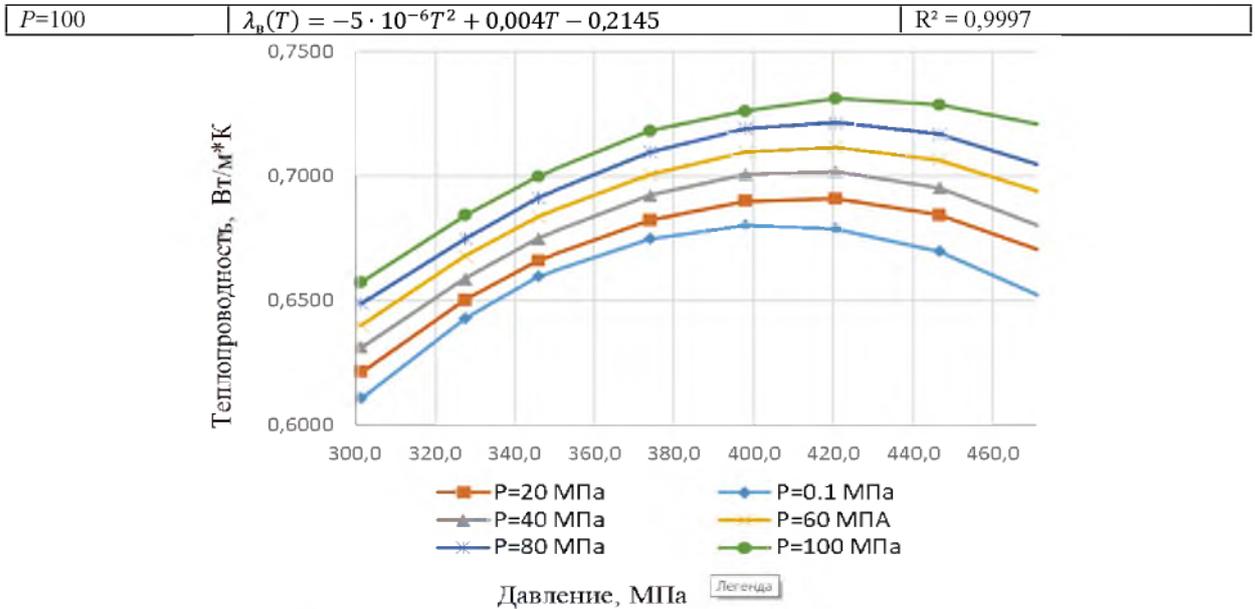


Рисунок2– Зависимость теплопроводности воды от температуры для диапазона давления 0,1-100 МПа

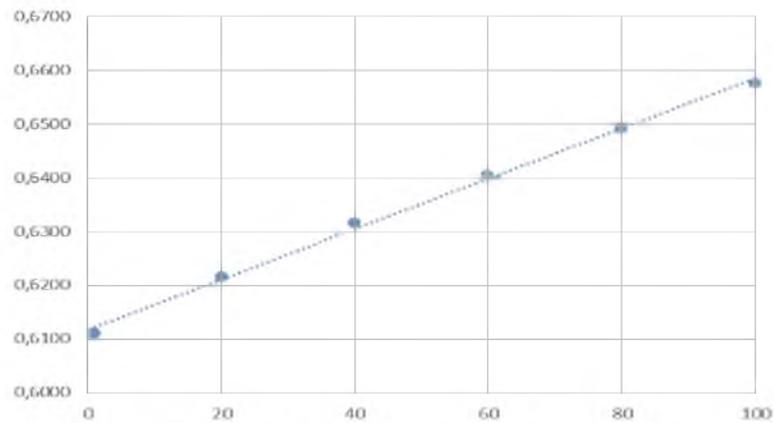


Рисунок 3 – Зависимость теплопроводности от давления при $T=301,3\text{ К}$

В таблице 3 приведены функции, связывающие теплопроводность с давлением для диапазона температур 301-471 К для семейства кривых, представленных на рисунке 4.

Из графика на рисунке 4 видно, что значение теплопроводности неоднозначно зависит от температуры и давления. Определенная теплопроводность может быть достигнута при сочетаниях давления и температуры.

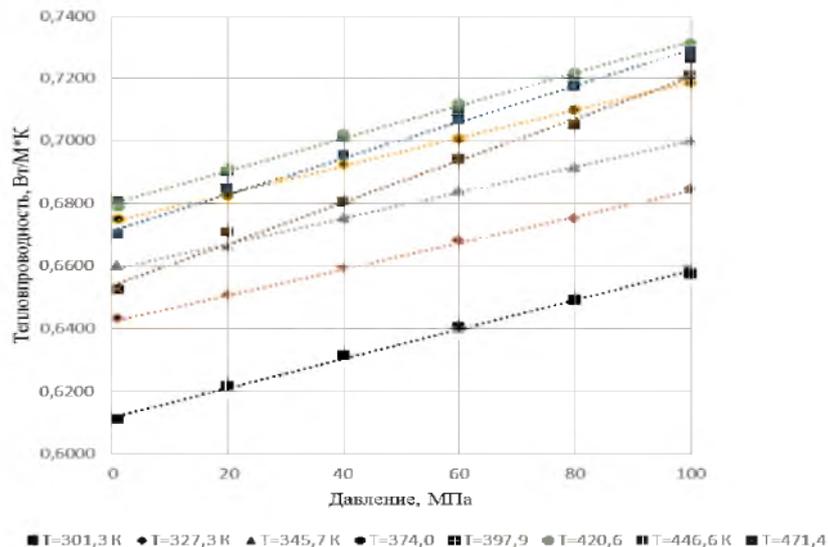


Рисунок 4 – Зависимость теплопроводности воды от давления в диапазоне температур 301,3-471,4К
 Таблица 3 – Зависимость теплопроводности воды от давления в диапазоне температур 301,3-471,4К

Температура, К	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
T=301,3	$\lambda_w(P) = 0,0005 \cdot P + 0,6118$	R ² = 0,9973
T=327,3	$\lambda_w(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6425$	R ² = 0,9989
T=345,7	$\lambda_w(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6589$	R ² = 0,9987
T=374,0	$\lambda_w(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6743$	R ² = 0,9992
T=397,9	$\lambda_w(P) = 0,0005 \cdot P + 0,68$	R ² = 0,9975
T=420,6	$\lambda_w(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6743$	R ² = 0,9992
T=446,6	$\lambda_w(P) = 0,0006 \cdot P + 0,6715$	R ² = 0,9965
T=471,4	$\lambda_w(P) = 0,0007 \cdot P + 0,654$	R ² = 0,9937

По результатам экспериментальных данных была определена функция, связывающая теплопроводность воды с давлением и температурой, график которой показан на рисунке 5.

Аппроксимирующий полином найден с помощью модуля **CurveFittingToolbox** пакета математического анализа MatLab (выражение (12)). Статистические параметры для экспериментальных данных и коэффициенты полинома найдены для уровня значимости 5 %.

Регрессионный полином, связывающий теплопроводность с давлением и температурой, имеет вид:

$$\lambda_w(P, T) = -0,2513 + 1,186 \cdot 10^{-5} \cdot P + 0,004 \cdot T + 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot P \cdot T - 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (12)$$

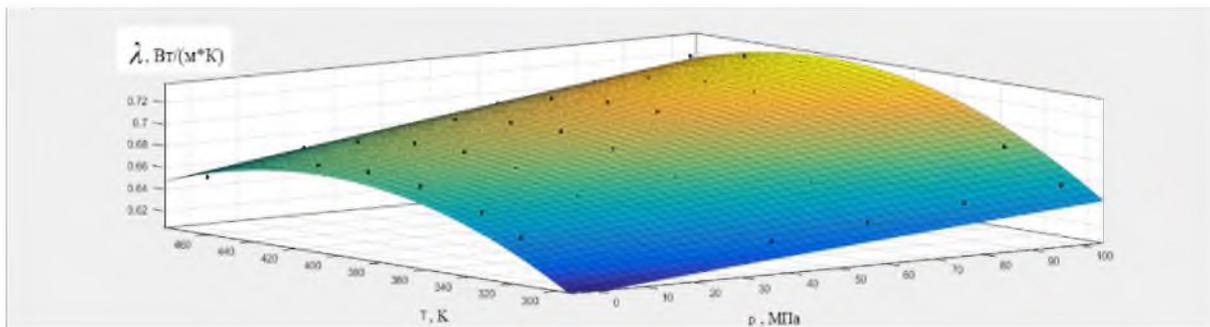
На рисунке 5а, точками показаны экспериментальные данные и аппроксимирующая поверхность.

Определение экспериментальных значений коэффициентов теплопроводности бинарных растворов электролита H₂O – KF. Характеристики бинарного раствора H₂O – KF представлены в таблице 4.

Для определения теплопроводности раствора H₂O – KF был проведен ряд экспериментов, результаты которых приведены в таблице 5.

В таблице 6 приведены функции, связывающие теплопроводность с температурой в диапазоне 301-471К для раствора H₂O – KF и концентрации N=0,0150 мол/л в интервале давлений 0,1-100 МПа.

(а)



(б)

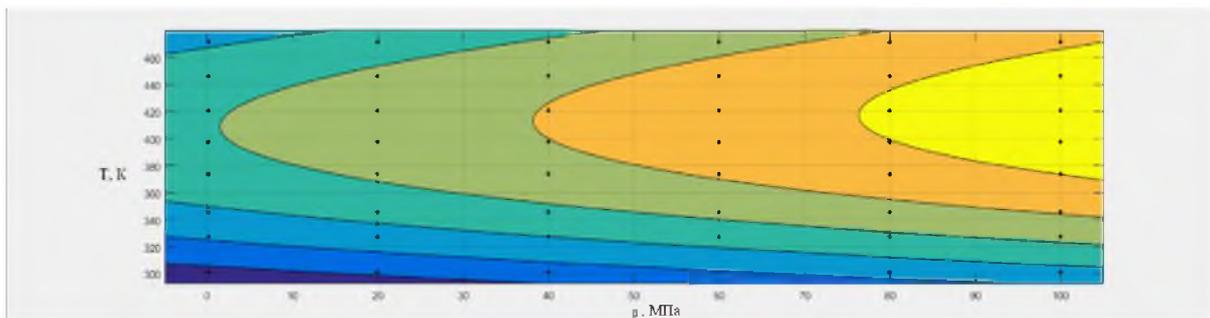


Рисунок 5 – Поверхность (а) и линии уровня (б) поверхности, описывающие зависимость теплопроводности воды от давления и температуры

Таблица 4 – Характеристики раствора H₂O – KF

Второй компонент раствора	Содержание электролита Массовая доля N ₃ мол.дол.		Диапазон изменения параметров: Температура T, К Давление P, МПа	
	KF	0,0477	0,0150	293-473
0,1313		0,0441		
0,1992		0,0705		

Таблица 5– Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности воды раствора H₂O – KF для концентрации соли N₃=0,0150 мол.дол.

T, К	P, МПа					
	1,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0
300,4	0,6003	0,6081	0,6156	0,6226	0,6286	0,6355
326,8	0,6319	0,6422	0,6505	0,6582	0,6657	0,6723
349,5	0,6530	0,6613	0,6696	0,6727	0,6857	0,6922
375,5	0,6668	0,6752	0,6839	0,6929	0,7011	0,7081
398,8	0,6739	0,6824	0,6926	0,7023	0,7102	0,7169
420,9	0,6752	0,6846	0,6959	0,7050	0,7143	0,7214
450,2	0,6696	0,6822	0,6942	0,7045	0,7142	0,7225
471,2	0,6608	0,6762	0,6881	0,7009	0,7105	0,7205

Таблица 6 –Зависимость теплопроводности раствора от температуры в диапазоне давления 0,1-100 МПа и концентрации N=0,0150 мол.дол.

Давление P, МПа	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
0,1	$\lambda(T) = -6 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0046T - 0,2857$	R ² = 0,9986
20	$\lambda(T) = -5 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0043T - 0,2201$	R ² = 0,9952
40	$\lambda(T) = -5 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0043T - 0,2172$	R ² = 0,9964
60	$\lambda(T) = -5 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0041T - 0,1848$	R ² = 0,9954
80	$\lambda(T) = -5 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0043T - 0,2105$	R ² = 0,9949
100	$\lambda(T) = -5 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,0043T - 0,2105$	R ² = 0,9943

На рисунке 6 приведено семейство кривых, построенных по данным таблицы 6, описывающих зависимость теплопроводности от температуры в диапазоне 301-471К для рас-

твора H₂O – KF и концентрации N=0,0150 мол.дол. в диапазоне давления 0,1-100 МПа с интервалом 20 МПа.

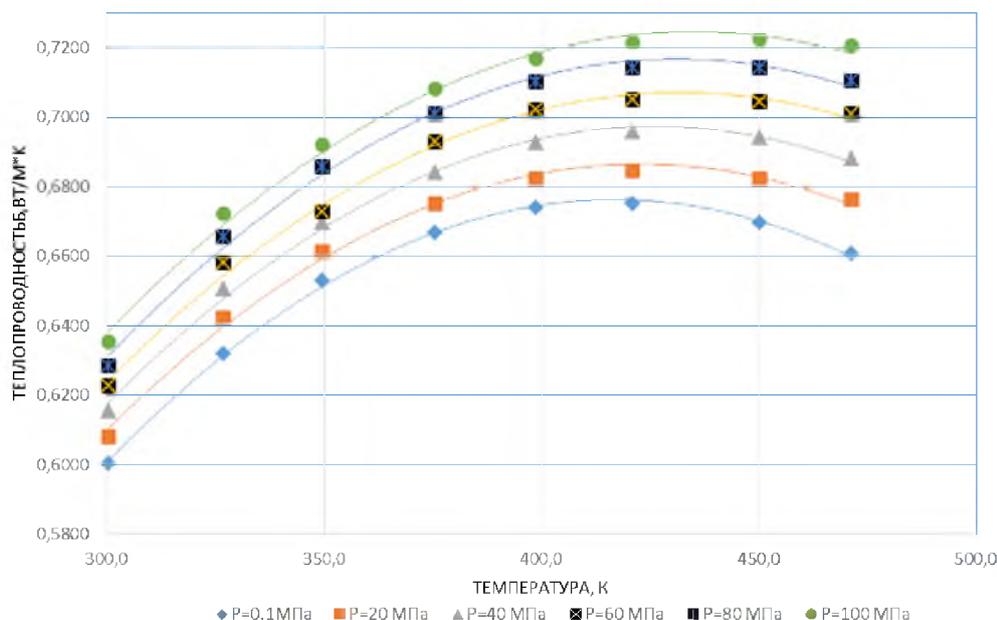


Рисунок 6 – Зависимость теплопроводности раствора H₂O – KF концентрации N=0,0150 мол.дол от температуры в диапазоне давления 0,1-100 МПа с интервалом 20 МПа

Аналогично определены зависимости для раствора $H_2O - KF$ и концентрации $N=0,0441$ мол.дол, $N=0,0705$ мол.дол [9].

В таблице 7 приведены линейные функции, связывающие теплопроводность с давлением для диапазона температур 301-471 К для раствора $H_2O - KF$ концентрации $N=0,0150$ мол.дол.

На рисунке 7 показаны кривые, показывающие зависимость теплопроводности раствора от давления при различных значениях температуры.

Таким же образом определено влияние давления и температуры на теплопроводность при концентрации раствора $N=0,0705$ мол.дол и $N=0,0705$ мол.дол.

По результатам экспериментальных данных была определена функция, связывающая теплопроводность воды с давлением и температурой при концентрации $N=0,0441$. Регрессионный полином имеет вид:

$$\lambda_{KF}(P, T) = -0,213 - 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot P + 0,004 \cdot T +$$

$$+ 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot P \cdot T - 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (13)$$

Среднеквадратическое отклонение от экспериментальных данных составило 0,0022. Статистические параметры для экспериментальных данных и коэффициенты полинома найдены для уровня значимости 5 %.

На рисунке 8 показана поверхность, описывающая зависимость теплопроводности раствора от давления и температуры.

Определены зависимости теплопроводности от концентрации при сочетаниях значений температуры и давления в начале и конце интервала варьирования. В таблице 8 приведены экспериментальные данные.

На рисунке 8 приведена зависимость коэффициента теплопроводности водного раствора соли KF от концентрации соли, мас.дол. для сочетаний максимальных и минимальных значений температуры и давления.

Таблица 7 – Зависимость теплопроводности раствора $H_2O - KF$ от давления в диапазоне температур 301,3-471,4К концентрации $N=0,0150$ мол.дол.

Температура, К	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
$T=300,4$	$\lambda_p(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6008$	$R^2 = 0,9975$
$T=326,8$	$\lambda_p(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6333$	$R^2 = 0,9935$
$T=349,5$	$\lambda_p(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6528$	$R^2 = 0,984$
$T=375,5$	$\lambda_p(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6668$	$R^2 = 0,9984$
$T=398,8$	$\lambda_p(P) = 0,0004 \cdot P + 0,6741$	$R^2 = 0,9951$
$T=420,9$	$\lambda_p(P) = 0,0005 \cdot P + 0,6756$	$R^2 = 0,9956$
$T=450,2$	$\lambda_p(P) = 0,0005 \cdot P + 0,6711$	$R^2 = 0,9933$
$T=471,4$	$\lambda_p(P) = 0,0006 \cdot P + 0,663$	$R^2 = 0,9919$

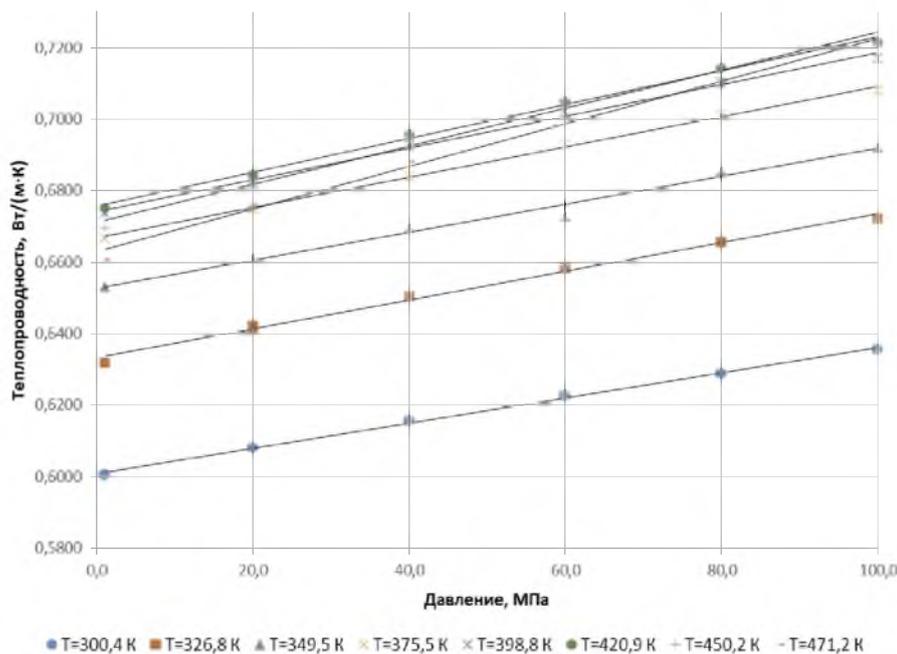


Рисунок 7 – Зависимость теплопроводности раствора $H_2O - KF$ концентрации $N=0,0441$ от давления в диапазоне температур 301,3-471,4К

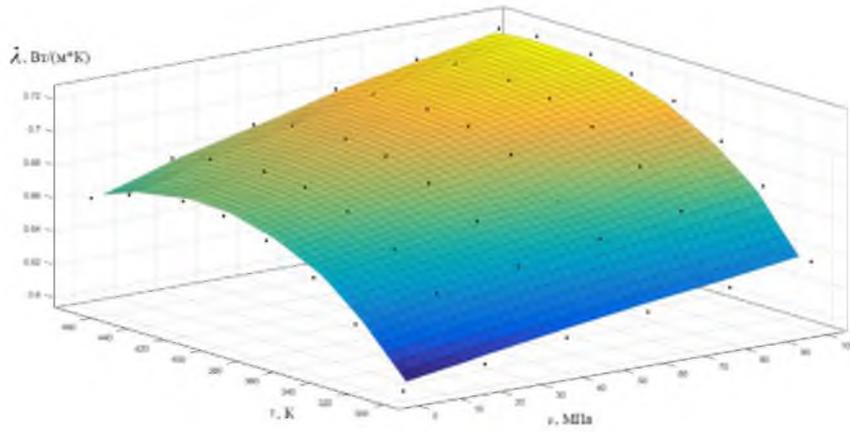


Рисунок 8 – Поверхность, описывающая зависимость теплопроводности водного раствора соли KF от давления и температуры

В таблице 8 приведены экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности водного раствора соли KF от концентрации

соли, масс.дол. при сочетаниях максимальных и минимальных значений температуры и давления.

Таблица 8 – Зависимость теплопроводности от концентрации раствора при различных сочетаниях варьируемых параметров

Температура, К Давление, МПа	Концентрация, масс.дол		
	0,015	0,0441	0,0705
$T=300,4$ и $P=1$	0,6003	0,5882	0,5776
$T=471,2$ и $P=100$	0,7205	0,7062	0,6957
$T=300,4$ и $P=100$	0,6355	0,6149	0,604
$T=471,2$ и $P=1$	0,6608	0,6549	0,6402

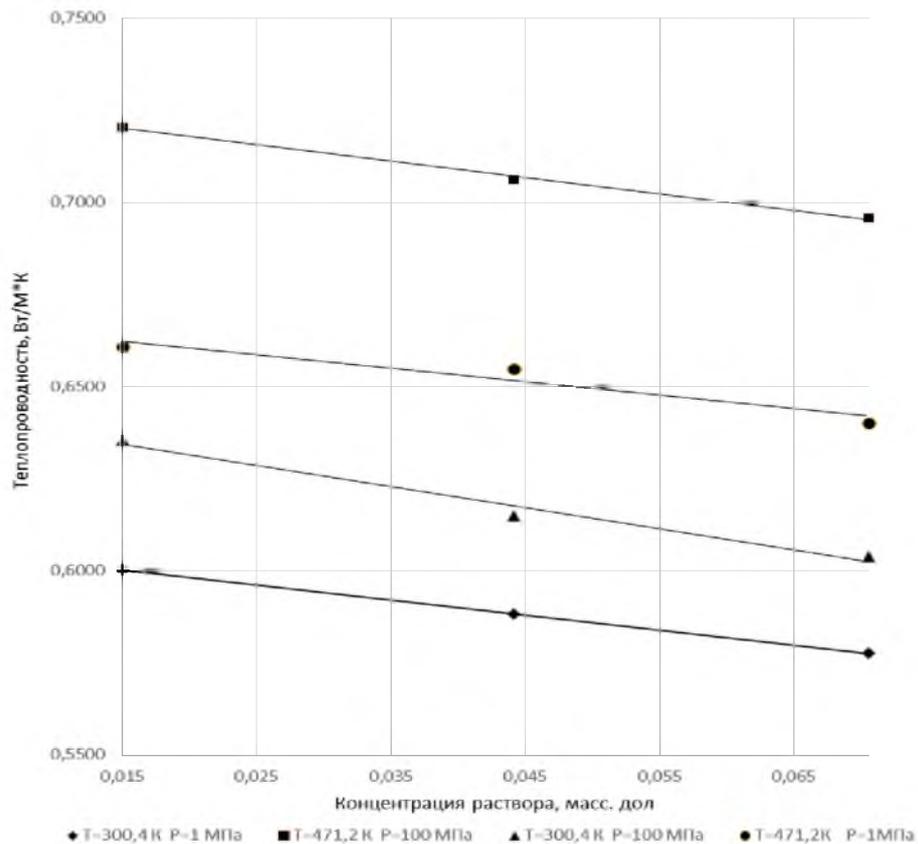


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента теплопроводности водного раствора соли KF от концентрации соли, массовой долей при давлении 0,1 МПа в интервале температур 298-471К.

Таблица 8 – Зависимость теплопроводности от концентрации для различных сочетаний температуры и давления

Значение температуры, К, давления, МПа		Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
T=300,4	P=1	$\lambda(C) = -0,4091C + 0,6064$	$R^2 = 0,9999$
T=471,2	P=100	$\lambda(C) = -0,4476C + 0,7268$	$R^2 = 0,9964$
T=300,4	P=100	$\lambda(C) = -0,57C + 0,6428$	$R^2 = 0,9783$
T=471,2	P=1	$\lambda(C) = -0,3683C + 0,6679$	$R^2 = 0,9289$

Выводы

Обработка и обобщение экспериментальных данных по теплопроводности водных растворов солей, проводимое в работах [2,4], предполагают по существу два принципиально различных подхода к описанию концентрационных зависимостей λ_p . В первом случае водный раствор электролита рассматривается как бинарный, состоящий из молекул воды и “молекул” соли. При таком подходе необходимо отказываться от положения о диссоциации соли в растворе на анионы и катионы и рассматривать соль как 100% гипотетическую жидкость, обладающую коэффициентом теплопроводности λ_p и молярным объемом. Второй подход базируется на положениях теории электролитической диссоциации.

Установленные закономерности в поведении концентрационных зависимостей λ_p исследованного раствора и воды позволяют сделать вывод:

1. С ростом температуры возрастает эффект, направленный на увеличение теплопроводности раствора λ_p по сравнению с соответствующим значением коэффициента теплопроводности воды.

2. Увеличение давления приводит к эффекту в количественном отношении меньшем по сравнению с влиянием температуры.

3. Особенности, наблюдаемые при изменении коэффициента теплопроводности растворов с концентрацией температурой и давлением, не могут полностью быть предсказаны с помощью разработанных ранее методик расчета λ_p водных растворов электролитов. Это объясняется тем, что область их применения относится к температуре T=293K и атмосферному давлению.

Результаты экспериментальных данных внесены в рекомендуемые справочные данные (РСД) во всероссийском научно-исследовательском центре стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ (свидетельство №465-2002 от 21.09.2002 г.).

Литература

1. Riedel L. Die Wärmeleitfähigkeit von wasserigen Lösungen starker Elektrolyte // Chemie – Ingenieur – Technik. – 23 Jahrgang. – 1951. – 23. – p. 465.

2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968. – 464 с.

3. Варгафтик Н.Б., Зимина Н.Х. Теплопроводность водяного пара при высоких температурах // Теплоэнергетика. – 1964. – № 12. – С. 84–86.

4. Дульнев Г.М., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

5. Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С. Расчет теплопроводности двухкомпонентных водных растворов солей // Известия вузов: Нефть и газ. – 1985. – № 10. – С. 57–60.

6. Черненькая Е.И., Вернигора Г.А. Экспериментальное и расчетное определение теплопроводности растворов производства аммиачной соды // Журн. прикладной химии. – 1973. – № 6. – С. 1224.

7. Зайцев И.Д., Цейтлин Н.А. Методы расчета параметров физико-химических свойств смешанных растворов электролитов // Журн. прикладной химии. – 1977. – № 3. – С. 33–35.

8. Расторгуев Ю.Л., Ганиев Ю.А. Теплопроводность жидких растворов // ИФЖ. – 1968. – Т.14. – С. 689 – 697.

9. Косолап Ю.Г. Теплопроводность бинарных и смешанных растворов электролитов: дис. ...канд. техн. наук.–Баку, 1990.

10. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 1 [Текст] /А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт//Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 2 (83).– С. 114-122.

11. Астреин В.В., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л. Задача самоорганизации групп судов для предупреждения столкновений //Эксплуатация морского транспорта.– 2016.– № 1 (78).– С. 32-38.

12. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [текст] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // Морские интеллектуальные технологии.– 2018. –Т. 1. –№ 1 (39).–С. 205-208.

References

1. Riedel L. Die Wärmeleitfähigkeit von wasserigen Lösungen starker Elektrolyte // Chemie – Ingenieur – Technik. – 23 Jahrgang. – 1951. – 23. – p. 465.

- Misnar A. Teploprovodnost' tverdyhtel, zhidkosteij, gazoviihkompozicij [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. M.: Mir, 1968, 464 p.
2. Vargaftik N.B., Zimina N.H. Teploprovodnost' vodyanogo para privysokih temperaturah [Thermal conductivity of water vapor at high temperatures]. Teploenergetika, 1964, no. 12, pp. 84–86.
3. Dul'nev G.M., Zarichnyak Yu.P. Teploprovodnost' smesej i kompozicionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. L.: Energiya, 1974, 264 p.
4. Abdullaev K.M., El'darov V.S. Raschet teploprovodnosti dvuhkomponentnykh vodnykh rastvorov solej [Calculation of the thermal conductivity of two-component aqueous solutions of salts]. Izvestiya vuzov: Neft' i gaz, 1985, no. 10, pp. 57–60.
5. Chernen'kaya E.I., Vernigora G.A. Eksperimental'noe i raschetnoe opredelenie teploprovodnosti rastvorov proizvodstva ammiachnojsody [Experimental and calculated determination of the thermal conductivity of solutions for the production of ammonia soda]. Zhurn. prikladnoj khimii, 1973, no. 6, pp. 12–24.
6. Zajcev I.D., Cejtin N.A. Metody raschet parametrov fiziko-himicheskikh svoystv smeshannykh rastvorov elektrolitov [Methods for calculating the parameters of the physicochemical properties of mixed electrolyte solutions]. Zhurn. prikladnoj khimii, 1977, no. 3, pp. 33–35.
7. Rastorguev Yu.L., Ganiev Yu.A. Teploprovodnost' zhidkih rastvorov [Thermal conductivity of liquid solutions]. IFZh, 1968, T. 14, pp. 689 – 697.
8. Kosolap Yu.G. Teploprovodnost' binarnykh i smeshannykh rastvorov elektrolitov [Thermal conductivity of binary and mixed solutions of electrolytes]: dis. kand. tekhn. nauk. –Baku, 1990.
9. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1 [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.
11. Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L. Zadacha samoorganizatsii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij / Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 1 (78). S. 32-38.
12. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [tekst] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. № 1 (39). S. 205-208.

УДК 621.431.74

DOI: 10.34046/aumsuomt94/26

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЯЖЁЛОГО ТОПЛИВА И ВОДОТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

А.К. Полковников, кандидат технических наук, доцент

Н.А. Полковникова, кандидат технических наук

В статье рассмотрены особенности гидродинамической обработки высоковязкого тяжёлого топлива RMG380 (500) с помощью четырёхкамерного гомогенизатора. Мелкодисперсная и однородная смесь топлива и воды образуется в результате резкого изменения скорости истечения в соплах и падения давления в вакуумной камере, а смешивание происходит за счёт прохода эмульсии через отверстия на выходе из камеры ультразвуковых колебаний. Разработана схема модернизации судовой расходной топливной системы для приготовления и использования водотопливных эмульсий (ВТЭ) в главных двухтактных дизелях. Применение четырёхкамерного гомогенизатора обеспечивает измельчение структуры органической части топлива, уменьшению размеров агломератов смол и асфальтенов, в результате увеличивается скорость сгорания в цилиндрах. Представлены результаты эксплуатационных испытаний главного судового двигателя при использовании ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380. Использование ВТЭ с содержанием воды 12 % позволяет снизить расход топлива за счёт улучшения качества смесеобразования, способствует уменьшению нагарообразования и замедлению реакций окисления азота. Рассмотрены физические причины положительного влияния ВТЭ на экономические и экологические показатели дизеля.

Ключевые слова: судовой дизель, судовой гомогенизатор топлива, тяжёлое топливо, водотопливная эмульсия, отработавшие газы, выбросы вредных веществ с отработавшими газами, структура эмульсии, содержание воды.

The paper considers features of high viscosity heavy fuel RMG380 (500) hydrodynamic treatment using a four-chamber homogenizer. A finely dispersed and homogeneous mixture of fuel and water is formed as a result of sudden change in nozzles outflow velocity and a pressure drop in vacuum chamber, and mixing occurs due to the passage of emulsion through the holes at ultrasonic vibrations chamber outlet. Modernization scheme of the marine fuel supply system for preparing and using water-fuel emulsions in two-stroke marine diesel engines has been developed. The use of a four-chamber homogenizer ensures grinding structure of fuel organic part, size reduction of resins agglomerates and asphaltenes, as a result, the combustion rate in cylin-