

## Раздел 2 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 532.7

DOI: 10.34046/aumsuomt104/12

### РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ В СКРУББЕРАХ

*А.Н. Мышкина, аспирант*

В статье рассматривается необходимость очистки воздуха и топлива от  $\text{CO}_2$  путем регуляции теплопроводности бинарного раствора электролитов в скрубберах. Также представлена теоретическая модель теплопроводности, основанная на ион-дипольном взаимодействии, которая учитывается в оценке сольватных чисел подвижности ионов и молекул электролитов. Дана оценка возможности получения значений коэффициента теплопроводности водных растворов смесей электролитов в рамках данной модели. Ион-дипольное взаимодействие, учитываемое в оценке сольватных чисел подвижности ионов и молекул электролитов – основа данной теоретической модели.

**Ключевые слова:** скруббер, коэффициент теплопроводности, бинарный раствор электролитов, сольватированный ион.

### IMPLEMENTATION OF THERMAL CONDUCTIVITY REGULATORS OF BINARY SOLUTIONS OF ELECTROLYTES IN SCRUBBERS

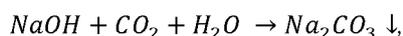
*A.N. Myshkina*

The paper discusses the need for cleaning air and fuel from  $\text{CO}_2$  by regulating the thermal conductivity of a binary electrolyte solution in scrubbers. It also presents a theoretical model of thermal conductivity based on the mobility of ions, taking into account the characteristics of individual solvated ions and the properties of the solvent. The possibility of obtaining values of the thermal conductivity coefficient for aqueous solutions of electrolyte mixtures within the framework of this model is assessed.

**Keywords:** Scrubber, thermal conductivity coefficient, binary electrolyte solution, solvated ion.

#### Введение

Очистка уходящего газа в скруббере от  $\text{CO}_2$  обусловлена тем, что двуокись углерода ведет к карбонизации электролита по следующей реакции:



которая, в свою очередь, сопровождается повышением его сопротивления, а также блокировки поверхности электродов нерастворимыми карбонатами [1]. Предельно допустимая степень содержания  $\text{CO}_2$  в окислителе, с целью поддержания нормальной работы элементов, не должна превышать показателя 0,005%об. В то время как концентрация углекислого газа в воздухе составляет 0,03-0,05%об. Скруббер позволяет снизить концентрацию  $\text{CO}_2$  в уходящих газах, однако при этом необходимо регулировать теплопроводность бинарного раствора электролитов [2].

Целью данной статьи является создание единой математической модели, которая определяет коэффициент теплопроводности бинарного раствора электролитов в скрубберах, посредством ионных составляющих при оценке приведенных

масс сольватированных и несольватированных ионов.

#### Материалы и методы исследования

Широкий диапазон изменения концентрации и температур позволяет оценить теплопроводность бинарных растворов электролитов с помощью теоретической модели. Ион-дипольное взаимодействие, которая учитывается в оценке сольватных чисел подвижности ионов и молекул электролитов – основа данной теоретической модели. Изучение возможности использования разработанной математической модели для оценки теплопроводности бинарных растворов электролитов представляет научный интерес [3-14].

Уравнение определения коэффициента теплопроводности имеет следующий вид:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{5}{2}RT - 2\hbar\omega\right)N_A}{6\pi\mu r_s b \left(1 + \frac{r_s}{r_d}\right)}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $K$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $r_s$  – приведенный радиус сольватированных ионов.

$$\hbar\omega = \sqrt{4\pi z_i^2 e^2 \hbar^2 c N_A / 1000\mu}, \quad (2)$$

где  $\hbar\omega$  – энергия колебательного процесса;  $z_i, e$  – элементарный заряд;  $C$  – концентрация раствора, моль/л;  $\mu$  – приведенная масса несольватированных ионов;

$$\mu = \frac{m_{kt} * m_{an}}{m_{kt} + m_{an}}, \quad (3)$$

где  $m_{kt}$  – масса катиона;  $m_{an}$  – масса аниона  
Приведенная масса несольватированных ионов в смеси рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{N_1}{m_1} + \frac{N_2}{m_2} + \dots + \frac{N_n}{m_n}, \quad (4)$$

где  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – массы несольватированных ионов в смеси;  $N_1 = \frac{C_1}{C}, N_2 = \frac{C_2}{C}, \dots, N_n = \frac{C_n}{C}$  – мольные доли ионов.

Приведенный радиус сольватированных ионов смеси электролитов рассчитывается по следующей формуле:

$$r_s = \frac{N_1}{r_{s1}} + \frac{N_2}{r_{s2}} \quad (5)$$

В то время как радиус сольватированных ионов электролита:

$$r_s = \sqrt[3]{\frac{25z_i * e * p * \hbar^2 * n_s}{3M * R_s * k_B^2 * T^2}}, \quad (6)$$

где  $p$  – дипольный момент молекулы растворителя;  $R_s$  – радиус молекулы растворителя;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $n_s$  – сольватное число иона.

Сольватное число иона рассчитывается следующим образом:

$$n_s = \frac{z_i * e * R_s^2}{r_i * p} - \frac{5k_B * T * \epsilon * R_s^2}{2e * p}, \quad (7)$$

где  $r_i$  – радиус иона,  $\epsilon$  – диэлектрическая постоянная.

Отсюда следует, что подвижность иона:

$$b = \frac{z_i^2 * e^2}{4\epsilon * \Delta H^2} \sqrt{\frac{2}{\mu_s} \left( \frac{5}{2} RT - 2\hbar\omega \right)} * f, \quad (8)$$

где  $\Delta H^2$  – энергия водородной связи растворителя,  $\mu_s$  – приведенная масса сольватированных ионов, которую можно рассчитать по следующей формуле:

$$\mu_s = \frac{m_{s(kt)} * m_{s(an)}}{m_{s(kt)} + m_{s(an)}}, \quad (9)$$

$$m_s = m + n_s * M, \quad (10)$$

где  $m_s$  – масса сольватированного иона,  $M$  – молярная масса растворителя.

Что касемо сольватированных ионов в смеси, то приведенная масса рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{\mu_s} = \frac{N_1}{m_{s1}} + \frac{N_2}{m_{s2}} + \dots + \frac{N_n}{m_{sn}}, \quad (11)$$

где  $m_{s1}, m_{s2}, \dots, m_{sn}$  – массы сольватированных ионов в смеси.

Функция распределения Максвелла по скоростям движения ионов:

$$f = \exp\left(-\sqrt{\frac{4\pi * z_i^2 * e^2 * C * N_A * \hbar^2}{1000\mu * k_B^2 * T^2}}\right) \quad (12)$$

Радиус экранирования Дебая:

$$r_d = \sqrt{\frac{1000\epsilon * k_B * T}{4\pi * z_i^2 * e^2 * C * N_A}} \quad (13)$$

Были изучены разные пары смесей электролитов и в таблице 1 представлены полученные расчетные данные по теплопроводности водных растворов.

Таблица 1 – Значения коэффициента теплопроводности бинарных растворов электролитов

Т, К	C <sub>1</sub> , моль/л	C <sub>2</sub> , моль/л	$\lambda * 10^3$ , [Вт/м*К]	
			KF и KBr	NaOH и KJ
288	2,5	0,5	533	562
	2,0	1,0	532	551
	1,5	1,5	535	531
	1,0	2,0	514	507
	0,5	2,5	498	480
293	2,5	0,5	536	560
	2,0	1,0	530	558
	1,5	1,5	528	535
	1,0	2,0	518	510
	0,5	2,5	502	492
298	2,5	0,5	539	568
	2,0	1,0	538	557
	1,5	1,5	533	538
	1,0	2,0	522	514
	0,5	2,5	506	497
303	2,5	0,5	543	571
	2,0	1,0	542	560
	1,5	1,5	536	541
	1,0	2,0	526	518
	0,5	2,5	510	501
308	2,5	0,5	546	574
	2,0	1,0	540	563
	1,5	1,5	536	545
	1,0	2,0	530	521
	0,5	2,5	514	505

**Заключение.** Полученные результаты указывают на то, что рассчитанная математическая модель применима при оценке значений коэффициента теплопроводности бинарных растворов электролитов [15, 16, 17].

Предлагаемая математическая модель расчета позволяет регулировать теплопроводность бинарного раствора электролита в скруббере, который обладает высокой растворяющей способностью, тем самым обеспечивая наилучшее очищение уходящего газа от CO<sub>2</sub> и продуктов сгорания.

#### Литература

1. Мищенко, П.А. Скруббер с пенным аппаратом для очистки отработавших газов судовых дизелей. Физико-математическая модель расчета пенного аппарата / П.А. Мищенко, О.В. Соляков, С.В. Титов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 195-171
2. Соляков, О.В. Перспективы применения скрубберов для очистки отработавших газов судовых дизелей от оксидов серы / О.В. Соляков, В.Н. Окунев // XVII Международный экологический форум «День Балтийского моря», Санкт – Петербург, 22-23 марта 2016 г. – СПб.: ООО «Свое издательство», 2016. – 163-165.
3. Орлов, М.Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: учебное пособие / М. Е. Орлов; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 204 с.
4. Балданов, М.М. Об энергетике гидратации ионов // ЖФХ. – 1981. – Т.55. – №11. – С. 2862.
5. Балданов, М.М., Иванов, С.В., Иванов, В.Ф., Танганов, Б.Б. К проблеме устойчивости состояния ионов в растворах электролитов // ЖФХ. – 1995. – Т.69. – №3. – С. 529-531.
6. Балданов, М.М., Иванов, С.В., Танганов, Б.Б. Плазмоподобное состояние растворов электролитов и проблема вязкости // ЖОХ. – 1994. – Т.64. – №5. – С. 719-721.
7. Балданов, М.М., Мохосоев, М.В., Танганов, Б.Б. Неэмпирический расчет сольватных чисел ионов в растворах // ДАН СССР. – 1989. – Т.308. – №1. – С. 106-110.
8. Балданов, М.М., Танганов, Б.Б. К проблеме сольватных чисел и масс сольватированных ионов в спиртовых растворах // ЖФХ. – 1992. – Т.66. – №4. – С. 1084-1088.
9. Балданов, М.М., Танганов, Б.Б., Мохосоев, М.В. Плазмоподобное состояние растворов электролитов и диссипативные процессы // ДАН СССР. – 1989. – Т.308. – №2. – С. 397-401.
10. Балданов, М.М., Танганов, Б.Б., Мохосоев, М.В. Неэмпирический расчет сольватных чисел ионов в растворах // Проявление природы растворителя в термодинамических свойствах растворов: Межвуз. сб.–Иваново, 1989. – С. 66-70.

11. Балданов, М.М., Танганов, Б.Б., Мохосоев, М.В. Неэмпирический расчет сольватных чисел ионов в растворах // Проблемы сольватации и комплексообразования в растворах: тезисы докл. IV Всесоюз. совещания. – Иваново, 1989. – ч. II. – С. 174.
12. Павлов, Н.Н., Балданов, М.М., Лебедев, В.М. Количественная оценка сольватных чисел ионов в растворах // Изв. вузов: Химия и хим. технология. – 1982. – Т.25. – Вып. 12. – С. 1468
13. Кондратьев С.И. Методы вычисления характеристических полиномов в задачах управления подвижных объектов: учебное пособие / С.И. Кондратьев, Г.А. Зеленков.–Новороссийск: Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Морская гос. акад. им. адмирала Ф. Ф. Ушакова", 2007.
14. Каракаев А.Б. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (Часть2) [Текст] /А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт// Эксплуатация морского транспорта.– 2016.– № 4 (81).– С. 85-95.
15. Боран-Кешипян А.Л. Положения теории интервальных средних, применительно к анализу надежности технических средств сложных систем при независимых по надежности элементах [текст] / А.Л. Боран-Кешипян, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта.– 2014.– № 1 (73).– С. 38-42.
16. Состояние проблемы и методы снижения вредных выбросов судовых энергетических установок / Т. А. Макаревич, Е. В. Хекерт, Ю. С. Кузнецова [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2022. – № 2(103). – С. 127-134.
17. Современные требования в области загрязнения воздушной среды оксидами серы с судов / М. А. Модина, Е. В. Хекерт, А. И. Епихин [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 88-91.

#### References

1. Mishchenko P.A. Scrubber with foam apparatus for cleaning the exhaust gases of marine diesel engines. Physico-mathematical model of foam apparatus calculation / P.A. Mishchenko, O.V. Soliakov, S.V. Titov // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. - 2017. - № 3-4. - С. 195-171
2. Solyakov, O.V. Prospects of application of scrubbers for cleaning the exhaust gases of marine diesel engines from sulfur oxides. / O.V. Solyakov, V.N. Okunev // XVII International Environmental Forum "Baltic Sea Day", Saint - Petersburg, March 22-23, 2016. - St. Petersburg: ООО "Svoeizdatelstvo", 2016. - 163-165
3. Orlov, M. E. Theoretical foundations of heat engineering. Heat and mass exchange: textbook / М. Е.

- Orlov, Ulyanovsk State Technical University. - Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2013. - 204 с.
4. Baldanov, M.M. On energy of ion hydration // ZhPH. - 1981. - T.55. - №11. - С. 2862.
  5. Baldanov M.M., Ivanov S.V., Ivanov, V.F., and Tanganov, B.B. To the Problem of Stability of the Ion State in Electrolyte Solutions // ZhPH. - 1995. - T.69. - №3. - С. 529-531.
  6. Baldanov M.M., Ivanov S.V., and Tanganov, B.B. Plasma-like state of electrolyte solutions and viscosity problem // ZhOH. - 1994. - T.64. - №5. - С. 719-721.
  7. Baldanov, M.M., Mokhosoev, M.V., and Tanganov, B.B. Nonempirical calculation of solvate numbers of ions in solutions // DAN USSR. - 1989. - T.308. - №1. - С. 106-110.
  8. Baldanov, M.M., and Tanganov, B.B., To the Problem of Solvate Numbers and Masses of Solvated Ions in Alcohol Solutions // ZhPH. - 1992. - T.66. - №4. - С. 1084-1088.
  9. Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Plasma-like state of electrolyte solutions and dissipative processes // DAN USSR. - 1989. - T.308. - №2. - С. 397-401.
  10. Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Nonempirical calculation of solvate numbers of ions in solutions // Manifestation of Solvent Nature in Thermodynamic Properties of Solutions: Intervuz.sb.-Ivanovo, 1989. - С. 66-70.
  - Baldanov, M.M., Tanganov, B.B., Mokhosoev, M.V. Non-empirical calculation of solvation numbers of ions in solutions // Problems of Solvation and Complexation in Solutions: Abstracts of IV All-Union Meeting. - Ivanovo, 1989. - p.II. - С. 174.
  12. Pavlov, N.N., Baldanov, M.M., Lebedev, V.M. Quantitative evaluation of solvate numbers of ions in solutions // Izv. of high schools: Chemistry and chemical technology. - 1982. - T.25. - Issue. 12. - С. 1468
  13. Kondrat'ev S.I. Metody vychisleniya harakteristicheskikh polinomov v zadachah upravleniya podvizhnymi ob"ektami. Uchebnoe posobie / S. I. Kondrat'ev, G. A. Zelenkov // Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. admirala F. F. Ushakova". Novorossiysk, 2007.
  14. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (CHast'2) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
  15. Boran-Keshish'yan A.L. Polozheniya teorii interval'nykh srednih, primenitel'no k analizu nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv slozhnykh sistem pri nezavisimyykh po nadezhnosti elementah [tekst] / A.L. Boran-Keshish'yan, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2014. № 1 (73). S. 38-42.
  16. Sostoyanie problemy i metody snizheniya vrednykh vybrosov sudovykh energeticheskikh ustanovok / T. A. Makarevich, E. V. Khekert, YU. S. Kuznecova [i dr.] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2022. – № 2(103). – S. 127-134.
  17. Sovremennyye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной sredy oksidami sery s sudov / M. A. Modina, E. V. Khekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt104/13

## ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

*Г.В. Игнатенко, старший преподаватель*

*О.В. Sviderskaya, PhD in mechanical engineering (Belarus)*

*В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор*

*В.А. Матюхина, магистрант*

Выполнено моделирование рабочих процессов судового дизельного двигателя MAN D&T серии MC с целью снижения выбросов диоксида углерода с отработавшими газами. Целью моделирования был поиск конструктивных и эксплуатационных решений, влияющих на эмиссию CO<sub>2</sub>. При выполнении расчетного исследования использовалась математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, реализованная в компьютерной программе ДИЗЕЛЬ-ПК. В качестве исследуемых переменных приняты степень сжатия, угол опережения и продолжительность впрыска топлива, значения которых можно устанавливать без внесения существенных изменений в конструкцию двигателя. Получена математическая модель в виде уравнения регрессии, описывающая влияние исследуемых параметров на удельный выброс диоксида углерода. Для определения коэффициентов уравнения регрессии реализовано планирование факторного эксперимента второго порядка. Используя полученную математическую модель может быть выполнена многопараметрическая оптимизация значений исследуемых параметров на выбросы CO<sub>2</sub> с отработавшими газами. Показана возможность использования полученной математической модели с целью снижения удельных выбросов диоксида углерода с отработавшими газами судового дизельного двигателя на 32 % за счет выбора оптимального значения степени сжатия.