

2. Тимошпольский В. И., Несенчук А. П., Трусова И. А. Промышленные теплотехнологии. – Мн.: Вышэйш. шк., 1998. – Ч. 3. – 422 с.
3. Шевелюк М. И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей. – М.: Оборонгиз, 1960. – 684 с.
4. Липов Ю. М., Самойлов Ю. Ф., Виленский Т. В. Компоновка и тепловой расчет парового котла. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
5. Жихар Г. И. Физико-химические процессы в газомазутных котлах. – Мн.: Тэхналогія, 2002. – 325 с.
6. Маршак Ю. Л., Рыжак А. В. Шиповые экраны топок паровых котлов. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.
7. Шатиль А. А. Сжигание природного газа в камерах газотурбинных установок. – Л.: Недра, 1972. – 232 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 3.02.2003

УДК 536.2.022:532.77

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СМЕШАННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ NaCl, CaCl<sub>2</sub> И KCl ВБЛИЗИ ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ

Канд. техн. наук ЭЛЬДАРОВ В. С.

*Азербайджанская государственная нефтяная академия*

Как известно, во многих отраслях техники предъявляются повышенные требования к точности расчетов технологических процессов и надежности проектирования машин и аппаратов. Развитие промышленной и геотермальной энергетики, ракетной и криогенной техники способствовало существенному расширению круга рабочих веществ и диапазона параметров, а также вызвало необходимость выявления новых данных о теплофизических свойствах веществ, необходимых для обеспечения существенного экономического эффекта за счет снижения затрат топлива, электроэнергии, металла и повышения эффективности технологических процессов.

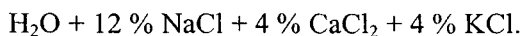
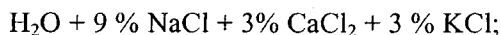
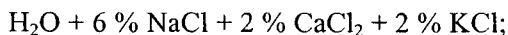
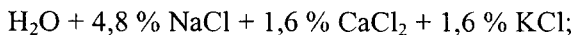
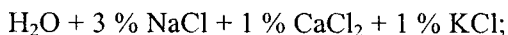
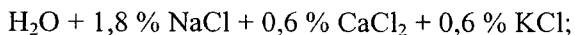
Большинство жидкостей, используемых в современной технике, – это растворы. Разработка процессов разделения, химического синтеза и очистки веществ, выбор оптимальных тепло- и хладоносителей требуют систематической информации о термодинамических и переносных свойствах растворов. В геотермальной энергетике, галлургии, химической промышленности, гидрометаллургии, ядерной энергетике и газовой промышленности широко используются водные растворы электролитов.

Изучение термических и переносных свойств водных растворов – один из актуальных вопросов теплофизики и термохимии. По нашему мнению, среди переносных свойств растворов наибольший интерес представляет теплопроводность.

В настоящей работе экспериментально изучена теплопроводность смешанных водных растворов солей NaCl, CaCl<sub>2</sub> и KCl в интервале температур

293...573 К, концентраций 3...20 мас. % при соотношении  $\text{NaCl} : \text{CaCl}_2 : \text{KCl} = 3 : 1 : 1$  по концентрации в массовых процентах. Выбор водных растворов системы  $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{KCl}$  не случаен, так как выбранные соли являются основными компонентными природных соленых вод. Эти соли в водном растворе полностью диссоциируются на ионы. Кроме того, присутствие в растворе ионов различных радиусов с положительной и отрицательной гидратацией позволяет более подробно проанализировать факторы, которые определяют теплопроводность водных растворов электролитов.

В статье исследованы следующие растворы:



Таким образом, измерена теплопроводность водных растворов с общей концентрацией электролита 3, 5, 8, 10, 15 и 20 мас. %.

Указанные выше растворы солей готовились из реактивов марки «химически чистый» по методике, предложенной в [1]. Теплопроводность названных четырехкомпонентных водных растворов солей изучалась впервые. Для исследования теплопроводности выбран метод коаксиальных цилиндров в относительном варианте. Опыты выполнены на установке с модифицированной измерительной ячейкой [2].

Принцип измерения теплопроводности электропроводящих жидкостей относительным методом цилиндрического слоя основывается на том факте, что при заданной температуре и постоянном напряжении на нагревателе электродвижущая сила  $\Delta e$  дифференциальной термопары однозначно определяется теплопроводностью  $\lambda$  исследуемой жидкости. Вид этой зависимости устанавливается градуировкой прибора, т. е. нахождением  $\Delta e$  для жидкостей с известными теплопроводностями. Однако на практике удобно использовать не функцию  $\Delta e = \Delta e(\lambda)$ , а функцию  $y = y(x)$ , где

$$y = \frac{x}{\lambda}; \quad x = \frac{V^2}{\Delta e}.$$

Здесь  $V$  – напряжение на нагревателе. В этих переменных градуировочная кривая почти не зависит от величины напряжения  $V$  и близка к пологой прямой.

В наших исследованиях установка была градуирована по воде в области температур от 20 до 300 °С. Данные по теплопроводности взяты из [3]. При измерениях теплопроводности от 20 до 80 °С начальным принято атмосферное давление, а при 100...300 °С – (0,5...10) МПа.

Полученные экспериментальные результаты по теплопроводности системы  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{KCl}$  в зависимости от концентрации и температуры представлены в табл. 1. Погрешность экспериментальных данных оценена в 1,3 %. Для их обобщения построена зависимость теплопроводности раствора от температуры в относительных координатах, т. е.  $\lambda/\lambda_0 = f(T/T_0)$

(рис. 1). Здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности раствора при температуре  $T$ ;  $\lambda_0$  – то же при температуре  $T_0 = 293,15$  К. На этом же графике приведены экспериментальные данные по теплопроводности других растворов, полученные в [4].

Таблица 1

**Экспериментальные значения теплопроводности системы  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{KCl}$  вблизи линии насыщения  $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м · К)**

T, К	Общая концентрация солей $c$ , мас.%					
	3	5	8	10	15	20
293,18	596	595	592	591	587	583
303,17	613	611	609	607	603	599
313,15	627	625	623	621	617	613
323,19	639	638	635	634	630	625
333,20	649	648	645	644	639	635
353,16	665	664	661	659	655	651
373,18	675	673	671	669	664	660
393,14	679	678	675	673	669	664
403,16	680	679	676	674	670	665
413,21	681	680	677	675	671	666
423,21	679	677	674	673	668	663
433,18	677	676	673	671	667	662
453,23	671	670	667	665	661	657
473,19	660	659	656	654	650	646
498,17	642	640	637	636	632	627
523,13	618	616	614	612	608	604
548,19	587	585	583	582	578	574
573,22	545	544	542	540	537	533

Как видно, экспериментальные данные по теплопроводности трех- и четырехкомпонентных водных растворов солей хорошо лежат на одной общей кривой. Эта зависимость описывается уравнением параболического типа

$$\lambda = \lambda_0(A + B\tau + C\tau^2), \quad (1)$$

где  $\tau = T/T_0$ ;  $A, B, C$  – коэффициенты, зависящие от температуры и природы электролита.

Следует отметить, что (1) получено в [5, 6] для теплопроводности бинарных водных растворов солей. Значения коэффициентов  $A, B, C$  в данном уравнении не зависят от концентрации. В зависимости от хода изменения теплопроводности раствора значения коэффициентов  $A, B, C$  изменяются, так как в области температур 20...150 °С эти коэффициенты имеют одни значения, а в интервале 160...300 °С – другие. Только с учетом температурной зависимости коэффициентов  $A, B, C$  получается хорошее

согласование между экспериментальными и расчетными результатами, выполненными по (1). Для системы  $H_2O-NaCl-CaCl_2-KCl$  коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  имеют следующие значения:

при  $20 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $A = -0,71195$ ;  $B = -2,69343$ ;  $C = -0,97818$ ;

при  $160 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $A = -0,52222$ ;  $B = 2,31931$ ;  $C = -0,81045$ .

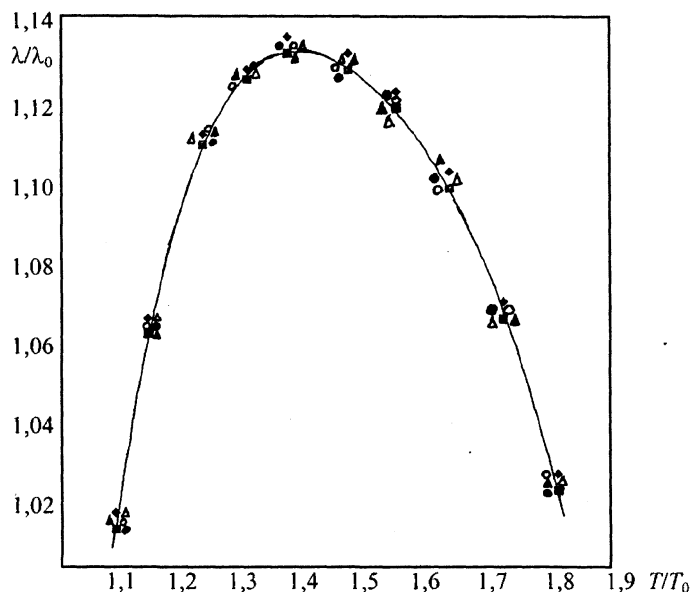


Рис. 1. Обобщенная зависимость теплопроводности водных растворов электролитов в относительных координатах:  $\blacklozenge$  –  $KCl-CaCl_2$ ;  $\blacksquare$  –  $KCl-CaCl_2-MgCl_2$ ;  $\circ$  –  $NaCl-CaCl_2-MgCl_2$ ;  $\bullet$  –  $NaCl-Na_2SO_4-MgCl_2$ ;  $\blacktriangle$  –  $NaCl-Na_2SO_4-CaCl_2$ ;  $\triangle$  –  $MgCl_2-MgSO_4$

Результаты расчетов, выполненных по формуле (1), для водных растворов системы  $NaCl-CaCl_2-KCl$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента теплопроводности водных растворов системы  $NaCl-CaCl_2-KCl$  и сравнение их с экспериментальными данными  $\lambda_{расч} \cdot 10^3, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$

$T, \text{ К}$	3 % $NaCl$ + 1 % $CaCl_2$ + + 1 % $KCl$ + $H_2O$		9 % $NaCl$ + 3 % $CaCl_2$ + + 3 % $KCl$ + $H_2O$		12 % $NaCl$ + 4 % $CaCl_2$ + + 4 % $KCl$ + $H_2O$	
	$\lambda_{расч}$	$\Delta \%$	$\lambda_{расч}$	$\Delta \%$	$\lambda_{расч}$	$\Delta \%$
303,16	611	0	603	0	599	0
323,17	636	-0,31	627	-0,48	623	-0,32
353,19	662	-0,31	653	-0,31	649	-0,31
373,16	673	0	664	0	660	0
393,17	679	0,15	670	0,15	665	0,15
423,22	677	0	667	-0,15	663	0
453,14	670	0	661	0	657	0
473,20	660	0,15	652	0,31	647	0,15
498,18	642	0,31	633	0,16	629	0,32
523,17	616	0	608	0	604	0
548,21	584	-0,17	576	-0,35	572	-0,35
573,23	544	0	537	0	533	0

Из табл. 2 видно, что расчетные и экспериментальные данные по теплопроводности водных растворов системы  $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{KCl}$  хорошо согласуются, максимальное расхождение в интервале температур 303...573 К составляет 0,48 %.

Уравнение (1) позволяет прогнозировать температурную зависимость коэффициента теплопроводности любого бинарного или многокомпонентного раствора при различных концентрациях электролита, если известны для данного раствора значения  $A + B\tau + C\tau^2 = f(T)$  определенной концентрации и  $\lambda_0 = f(c, \text{мас. \%})$ . Формула (1) значительно облегчает работу экспериментаторов, освобождая их от длительных опытов.

Экспериментальные результаты настоящей работы и данные других авторов [7–9] по температурной зависимости теплопроводности водных растворов солей свидетельствует, что с увеличением температуры теплопроводность растворов электролитов увеличивается до 418...423 К, далее эта зависимость переходит в температурную зависимость теплопроводности нормальных жидкостей, т. е. начиная с  $\sim 423$  К теплопроводность исследованных растворов электролитов уменьшается.

Отметим, что теория Андриановой, Самойлова и Фишера [10] в состоянии объяснить только аномальный ход теплопроводности воды и водных растворов электролитов (увеличение теплопроводности этих соединений с ростом температуры), но не может объяснить нормальное поведение теплопроводности этих веществ свыше 418...423 К.

Изменение хода теплопроводности исследованных нами водных растворов солей свыше 418...423 К связано с их структурными изменениями. Известно, что вода, входящая в зону ионов, так или иначе взаимодействует с ними. В результате могут происходить различные изменения. В зависимости от природы и степени взаимодействия ионов с молекулами растворителя могут изменяться все виды движения (трансляционное, вращательное и поступательное) частиц, и, следовательно, их коллективное движение, которое характеризует процесс теплопереноса в растворах и других жидкостях.

Происходящие изменения в структуре исследованных растворов электролитов и движения молекул воды в интервале 393...423 К приводят к тому, что аномальный ход их теплопроводности заменяется общей закономерностью теплопроводности жидкостей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Артеменко А. И., Малеванный В. А., Тикунова И. В. Справочное руководство по химии. – М.: Высш. шк., 1990. – 303 с.
2. Абдуллаев К. М., Эльдаров В. С., Мустафаев А. М. Теплопроводность водных растворов системы  $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$  // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, № 3. – С. 397–400.
3. Ривкин С. П., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 423 с.
4. Вахабов И. И. Теплопроводность многокомпонентных водных растворов электролитов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Баку: АГНА, 1993. – 29 с.
5. Николаев В. А. Теплопроводность водных растворов хлоридов и сульфатов натрия и магния в широком интервале параметров состояния: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Баку: АЗИНЕФТЕХИМ, 1984. – 22 с.

6. Mamedov R. N., El'darov V. S., Mustafayev A. M. Pressure influence to the heat conductivity of electrolytes water solutions // Trans. of 4<sup>th</sup> Baku International Congress, Baku, September 23–26. – Baku, 1997. – P. 5–6.

7. П е п и н о в Р. И. Теплофизические свойства водных растворов солей – основных компонентов природных соленых вод в широком интервале параметров состояния: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Баку, 1994. – 68 с.

8. Магомедов У. Б. Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах // Геотермия, геологические и теплофизические задачи. – Махачкала, 1992. – С. 168–187.

9. Absolute measurements of the thermal conductivity of aqueous NaCl solutions at pressures up to 40 Мра / T. Nagasaka, A. Okada, Z. Suzuki et al. // Ber. Bursenges. Phys. Chem. – 1983. – V. 87. – P. 859–866.

10. Андрианова И. С., Самойлов О. Я., Фишер И. З. Теплопроводность и структура воды // Журнал структ. химии. – 1967. – Т. 8, № 5. – С. 813–816.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики  
и технологии воды

Поступила 1.11.2002

УДК 536.2.001.24

## **ПРОБЛЕМА ТЕПЛОВОГО УДАРА НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТИПА**

**Докт. физ.-мат. наук, проф. КАРТАШОВ Э. М.,  
РЕМИЗОВА О. И.**

*Московская государственная академия тонкой химической технологии  
им. М. В. Ломоносова*

В настоящей работе продолжены начатые в [1] исследования динамической реакции массивного тела в случае резкого теплового воздействия на его поверхность.

В ряде важных практических режимов работы элементов конструкций в условиях повышенных температур встречаются случаи, когда имеет место достаточно быстрый и интенсивный нагрев объектов. Такая ситуация возникает, например, при высокоинтенсивном теплообмене в устройствах импульсной и лазерной техники, лазерной обработке материалов, в процессах плазменного напыления, в энергетических каналах ядерных реакторов, псевдоожигенном слое, дисперсных системах и зернистых материалах, слоистых полупроводниковых структурах, кристаллах катализатора и при выращивании гомоэпитаксиальных пленок германия и др. Характерной особенностью материалов, находящихся в условиях перечисленных тепловых воздействий, является наличие больших по абсолютной величине градиентов температур, приводящих к появлению напряжений, которые в свою очередь могут вызвать разрушение материала. Для описания возни-