

МАГОМЕДОВ МАГОМЕД МАГОМЕД-ШАРИПОВИЧ

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ ВОДНО-
СОЛЕВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизики и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в лаборатории теплофизики возобновляемой энергетики института проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиала Объединенного института высоких температур РАН.

Научный руководитель: Алхасов Алибек Басирович
доктор технических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится « ___ » _____ на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <http://jiht.ru/>.

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02 ОИВТ РАН
д.ф.-м.н.

Васильев М. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе изложены результаты исследований влияния температуры, давления и концентрации на теплопроводность и вязкость водно-солевых систем. Исследования выполнены на основе анализа экспериментальных данных различных авторов.

Актуальность работы.

Исследование теплофизических свойств обычной и тяжелой воды, ее соединений, и прежде всего, водных растворов солей остается ключевой проблемой промышленной теплоэнергетики. Развитие геотермальной энергетики вызвало необходимость иметь достоверные справочные данные о теплофизических свойствах геотермальных вод, а именно о теплопроводности и вязкости водных растворов солей при температурах 293–473 К, давлениях P_s –100 МПа и концентрациях 0–25 % (масс.). В литературе имеется достаточно большое количество экспериментальных данных, касающихся бинарных водных растворов. Однако большинство их ограничено по температуре, а влияние давления практически не изучено. Так, для динамической вязкости водных растворов солей отсутствуют экспериментальные данные выше давления 40 МПа, нет обобщённых формул для получения достоверных данных о вязкости водных растворов солей до 100 МПа. Также, важную ценность представляет информация о поведении и расчетных значениях теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем. Также важным является систематизация теплофизических табличных данных рассчитанных по представленным в работе обобщенным формулам. Экспериментальные данные по теплопроводности и динамической вязкости водно-солевых систем при высоких параметрах до последнего времени были ограничены и разбросаны по малодоступным источникам.

Работа выполнялась по проекту «Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов» в рамках реализации федеральной целевой

программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Мероприятие 1.2, 1 очередь) по лоту 1: «Разработка научно-технических решений по повышению эффективности использования геотермальных ресурсов для производства электроэнергии, тепла и извлечения ценных химических соединений из геотермальных рассолов»

Информация о теплофизических свойствах воды и водных растворов солей необходима в расчётах при конструировании теплообменных аппаратов для геотермальной энергетики, при проектировании геотермальных электростанций (ГеоЭС); при выщелачивании ценных компонентов из рудного сырья; при извлечении химкомпонентов из геотермальных рассолов; при создании оптимальных установок для выращивания кристаллов; при производстве удобрений; при создании теории растворов и для эффективного воздействия при добыче и эксплуатации подземных геотермальных вод. Надежные данные по теплопроводности и динамической вязкости водных растворов солей при проектировании технологических процессов способствуют повышению эффективности производства, снижению материальных затрат, а в ряде случаев обеспечивают безаварийную работу энергетических установок.

Таким образом, знание достоверных данных о динамической вязкости и теплопроводности являются актуальным для решения многих практических задач и прогнозирования поведения водно-солевых систем при высоких параметрах состояния.

Вышесказанным инициированы исследования автора.

Цель и задачи исследования.

Анализ состояния исследований теплопроводности и других переносных свойств водных растворов солей показал отсутствие в литературе систематизированных и взаимосогласованных данных в широком интервале параметров состояния. В связи с этим основной задачей диссертации является:

– систематизация данных теплопроводности и вязкости при высоких параметрах состояния;

– получение обобщенных формул для установления закономерностей изменения теплопроводности и динамической вязкости исследованных растворов в зависимости от концентрации, температуры и давления;

– обобщение полученных данных и разработка метода прогнозирования теплопроводности и динамической вязкости малоизученных и неисследованных водных растворов солей;

– составление таблиц рекомендуемых значений теплопроводности и динамической вязкости для водно-солевых систем.

Научная новизна результатов исследования:

- Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности воды и водных растворов солей в интервалах температур 293–473 К, давлений 0.1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.);
- Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности воды в интервалах температур 293–473 К, давлений 0.1–100 МПа на основе фундаментальной связи теплопроводности и плотности воды;
- Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем в интервалах температур 293–473 К, давлений 0.1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.);
- Представлена формула для получения расчётных значений динамической вязкости воды и водных растворов солей в интервалах давлений 0.1–100 МПа, температур 333–473 К и концентраций 0–25 % (масс.);
- С помощью полученных новых обобщённых формул представлены таблицы теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей, которые согласуются с экспериментальными данными с разницей в менее 1.6 %.

Практическая значимость.

Водные растворы электролитов широко применяются в энергетических установках на тепловых и атомных электростанциях, установках с использованием солнечной и геотермальной энергий, нефтяной и газовой промышленности. В таких производствах, как производство минеральных удобрений, электрохимические способы получения неорганических соединений металлов электролизом водных растворов, производство соды, широко применяются водные растворы неорганических веществ.

Для эффективного использования водных растворов электролитов в указанных областях техники требуются точные сведения об их теплофизических свойствах, и в частности по теплопроводности и вязкости в широком диапазоне параметров состояния.

Рекомендуемые результаты могут быть использованы при различных инженерных расчетах теплообменных аппаратов, а также при проектировании новых технологических процессов и установок тепло- и атомной энергетики, химической промышленности, гидротермального синтеза кристаллов, гидрометаллургии цветных металлов и разработке математических моделей гидродинамики и т.д.

Результаты исследований, выносимые на защиту:

1. Обобщённая формула для расчёта теплопроводности воды и водных растворов солей в интервалах температур 293–473 К, давлений 0.1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.).
2. Обобщённая формула для расчёта теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем в интервалах температур 293–473 К, давлений 0.1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.).
3. Обобщённая формула для получения расчётных значений динамической вязкости водных растворов солей в интервалах давлений 0.1–100 МПа, температур 333–473 К и концентраций 0–25 % (масс.).

4. Таблицы рекомендуемых справочных данных о теплопроводности и динамической вязкости водно-солевых систем при высоких параметрах состояния.
5. Таблицы рекомендуемых справочных данных о теплопроводности и динамической вязкости воды при высоких параметрах состояния.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются множеством табличных данных, которые с высокой точностью (погрешностью не более 1.6%) и более подробно описывают экспериментальные данные по теплопроводности воды: данные Лоусона и др. при температурах 303–403 К и давлениях 0.1–800 МПа; данные Бриджмена при температурах до 343 К и давлениях до 1200 МПа; данные Диетца и др. при температурах 303–523 К и давлениях 0.1–350 МПа; данные Амирханова Х. И., Магомедова У. Б. при температурах 293–473 К и давлениях 98.2–686.5 МПа; данные Григорьева Б. А. и др. при температурах 260–483 К и давлениях 0.1–201 МПа;

А также, таблиц стандартных справочных данных о динамической вязкости воды до 300 МПа Александрова А. А. – ВНИЦ МВ 1990 г.

Подтверждается экспериментальными табличными данными по теплопроводности и динамической вязкости водно-солевых систем различных авторов.

Личный вклад автора состоит в:

- участия в разработке и создании обобщенных формул;
- составлении табличных данных по теплопроводности и динамической вязкости водно-солевых систем их анализ и систематизация;
- выполнении всего объема исследований по обработке полученных значений с авторитетными экспериментальными данными теплопроводности и динамической вязкости воды и водно-солевых систем;

Планирование исследований, обобщение и обсуждение полученных результатов, подготовка и написание научных публикаций осуществлялись

совместно с научными руководителями Магомедовым Умаханом Багаудиновичем и Алхасовым Алибеком Басировичем

Апробация результатов исследования и публикации. Основные результаты, приведенные в диссертации, докладывались на следующих конференциях и научных школах:

Международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» REENFOR -2013 – победитель конкурса молодых ученых. 2013г., г. Москва

XI Школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. Э. Э. Шпильрайна. 2018г. Махачкала

Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Материалы IV Международной конференции. 2015г., г. Махачкала

Материалы 6-й школы молодых учёных «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». 2013г., Махачкала.

Материалы III Школы молодых ученых – Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. 2010г., Махачкала.

Материалы научно-практической конференции – Ресурсы подземных вод Юга России и меры по их рациональному использованию, охране и воспроизводству. Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2009г., г. Махачкала.

Труды Всероссийской научно-технической конференции – Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты. Даггостехуниверситет (ДГТУ). 2009г., г. Махачкала.

Материалы научно-практической конф. – Геология и нефтегазоносность Юга России. 2008г., г. Махачкала.

Материалы X межд. конф. – В сб.: науч. трудов. «Тепловое поле Земли и методы его изучения». Российский государственный геологоразведочный. 2008г., г. Махачкала.

Материалы научно-практической конф. – Геологические исследования и их некоторые прикладные аспекты. 2007г., г. Махачкала.

Научная конференция – Проблемы физики полупроводников и теплофизики. 2007г., г. Баку.

Основные результаты исследования опубликованы в 24 работах, из которых 15 статей в научных рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 178 страницах и включает введение, главы 3, заключение, список использованных источников из 189 наименований, 90 иллюстрации, 80 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель и основные задачи исследования, отмечены научная новизна, практическое значение работы, перечень решенных в диссертации задач и выносимых на защиту результатов.

В *первой главе* проанализированы и представлены основные имеющиеся литературные данные по теплопроводности воды и водно-солевой системы. Представлена обобщенная формула по теплопроводности воды и водно-солевой системы.

Анализ литературных источников показывает, что теплопроводность в область высоких температур и давлений изучена недостаточно, нет определенной систематизации данных и формулы, которая обобщала бы все табличные данные воедино. Недостаточно исследована также зависимость теплопроводности от концентрации и структуры. Мало экспериментальных данных по теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем.

На основе анализа, имеющихся экспериментальных исследований теплопроводности воды и водных растворов солей, представлены обобщенные формулы для расчета теплопроводности воды и водных растворов солей в

интервалах температур 293-473 К, давлений 0,1-100 МПа и концентраций 0-25 % (масс.):

$$\lambda^{\vartheta}(P, T, c) = \lambda^B(P, T) \left[\left(1,000 - \sum_i A_i (c_i + 2,000 \times 10^{-4} c^3) \right) - 2,000 \times 10^{-8} P T \sum_i c_i \right], \quad (1)$$

где $\lambda_{(P,T)}^B$ – коэффициент теплопроводности воды при P и T ; A_i – коэффициенты, характерные для каждой бинарной системы водных растворов неорганических веществ, определённые из опытных данных по теплопроводности растворов; c_i – концентрация i -ой системы, % (масс.); P – давление, МПа; T – температура, К.

Для чистой воды:

$$\lambda(P, T) = \lambda_B(P_S, T) \left(1,700 \frac{\rho^B(P, T)}{\rho^B(P_S, T)} - 0,700 \right), \quad (2)$$

где P_S – давление насыщения, МПа; $\lambda_B(P_S, T)$ – теплопроводность воды при P_S , T ; $\rho^B(P, T)$ – плотность воды при P и T , кг/м³; $\rho^B(P_S, T)$ – плотность воды при P_S и T , кг/м.

Отклонение расчётных значений теплопроводности воды и водно-солевых систем от данных различных авторов составило менее 1.6 %.

Т а б л и ц а 1 Характерные коэффициенты (a_i) для каждого иона, которые определены Риделем [15].

Анион	a_i	Катион	a_i
OH ⁻	+ 0.0180 ^{3*}	H ⁺	- 0.0078
F ⁻	+ 0.0018 ^{**}	Li ⁺	- 0.0030 ^{**}
Cl ⁻	- 0.0047	Na ⁺	0.0000
Br ⁻	- 0.0150	K ⁺	- 0.0065
Γ	- 0.0236	NH ₄ ⁺	- 0.0100 ^{4*}
NO ₂ ⁻	- 0.0040	Mg ²⁺	- 0.0080
NO ₃ ⁻	- 0.0060	Ca ²⁺	- 0.0005
ClO ₃ ⁻	- 0.0122 [*]	Sr ²⁺	- 0.0034
ClO ₄ ⁻	- 0.0150 [*]	Ba ²⁺	- 0.0066
BrO ₃ ⁻	- 0.0122 [*]	Ag ⁺	- 0.0090 [*]
CO ₃ ²⁻	- 0.0065 ^{3*}	Cu ²⁺	- 0.0140 ^{4*}
SiO ₃ ²⁻	- 0.0080 [*]	Zn ²⁺	- 0.0140 ^{4*}
SO ₃ ²⁻	- 0.0020 [*]	Pb ²⁺	- 0.0080 ^{4*}
SO ₄ ²⁻	+ 0.0010	Co ²⁺	- 0.0100 [*]

$S_2O_3^{2-}$	- 0.0070 ^{3*}	Al^{3+}	- 0.0280 *
CrO_4^{2-}	+ 0.0010 *	Th^{4+}	- 0.0375 *
$Cr_2O_7^{2-}$	- 0.0137 *		

Примечания: * – значение a_i определено на основе экспериментальных данных только по одному раствору и не вполне надёжно; ** – возможны отклонения в области высоких концентраций; ^{3*} – можно применять к концентрациям ниже 1 моль/л; ^{4*} – значение ненадёжное (мало экспериментальных данных).

Т а б л и ц а 2. $A_i \times 10^5$ – коэффициенты, характерные для каждой водно-солевой системы [68].

Система	$A_i \cdot 10^5$	μ [28]	Система	$A_i \cdot 10^5$	μ [28]
AgF + H ₂ O	119	126.866	KI + H ₂ O	380	166.003
KF + H ₂ O	185	58.096	LiI + H ₂ O	417	133.846
KCl + H ₂ O	315	74.551	NaI + H ₂ O	310	149.894
LiCl + H ₂ O	380	42.394	NH ₄ I + H ₂ O	487	144.943
NaCl + H ₂ O	168	58.443	RbI + H ₂ O	317	212.372
RbCl + H ₂ O	229	120.921	BaI ₂ + H ₂ O	289	391.139
BaCl ₂ + H ₂ O	160	208.236	CaI ₂ + H ₂ O	340	293.889
CaCl ₂ + H ₂ O	187	110.986	CoI ₂ + H ₂ O	384	312.813
CdCl ₂ + H ₂ O	170	183.316	MgI ₂ + H ₂ O	417	278.113
CoCl ₂ + H ₂ O	314	129.839	NiI ₂ + H ₂ O	392	312.496
CuCl ₂ + H ₂ O	350	134.452	SrI ₂ + H ₂ O	310	341.425
FeCl ₂ + H ₂ O	280	126.753	ZnI ₂ + H ₂ O	403	319.189
FeCl ₃ + H ₂ O	286	162.206	HNO ₃ + H ₂ O	350	63.012
MgCl ₂ + H ₂ O	384	95.211	AgNO ₃ + H ₂ O	185	169.872
MnCl ₂ + H ₂ O	265	125.844	KNO ₃ + H ₂ O	260	101.102
NiCl ₂ + H ₂ O	330	129.606	LiNO ₃ + H ₂ O	274	68.945
SrCl ₂ + H ₂ O	170	158.526	NaNO ₃ + H ₂ O	148	84.994
ZnCl ₂ + H ₂ O	360	136.286	RbNO ₃ + H ₂ O	206	147.480
NaClO ₃ + H ₂ O	240	106.440	Ca(NO ₃) ₂ + H ₂ O	160	164.087
NaClO ₄ + H ₂ O	250	122.438	Cd(NO ₃) ₂ + H ₂ O	155	236.417
K ₂ CrO ₄ + H ₂ O	130	194.190	Co(NO ₃) ₂ + H ₂ O	252	182.941
Na ₂ CrO ₄ + H ₂ O	-13	161.972	Cu(NO ₃) ₂ + H ₂ O	280	187.553
Na ₂ S ₂ O ₃ + H ₂ O	93	158.110	Mg(NO ₃) ₂ + H ₂ O	283	148.312
KBr + H ₂ O	362	119.002	Ni(NO ₃) ₂ + H ₂ O	255	182.717
LiBr + H ₂ O	410	86.845	Pb(NO ₃) ₂ + H ₂ O	127	331.224
NaBr + H ₂ O	280	102.894	Sr(NO ₃) ₂ + H ₂ O	153	211.627
NH ₄ Br + H ₂ O	514	97.942	Zn(NO ₃) ₂ + H ₂ O	288	189.387
RbBr + H ₂ O	286	165.372	CoSO ₄ + H ₂ O	118	154.989
BaBr ₂ + H ₂ O	244	297.138	CuSO ₄ + H ₂ O	168	159.602
CaBr ₂ + H ₂ O	297	199.888	MgSO ₄ + H ₂ O	122	120.361
CdBr ₂ + H ₂ O	258	272.218	NiSO ₄ + H ₂ O	121	154.756
CoBr ₂ + H ₂ O	364	218.741	ZnSO ₄ + H ₂ O	169	161.436

FeBr ₂ + H ₂ O	350	215.655	Li ₂ SO ₄ + H ₂ O	96	109.938
MgBr ₂ + H ₂ O	410	184.113	(NH ₄) ₂ SO ₄ +H ₂ O	302	132.133
NiBr ₂ + H ₂ O	362	218.496	NaBrO ₃ + H ₂ O	170	150.891
SrBr ₂ + H ₂ O	266	247.428	H ₂ SO ₄ +H ₂ O	290	98.077
ZnBr ₂ + H ₂ O	392	225.210	H ₂ CrO ₄ +H ₂ O	260	118.009

Примечание. $A_i \times 10^5$ – коэффициенты, характерные для каждой бинарной системы водных растворов неорганических веществ представлены здесь и в [45–48, 60–61, 65–66].

Во второй главе проанализированы и представлены основные имеющиеся литературные экспериментальные данные по динамической вязкости воды и водно-солевой системы. Представлена обобщенная формула по динамической вязкости воды и водно-солевой системы.

Анализ литературных источников показывает, что вязкость в области высоких температур и давлений изучена недостаточно, нет определенной систематизации данных и формулы, которая обобщала бы все табличные данные воедино. Динамическая вязкость водно-солевых систем изучена хуже, чем теплопроводность.

На основе анализа, имеющихся экспериментальных исследований динамической вязкости воды и водных растворов солей, представлена обобщенная формула для расчета динамической вязкости воды и водных растворов солей в интервалах температур 293-473 К, давлений 0.1-100 МПа и концентраций 0-25 % (масс.):

$$\eta(P, T, c) = \eta(P_s, T, c) \left[\left(1,700 \frac{\rho^B(P, T)}{\rho^B(P_s, T)} - 0,700 \right) - 2,500 \times 10^{-8} P T c \right] + 1,600 \times 10^{-4} \frac{P T}{P_1 T_1}, \quad (3)$$

где P_s – давление насыщения, МПа; $\eta(P_s, T, c)$ – динамическая вязкость раствора при P_s , T и c ; $\rho^B(P, T)$ – плотность воды при P и T , кг/м³; $\rho^B(P_s, T)$ – плотность воды при P_s и T , кг/м³; P_1 – давление, 1 МПа; T_1 – температура, 1 К;

А для чистой воды ($c=0$) формула примет вид

$$\eta(P, T) = \eta_B(P_S, T) \left(1,700 \frac{\rho^B(P, T)}{\rho^B(P_S, T)} - 0,700 \right) + 1,600 \times 10^{-4} \frac{PT}{P_1 T_1}, \quad (4)$$

где P_S – давление насыщения, МПа; $\eta_B(P_S, T)$ – динамическая вязкость воды при P_S , Т; $\rho^B(P, T)$ – плотность воды при P и T , кг/м³; $\rho^B(P_S, T)$ – плотность воды при P_S и T , кг/м³; P_1 – давление, 1 МПа; T_1 – температура, 1 К;

Третья глава диссертации посвящена обработке и обобщению экспериментальных данных по теплопроводности и динамической вязкости воды и водно-солевых систем по представленным вышеизложенным главам формулам.

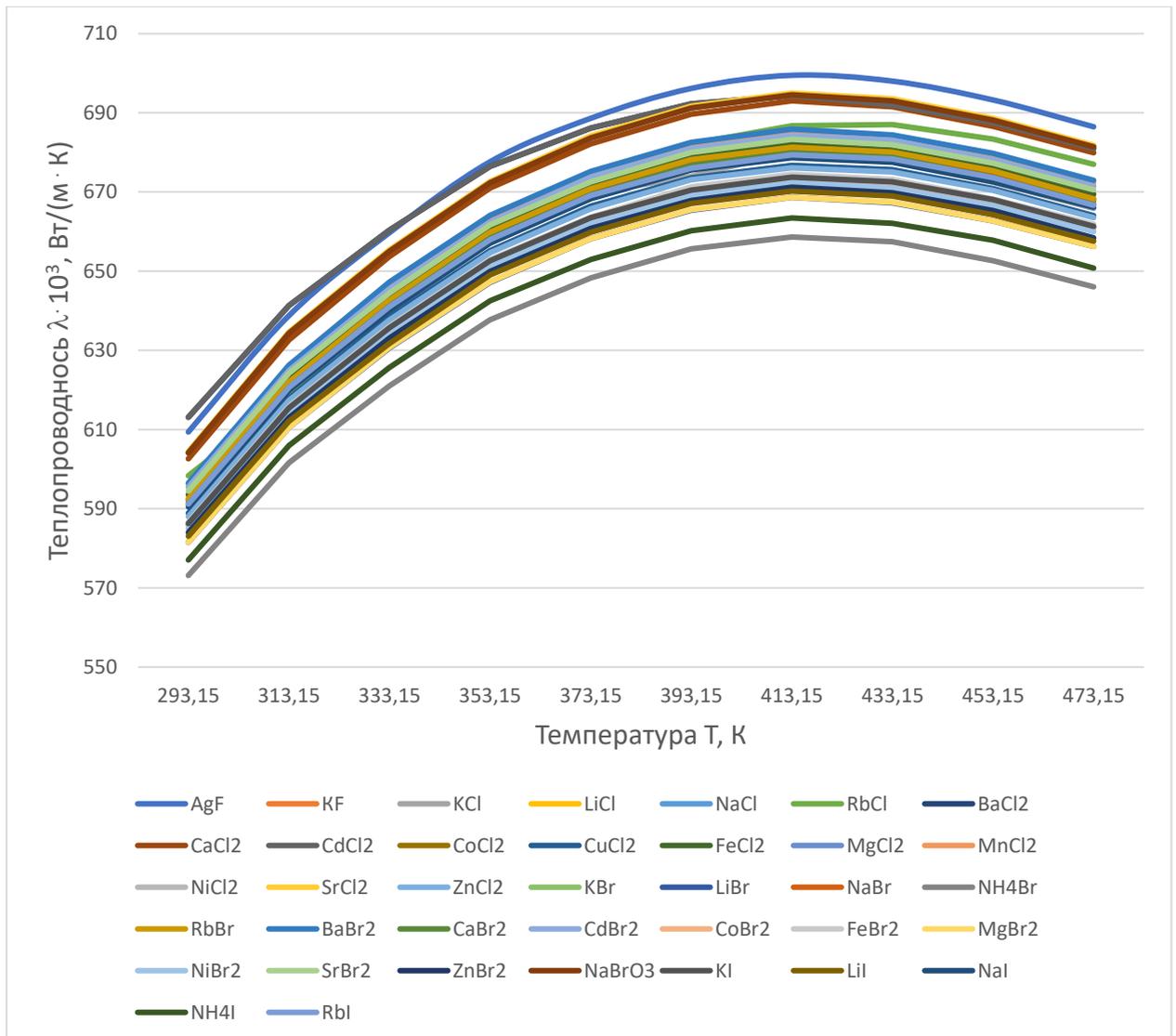


Рис. 1. Теплопроводность некоторых представленных водно-солевых систем при давлениях $P=20$ МПа, $c=15\%$ (масс.)

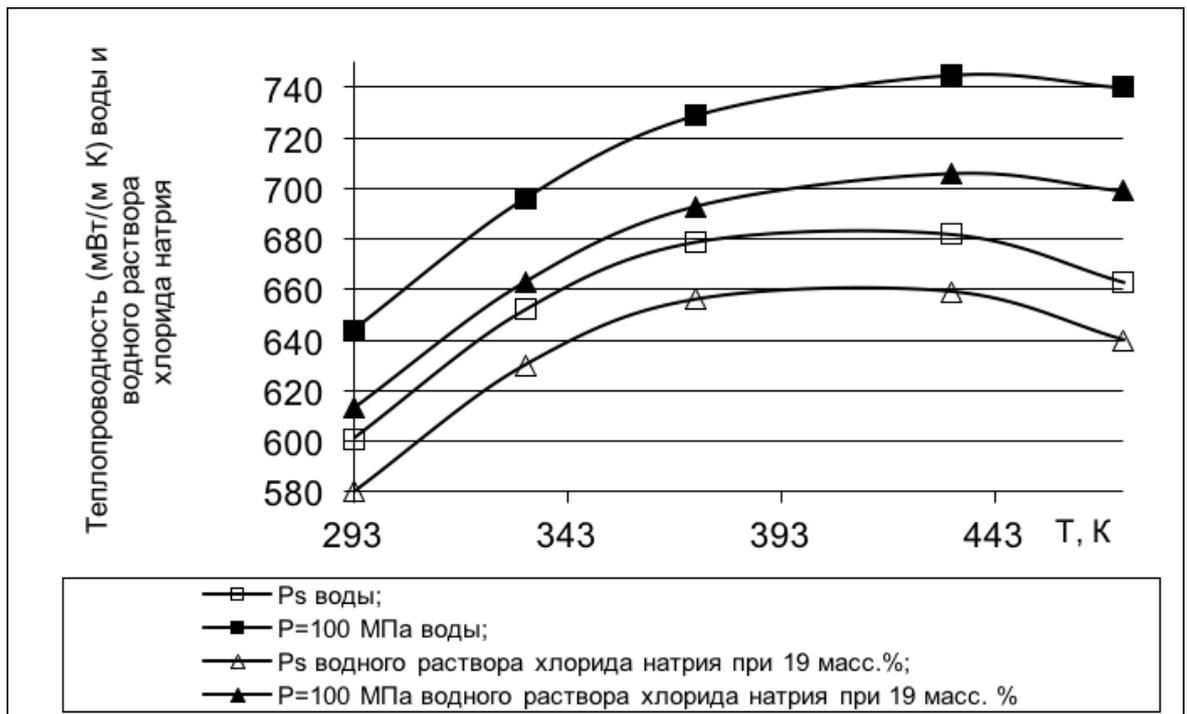


Рис.2. Изобары теплопроводности системы $H_2O+NaCl$ и воды по формуле 1 и 2

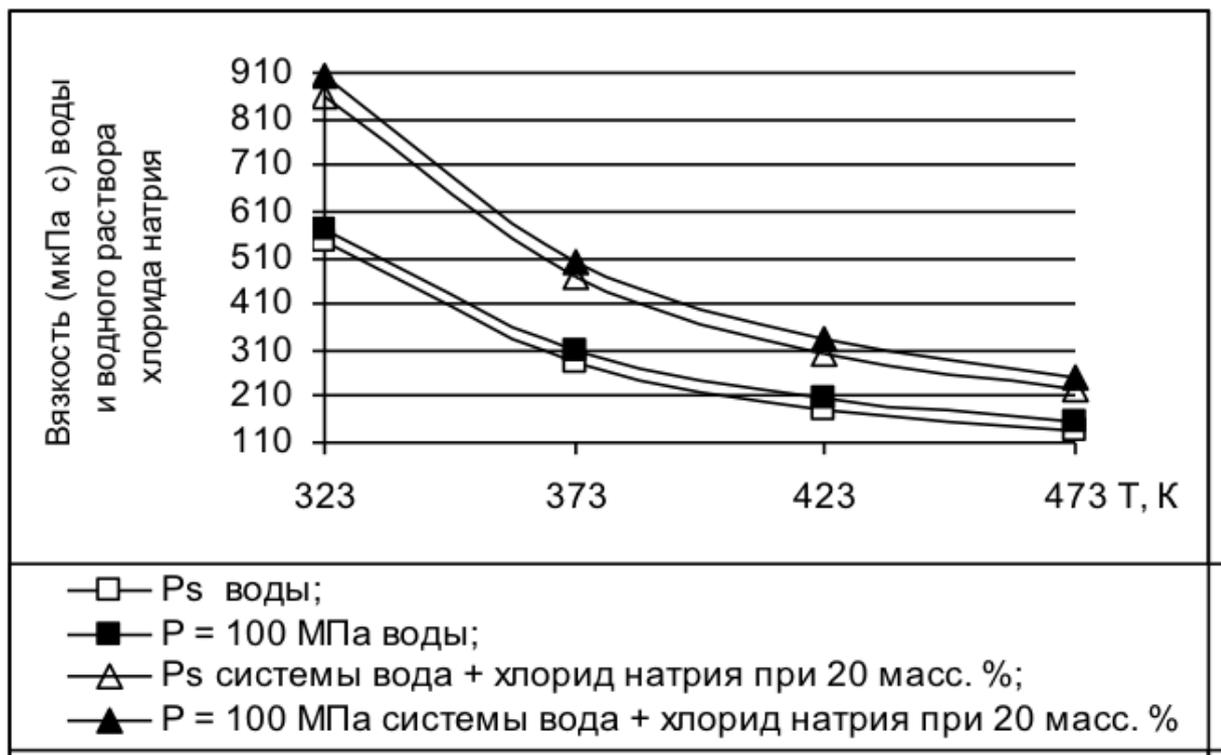


Рис. 3. Изобары вязкости системы $H_2O+NaCl$ по формуле 3 и воды по формуле 4

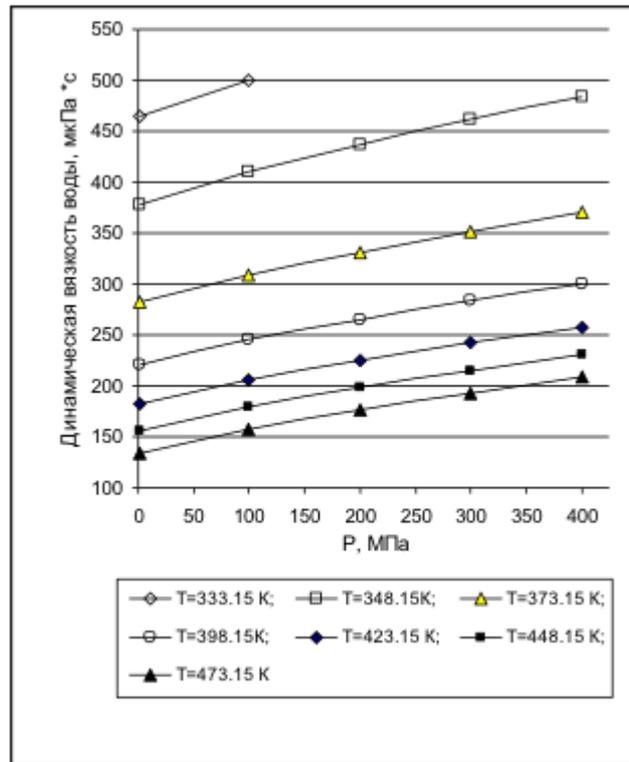


Рис. 4. Изотермы вязкости воды до 400МПа рассчитанной по формуле
4

Приведенные в настоящей работе экспериментальные результаты вновь показали, что свойства растворов электролитов в основном определяется структурой и строением растворителя. Растворение электролита вызывает изменение структуры воды в зависимости от природы растворенных ионов. Структура воды имеет особенно большое значение для изучения свойств воды и водных растворов, связанных с явлением переноса. Это обусловлено тем, что структура определяет условия трансляционного движения жидкости.

Строение водных растворов существенно зависит от природы температуры. С ростом температуры и с возрастанием концентрации растворенного электролита происходит постепенное разрушение водородных связей между молекулами воды, трансляционное и вращательное движения молекул в ней становятся более легкими. В результате структура воды разрушается.

О деталях строения неводных растворителей и их растворов мы знаем значительно меньше, чем о воде. Хотя в последнее время физики уделяют

много внимания их изучению с применением разнообразных методов, но моделирование их структур хотя бы в той степени, как это осуществлено для воды, пока невозможно.

В этой главе диссертации выполнены и представлены в виде таблиц и расчеты теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей в интервалах температур 293-473 К, давлений 0,1-100 МПа и концентраций 0-25 % (масс.)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представлены новые обобщенные формулы для расчета теплопроводности и динамической вязкости воды и водно-солевых систем при высоких параметрах состояния в интервалах температур 293-473 К, давлений 0,1-100 МПа и концентраций 0-25 % (масс.). Оценочная погрешность расчетных значений, которых составляет 1,6 %.

Установлена связь между коэффициентами $\lambda_{\text{в}}$, $\eta_{\text{в}}$, $\eta_{\text{э}}$ и плотностью воды. Важное преимущество такого метода обобщения - то, что плотность исследуемого вещества находится с более высокой точностью и представляет собой менее трудоемкую задачу, чем определение теплопроводности и вязкости на линии насыщения. Представленные в таблице расчётные данные о теплопроводности и динамической вязкости воды и водно-солевых систем согласуются со всеми справочными и экспериментальными данными пределах 1,6 %.

Также, представлена новая обобщенная формула позволяющая вычислить значения теплопроводности многокомпонентных водно-солевых систем в интервалах температур 293-473 К, давлений 0,1-100 МПа и концентраций 0-25 % (масс.). Составлены подробные справочные таблицы, погрешность которых составляет не более 1,6 %.

Получены достоверные справочные таблицы теплопроводности воды и водных растворов фторидов, хлоридов, бромидов, иодидов, нитратов,

сульфатов. А также, расчетные значения при различных концентрациях многокомпонентной водно-солевой системы $\text{NaCl}+\text{MgCl}_2+\text{CaCl}_2+\text{H}_2\text{O}$.

Представлены рекомендуемые справочные данные динамической вязкости воды и водных растворов хлоридов, нитратов, бромидов, иодидов, сульфатов.

Выполненные исследования имеют непосредственное отношение к решению практических задач. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов. Представленные новые обобщенные формулы дают возможность легко определить значения теплопроводности и вязкости воды и водных растворов солей в широком диапазоне температур и давлений. Конечно, при расчетах необходимо знать, какие соли и в каких количествах растворяются без осадков при заданных параметрах.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. **Магомедов У. Б., Алхасов А. Б., Магомедов М. М.-Ш.** Справочник по теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей / Под ред. акад. **В. Е. Фортова.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 224с. – ISBN 978-5-9221-1476-9.
2. **Магомедов У. Б., Магомедов М.-Ш.** Динамическая вязкость обычной и тяжелой воды при высоких параметрах состояния / Научная конференция – Проблемы физики полупроводников и теплофизики. *Vaki * Elm, 2007 // Fizika. 2007. Cild XIII, № 1–2. С. 44–47.*
3. **Магомедов У. Б., Магомедов М. М.-Ш.** Теплопроводность, вязкость воды и водных растворов солей при различных параметрах состояния / Материалы научно-практической конф. – Геологические исследования и их некоторые прикладные аспекты. Выпуск № 51. Изд-во ООО «ДИНЭМ» Института геологии ДНЦ РАН. Махачкала, Россия. 2007. С. 97–102.
4. **Магомедов У.Б., Алиев М.М., Магомедов М. М.-Ш.** Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния. / Материалы X межд. конф. – В сб.: науч. трудов. «Тепловое поле Земли и методы его изучения». Российский государственный геологоразведочный университет. Москва. 2008. С.135–140.
5. **Магомедов У.Б., Магомедов М. М.-Ш.** Вязкость высокоминерализованных вод при высоких температурах, давлениях и концентрациях / Материалы научно-

практической конф. – Геология и нефтегазоносность Юга России. Выпуск № 52. Изд-во ООО «ДИНЭМ» Института геологии ДНЦ РАН. Махачкала, Россия. 2008. С. 185–189.

6. **Магомедов У. Б., Алиев М.М., Магомедов М.М-Ш.** Теплопроводность воды и водных растворов солей при различных температурах, давлениях и концентрациях / Труды Всероссийской научно-технической конференции – Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты. ДГТУ. Махачкала, Россия. 2009. С. 169– 175.
7. **Магомедов У.Б., Магомедов М.М-Ш.** Динамическая вязкость водных растворов неорганических веществ при высоких давлениях, температурах и концентрациях / Материалы научно-практической конференции – Ресурсы подземных вод Юга России и меры по их рациональному использованию, охране и воспроизводству. Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. Выпуск № 55. 2009. С. 175–178.
8. **Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.** Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких давлениях, температурах и концентрациях // Естественные и технические науки. 2009. № 4(42). С. 23–26.
9. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Вязкость воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки 2009. № 6(44). С. 59–63..
10. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2010. № 2(46). С. 104–107.
11. **Магомедов У.Б., Магомедов М.М-Ш.** Теплопроводность водных растворов солей и её зависимость от заряда ядра, массы иона и количества электронов на внешней оболочке иона // Естественные и технические науки. 2010. № 2(46). С. 111–114.
12. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Теплопроводность водных растворов солей и её зависимость от заряда ядра, массы иона и количества электронов на внешней оболочке иона. Часть 2 // Естественные и технические науки. 2010. № 3(47). С. 44– 47.
13. **Магомедов М. М–Ш.** Теплопроводность водных растворов солей вблизи линии насыщения / Материалы III Школы молодых ученых « Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». Махачкала, Россия. 2010. С.139–145.

14. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Теплопроводность водных растворов солей вблизи линии насыщения // *Естественные и технические науки*. 2010. № 4(48). С. 29–32.
15. **Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.** Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния // *Естественные и технические науки*. 2011. № 1(51). С. 23–26.
16. **Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Теплопроводность воды и водных растворов солей // *Естественные и технические науки*. 2011. № 3(53). С.54–56.
17. **Магомедов М. М-Ш.** Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких параметрах состояния / *Материалы IV Школы молодых учёных – «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. чл.-корр. РАН Э.Э. Шпильрайна*. 19–22 сентября 2011 г. Махачкала, Россия. С. 185–191.
18. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Динамическая вязкость водных растворов солей лития // *Естественные и технические науки*. 2012. № 1(57). С. 51–53.
19. **Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.** Теплопроводность водных растворов солей и её зависимость от физических и химических свойств ионов // *Естественные и технические науки*. 2012. № 2(58). С.64–66.
20. **Магомедов У.Б., Алиев М.М., Магомедов М.М–Ш.** Теплопроводность водных растворов солей и её зависимость от массы и количества электронов на внешней оболочке ионов // *Естественные и технические науки*. 2012. № 3(59). С. 51–54.
21. **Магомедов М. М–Ш.** Теплопроводность водных растворов электролитов. *Материалы конф. – V Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. чл.-к. РАН Э. Э. Шпильрайна*. Махачкала, Россия. 2012.С.287–290.
22. **Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Алиев М.М., Магомедов М. М–Ш.** Текучесть водных растворов солей лития // *Естественные и технические науки*. 2013, №.2. С 53–56.
23. **Магомедов М. М–Ш., Магомедов У.Б.** Текучесть водных растворов солей и её зависимость от молекулярной массы растворённых солей // *Естественные и технические науки*. 2013, № 3. С. 32–34.
24. **Магомедов М. М–Ш.** Вязкость и текучесть воды и водных растворов солей при различных параметрах состояний / *Материалы 6-й школы молодых учёных «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов»* 23–26 сентября

2013. Россия, Махачкала. С. Материалы 6-й школы молодых учёных «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» 23–26 сентября 2013. Россия, Махачкала. С. 308–312.

25. **Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Алиев М.М., Магомедов М.М-Ш.** Вязкость различных растворов солей при температурах 323 и 373 К, концентрациях 10 и 20 % масс и давлении 0,1 МПа - применительно к нанотехнологии текучести растворов электролитов // Естественные и технические науки 2014, № 2. С 35–36.
26. **Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш., Алиев М. М.** ТЕКУЧЕСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И СОЛЕЙ ПРИ ОДИНАКОВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДАВЛЕНИЯХ И КОНЦЕНТРАЦИЯХ – МАСС, % ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАНОТЕХНОЛОГИИ ТЕКУЧЕСТИ. // Естественные и технические науки 2014, №8. С. 29-33.
27. **Магомедов М. М-Ш.** Теплопроводность высокоминерализованных вод при высоких параметрах состояния / М. М-Ш. Магомедов // Естественные и технические науки. 2022. № 12(175). – с. 42-46. – DOI 10.25633/ETN.2022.12.01. – EDN DTLNBM.
28. **Магомедов М. М-Ш.** Теплопроводность многокомпонентной водно-солевой системы H₂O+NaBr+KBr при высоких давлениях / М. М-Ш. Магомедов // Естественные и технические науки. – 2023. – № 12(187). – с. 34-37. – DOI 10.25633/ETN.2023.12.05. – EDN GNVEKH.