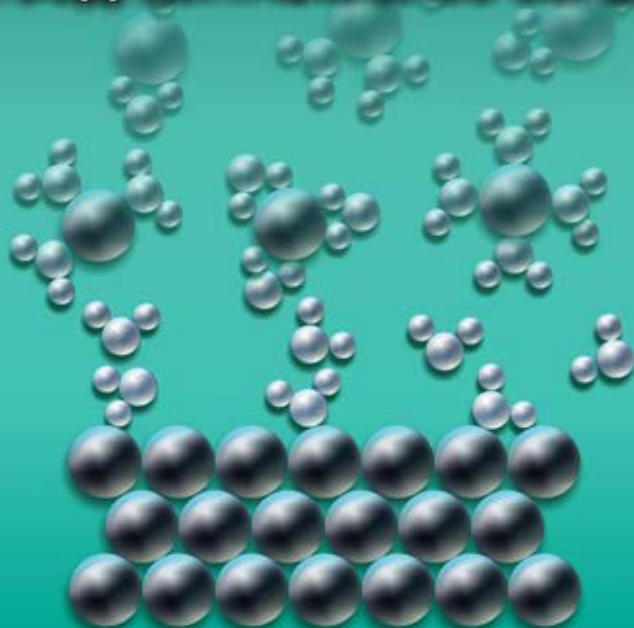


У.Б. МАГОМЕДОВ
А.Б. АЛХАСОВ
М.М.-Ш. МАГОМЕДОВ

СПРАВОЧНИК ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ



У.Б. МАГОМЕДОВ
А.Б. АЛХАСОВ
М.М.-Ш. МАГОМЕДОВ

СПРАВОЧНИК

ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
И ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ
ВОДЫ
И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ

Под редакцией
академика В.Е. ФОРТОВА



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2013

УДК 536.2.223; 541.135
ББК 24.5
М 12



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 13-08-07000,
не подлежит продаже*

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, 2013. — 224 с. — ISBN 978-5-9221-1476-9.

В справочнике представлены новые обобщенные формулы для получения достоверных данных: по теплопроводности воды в интервалах температур 273–473 К и давлений P_s –1000 МПа; по динамической вязкости воды в интервалах температур 333–473 К и давлений P_s –500 МПа; по теплопроводности водных растворов солей в интервалах температур 293–473 К и давлений P_s –100 МПа; по динамической вязкости водных растворов солей в интервалах температур 333–473 К и давлений P_s –100 МПа. Приведены экспериментальные данные различных авторов по теплопроводности воды, выполненные при температурах до 473 К и давлениях выше 100 МПа.

Представлены расчетные данные по теплопроводности водно-солевых систем вблизи линии насыщения и при высоких давлениях, температурах и концентрациях, а также расчетные значения динамической вязкости водных растворов солей при высоких параметрах состояния.

Справочник может быть полезен научным работникам, теплотехникам, теплофизикам, химикам, инженерам, технологам и специалистам, которые имеют дело с водными растворами солей.

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© У. Б. Магомедов, А. Б. Алхасов,
М. М.-Ш. Магомедов, 2013

ISBN 978-5-9221-1476-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
Принятые обозначения	7
Глава 1. Теплопроводность и плотность воды	9
1.1. Экспериментальные данные по плотности воды	9
1.2. Экспериментальные данные по теплопроводности воды	11
1.3. Расчет теплопроводности воды	16
Глава 2. Обобщенные формулы для расчета теплопроводности водно-солевых систем	21
2.1. Расчет теплопроводности водно-солевых систем	21
2.2. Равенство одноименных отношений теплопроводности воды и вод- ных растворов	24
2.3. Расчет теплопроводности воды и водных растворов при различных концентрациях	25
2.4. Расчет теплопроводности многокомпонентных систем	29
Глава 3. Таблицы теплопроводности водных растворов электроли- тов вблизи линии насыщения	31
3.1. Растворы фторидов	31
3.2. Растворы хлоридов и перхлоратов	32
3.3. Растворы хроматов и бромидов	38
3.4. Растворы иодидов	44
3.5. Растворы нитратов	49
3.6. Растворы сульфатов	54
3.7. Растворы кислот	57

Глава 4. Таблицы теплопроводности водных растворов солей при высоких параметрах состояния	59
4.1. Растворы фторидов.	59
4.2. Растворы хлоридов.	63
4.3. Растворы бромидов.	93
4.4. Растворы иодидов	123
4.5. Растворы нитратов	147
4.6. Растворы сульфатов	175
 Глава 5. Динамическая вязкость воды и водных растворов солей при высоких параметрах состояния	 186
5.1. Равенство отношений одноименных теплофизических величин.	186
5.2. Обобщенная формула для расчета вязкости водных растворов электролитов.	188
5.3. Расчет вязкости воды	189
 Заключение	 200
Указатель ионных систем	201
Список литературы	203
Приложение. Таблицы пересчета концентрации растворов	218

Предисловие

Развитие геотермальной энергетики вызвало необходимость иметь достоверные справочные данные по теплофизическим свойствам геотермальных вод, а именно по коэффициенту теплопроводности и вязкости водных растворов солей при температурах 293–473 К, давлениях P_s –100 МПа и концентрациях 0–25 % (масс.). Экспериментальные данные по теплопроводности и динамической вязкости при высоких параметрах до последнего времени были ограничены и разбросаны по малодоступным источникам. Так, для динамической вязкости водных растворов солей отсутствовали экспериментальные данные выше давления 40 МПа, нет обобщенных формул для получения достоверных данных о динамической вязкости водных растворов солей до 100 МПа.

Авторы справочника собрали и обобщили огромный существующий материал по теплопроводности и динамической вязкости водных растворов солей, изданных как в России, так и зарубежом. Авторами получены обобщенные формулы для получения достоверных данных по теплопроводности воды в интервалах давлений P_s –1000 МПа, температур 293–473 К и теплопроводности водных растворов солей в интервалах давлений P_s –100 МПа, температур 293–473 К и концентраций 0–25 % (масс.), а также получены обобщенные формулы для динамической вязкости воды до давлений 500 МПа и водных растворов солей в интервалах давлений P_s –100 МПа, температур 333–473 К и концентраций 0–25 %.

С помощью полученных новых обобщенных формул рассчитаны значения коэффициентов теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей, которые согласуются с экспериментальными данными в пределах 1,6 %. Результаты этих расчетов представлены в таблицах. Предлагаемый справочник окажется полезным для широкого круга ученых-энергетиков, а также для студентов, аспирантов и молодых специалистов, интересующихся проблемами современной энергетики.

Академик В. Е. Фортков

Введение

В 1999 г. издан справочник А. А. Александрова и Б. А. Григорьева по свойствам воды и водяного пара. Данные по теплофизическим свойствам воды и водяного пара, вычисляемые по принятым МАСВП уравнениям, являются международным промышленным стандартом с 1999 г. и охватывают область давлений до 100 МПа. Мы же в справочнике представили экспериментальные работы по теплопроводности воды, выполненные различными авторами в разные годы при давлениях выше 100 МПа. Так, в справочник включены экспериментальные данные по теплопроводности воды: рекомендуемые справочные данные У. Б. Магомедова и др. при температурах 298–473 К и давлениях 100–400 МПа; 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, Магомедова при температурах 293–473 К и давлениях 98,2–686,5 МПа; данные Григорьева и др. при температурах 260–483 К и давлениях 0,1–201 МПа; Таблицы стандартных справочных данных по динамической вязкости воды до 300 МПа Александрова — ВНИЦ МВ, 1990 г.; Международные данные по удельному объему воды и водяного пара при температурах 273–1073 К и давлениях 0,1–1000 МПа.

Информация о теплофизических свойствах воды и водных растворов солей необходима в расчетах при конструировании теплообменных аппаратов для геотермальной энергетики, при выщелачивании ценных компонентов из рудного сырья, 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.

Авторы выражают глубокую благодарность за ценные замечания и рекомендации заведующему лабораторией баз данных ОИВТ РАН Зицерману Владимиру Юрьевичу.

Принятые обозначения

P — давление, МПа;

P_s — давление насыщения, МПа;

P_1 — давление, 1 МПа; T_1 — температура, 1 К;

T — температура, К;

η — коэффициент динамической вязкости, мкПа·с;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\lambda_v(T)$ — коэффициент теплопроводности воды при температуре T ;

$\lambda_v(P, T)$ — коэффициент теплопроводности воды при P и T ;

$\lambda_v(P_s, T)$ — коэффициент теплопроводности воды при P_s и T ;

$\lambda_v(T = 293)$ — коэффициент теплопроводности воды при температуре 293 К;

$\rho_v(P, T)$ — плотность воды при P и T , кг/м³;

$\rho_v(P_s, T)$ — плотность воды при P_s и T , кг/м³;

$\lambda_3(N, T = 293)$ — коэффициент теплопроводности водного раствора электролита при концентрации N и температуре 293 К;

$\lambda_3(N, T)$ — коэффициент теплопроводности водного раствора электролита при концентрации N и температуре T ;

$\lambda_3(P_s, N, T)$ — коэффициент теплопроводности водного раствора электролита при P_s , концентрации N и температуре T ;

N — молярная концентрация водного раствора электролита, моль/дм³;

$N = 10\rho c/\mu$;

ρ — плотность электролита, г/дм³;

c — концентрация, % (масс.) — (г безводного вещества/100 г раствора) $\times 100$ %;

μ — молярная масса вещества, г/моль;

c_i — концентрация i -й системы, % (масс.);

$\lambda_3(c, T = 293)$ — коэффициент теплопроводности водного раствора электролита при температуре 293 К и концентрации c , % (масс.);

$\lambda_3(P_s, c, T)$ — коэффициент теплопроводности водного раствора электролита вблизи линии насыщения при P_s , концентрации c и температуре T ;

a_i — коэффициенты, характерные для каждого иона, определенные из опытных данных по теплопроводности раствора (a_i для большинства водно-солевых систем имеют отрицательные значения);

A_i — коэффициенты, характерные для каждой бинарной системы водных растворов неорганических веществ, определенные из опытных данных по теплопроводности растворов;

$\eta(P, T)$ — динамическая вязкость воды при P и T ;

$\eta(P_s, T)$ — динамическая вязкость воды при P_s и T ;

$\eta_3(P, T, c)$ — динамическая вязкость водного раствора электролита при P , T и c ;

$\eta_3(P_s, T, c)$ — динамическая вязкость водного раствора электролита при P_s , T и c .

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ

1.1. Экспериментальные данные по плотности воды

Таблица 1. Плотность воды [2] в интервалах давлений 0,1–1000 МПа и температур 273,15–473,15 К

P , МПа	Плотность воды, кг/м ³ при T , К								
	273,15	298,15	323,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15	473,15
P_s	999,8	997,0	988,0	974,8	958,3	939,1	917,0	892,3	864,7
10	1004,8	1001,4	992,3	979,2	962,9	943,9	922,4	898,1	871,0
20	1009,7	1005,7	996,5	983,5	967,4	948,8	927,7	904,1	878,0
40	1019,3	1014,3	1004,7	991,8	976,1	958,0	937,8	915,4	890,9
60	1028,3	1022,5	1012,6	999,7	984,3	966,8	947,4	925,9	902,8
80	1037,0	1030,3	1020,2	1007,3	992,3	975,1	956,4	936,3	913,7
100	1045,3	1037,9	1027,4	1014,6	999,8	983,1	964,9	945,0	923,7
120	1053,3	1045,2	1034,6	1021,8	1007,1	990,8	973,0	954,0	933,6
140	1060,9	1052,3	1041,4	1028,6	1014,0	998,1	980,8	962,3	942,6
160	1068,1	1059,1	1048,0	1035,2	1020,8	1005,1	988,2	970,2	951,0
180	1075,2	1065,5	1054,3	1041,6	1027,4	1011,8	995,2	977,7	959,1
200	1081,8	1071,8	1060,5	1047,8	1033,7	1018,3	1002,1	984,9	966,9
220	1088,3	1077,9	1066,6	1053,7	1039,7	1024,7	1008,8	992,1	974,6
240	1094,5	1083,9	1072,4	1059,7	1045,7	1030,9	1015,2	998,9	981,7
260	1100,4	1089,7	1078,1	1065,3	1051,5	1036,8	1021,5	1005,3	988,5
280	1106,2	1095,3	1083,7	1070,8	1057,1	1042,6	1027,4	1011,5	995,0
300	1111	1100,7	1089,0	1076,2	1062,6	1048,2	1033,3	1017,5	1001,2
320	1117	1106	1094	1082	1068	1054	1039	1023	1007
340	1122	1111	1100	1087	1073	1059	1044	1029	1013
360	1127	1116	1104	1092	1078	1064	1050	1035	1019
380	1133	1121	1110	1097	1083	1069	1055	1040	1024
400	1137	1126	1114	1102	1088	1074	1060	1046	1030
450	1148	1138	1126	1113	1100	1086	1073	1058	1044

Продолжение табл. 1

P, МПа	Плотность воды, кг/м ³ при T, К								
	273,15	298,15	323,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15	473,15
P_s	999,8	997,0	988,0	974,8	958,3	939,1	917,0	892,3	864,7
500	1159	1149	1137	1124	1111	1098	1084	1071	1056
550	1170	1160	1147	1135	1122	1109	1096	1082	1068
600	1180	1171	1158	1145	1132	1119	1106	1093	1080
650	1190	1181	1167	1154	1142	1129	1116	1104	1091
700		1191	1177	1163	1151	1139	1126	1114	1101
750		1201	1186	1172	1160	1148	1136	1123	1110
800		1210	1194	1181	1169	1157	1145	1133	1120
850		1220	1203	1189	1178	1166	1155	1142	1129
900		1228	1212	1198	1186	1174	1163	1151	1138
950			1220	1205	1193	1182	1171	1159	1147
1000			1227	1212	1200	1189	1178	1167	1155

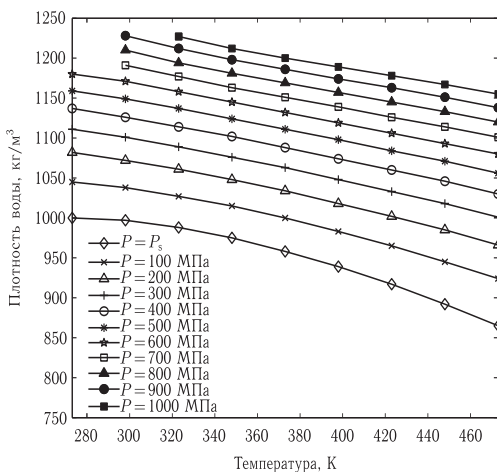


Рис. 1. Изобары плотности воды по данным [2]

1.2. Экспериментальные данные по теплопроводности воды

Таблица 2. Критически оцененные экспериментальные значения теплопроводности воды [1]

T, К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P, МПа					
	P_s	20	40	60	80	100
273,15	563	574	583	590	599	609
298,15	610	619	626	635	645	650
323,15	643	653	662	670	677	686
348,15	664	676	686	697	707	716
373,15	679	691	702	713	723	735
423,15	686	703	717	729	739	749
473,15	664	684	700	715	729	742

Примечание. Оценочная погрешность составляет менее 2%.

Таблица 3. Экспериментальные значения теплопроводности воды в состоянии насыщения [1]

P_s , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T, К					
	273,15	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15
0,1–0,6	565	602	631	652	669	679
0,1–0,6	393,15	413,15	433,15	453,15	473,15	
	685	686	682	674	664	

Примечание. Оценочная погрешность составляет 1%.

Таблица 4. Экспериментальные данные по теплопроводности воды Лоусона и др. [3]

P, МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T, К					
	303,15	323,15	343,15	363,15	383,15	403,15
P_s	611	636	653	665	678	
98,2	649	678	699	720	732	745
245,3	707	736	761	782	799	816
392,3	753	787	812	833	858	879
588,4	808	841	866	891	912	933
784,8	854	887	921	946	967	987

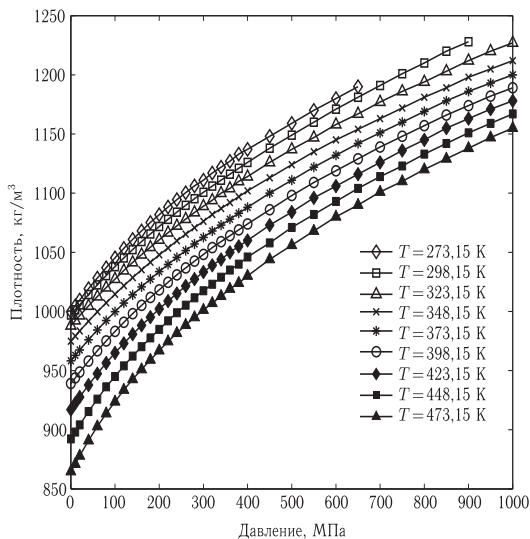


Рис. 2. Изотермы плотности воды по данным [2]

Таблица 5. Данные Лоусона

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К				
	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15
P_s	625	645	660	673	
50	645	667	685	700	712
100	665	690	710	726	740
150	685	711	734	750	764
200	705	730	754	773	787
250	722	750	775	793	810
300	740	768	792	814	832
350	759	788	810	830	852
400	774	804	829	850	870
450	788	818	842	864	885

Продолжение табл. 5

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К				
	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15
500	804	834	857	880	900
550	815	846	870	892	913
600	830	860	885	907	927
650	840	870	898	921	941
700	853	884	910	935	955
750	864	896	915	948	867

Примечание. Оценочные погрешности табл. 4 и 5 составляют 2,5 %.

Таблица 6. Скорректированные Лоусоном [3] данные Бриджмена [4] по теплопроводности воды

T , К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P , МПа			
	100	200	300	400
298,15	651	686	718	750
323,15	681	717	752	786
348,15	712	750	787	822

Таблица 7. Экспериментальные данные Диецца и др. [5] по теплопроводности воды

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К					
	303,15	323,15	373,15	423,15	473,15	523,15
P_s	610,3	600,5	678,2	683,7	663,3	616,7
20	621,4	611,5	689,8	697,3	679,5	637,4
50	637,1	665,4	706,1	716,5	703,9	670,8
100	661,6	689,3	730,9	744,9	738,1	714,3
150	683,7	711,0	753,5	769,7	767,2	749,4
200	704,1	731,0	773,9	792,1	792,5	779,1
250	723,1	749,5	792,8	812,4	815,1	805,1
300	740,7	766,9	810,5	831,2	834,8	826,4
350	757,4	783,1	826,9	848,6	854,5	849,3

Примечание. Оценочная погрешность данных составляет 2 %.

Таблица 8. Экспериментальные данные Амирханова и др. [6]
по теплопроводности воды

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К							
	303,2	323,2	353,4	373,1	403,0	423,3	453,4	473,2
98,2	657	983	715	733	747	750	748	742
147,2	676	702	737	754	771	780	780	778
196,2	690	720	753	771	793	804	818	820
245,3	706	740	773	792	816	828	840	850
294,2	725	754	788	810	833	848	858	868
343,2	738	768	808	828	851	864	880	888
441,3	767	795	834	855	885	899	923	932
490,3	778	816	847	877	898	912	930	942
539,4	790	824	862	886	910	925	945	955
588,4	800	836	875	903	925	938	958	969
637,4	812	845	886	912	937	951	970	982
686,5	824	858	896	924	948	964	982	996

Примечание. Оценочная погрешность составляет 2,6 %.

Таблица 9. Экспериментальные данные Григорьева и др. [7]
по теплопроводности воды

$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P , МПа и T_{cp} , К							
$T_{cp} = 297,05$		$T_{cp} = 316,15$		$T_{cp} = 334,15$		$T_{cp} = 353,15$	
P	λ	P	λ	P	λ	P	λ
0,1	602	0,1	628	0,1	651	0,1	666
39,2	619	39,2	647	39,0	668	39,0	686
79,4	637	79,0	667	79,0	687	79,0	706
117,7	657	118,0	683	118,0	706	118,0	725
161,0	680	160,0	702	160,0	721	161,0	743
201,0	695	201,0	716	201,0	740	201,0	759
$T_{cp} = 371,15$		$T_{cp} = 393,15$		$T_{cp} = 413,15$		$T_{cp} = 433,15$	
P	λ	P	λ	P	λ	P	λ
0,2	677	0,4	685	0,6	687	0,9	685
39,0	699	39,0	707	39,0	710	39,0	710
79,0	719	78,5	727	79,0	734	79,0	736
118,0	739	118,0	750	118,0	757	118,0	759
161,0	758	160,0	772	161,0	779	160,0	782
201,0	773	201,0	788	201,0	798	201,0	800

Продолжение табл. 9

$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P , МПа и $T_{\text{ср}}$, К							
$T_{\text{ср}} = 453,15$				$T_{\text{ср}} = 473,15$			
P	λ	P	λ	P	λ	P	λ
1,3	677	118,0	759	1,7	664	118,0	754
39,0	706	160,0	784	39,0	697	161,0	779
79,0	732	201,0	802	79,0	726	201,0	799

Примечание. $T_{\text{ср}}$ — средняя температура изотермы. Оценочная погрешность данных составляет 1,7%.

Таблица 10. Рекомендуемые справочные данные по теплопроводности воды при давлениях до 400 МПа [8]

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К							
	298,1	323,1	348,1	373,1	398,1	423,1	448,1	473,1
100	650	685	710	732	745	753	753	744
150	670	705	730	755	768	777	785	780
200	688	725	750	776	792	804	810	810
250	704	741	768	793	814	826	836	840
300	721	757	785	812	832	846	856	861
350	735	771	802	829	850	864	877	883
400	750	787	818	846	866	882	895	903

Примечание. Авторская оценочная погрешность составляет 2,3%.

Таблица 11. Данные Григорьева и др. [7, 9] по теплопроводности воды

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К						
	273,15	313,15	353,15	393,15	433,15	473,15	493,15
P_s	568	626	665	684	684	665	648
20	578	636	676	696	698	681	665
40	588	646	686	708	712	697	683
60	597	655	696	719	725	722	700
80	606	664	705	730	737	727	715
100	615	672	715	740	749	741	730
120	624	680	724	750	760	754	745
140	632	689	732	760	771	767	758
160	640	696	741	769	782	779	772
180	647	704	749	779	792	791	785
200	655	712	757	787	802	802	797
220	662	719	765	696	812	813	809

Примечание. Авторская оценочная погрешность данных составляет 1,7%.

1.3. Расчет теплопроводности воды [77, 82]

На основе анализа данных по теплопроводности [1–9] и плотности [2, 10] обычной воды получено уравнение, которое связывает коэффициент теплопроводности воды с плотностью при высоких давлениях и температурах до 473 К:

$$\lambda(P, T) = \lambda(P_s, T) \left[1,700 \frac{\rho(P, T)}{\rho(P_s, T)} - 0,7000 \right]. \quad (1)$$

При составлении табл. 12 по формуле (1) использованы значения теплопроводности воды вблизи линии насыщения из [1], а данные о плотности воды взяты из [13].

Таблица 12. Значения теплопроводности воды, рассчитанные по формуле (1) до 100 МПа

T, К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P, МПа					
	P_s	20	40	60	80	100
273,15	565	574	584	592	601	609
293,15	601	610	619	627	636	644
313,15	631	640	649	658	666	674
333,15	652	662	670	679	688	696
353,15	669	679	689	698	707	716
373,15	679	690	701	710	720	729
393,15	685	697	708	719	729	738
413,15	686	699	711	723	734	744
433,15	682	696	710	722	735	745
453,15	674	690	705	718	731	743
473,15	663	680	697	713	727	740

Таблица 13. Значения теплопроводности воды, рассчитанные по формуле (1) до 1000 МПа

P, МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T, К								
	273	298	323	348	373	398	423	448	473
P_s	564	610	643	664	679	686	685	675	663
20	573	619	653	674	690	698	699	690	680
40	583	628	662	684	701	709	712	705	697
60	591	636	670	693	710	720	723	718	713

Важное преимущество такого метода обобщения заключается в том, что плотность исследуемого вещества находится с более высокой точ-

Продолжение табл. 13

P , МПа	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при T , К								
	273	298	323	348	373	398	423	448	473
P_s	564	610	643	664	679	686	685	675	663
80	600	645	678	702	720	731	735	732	727
100	608	653	687	710	729	741	746	744	740
120	615	660	695	718	738	750	756	754	753
140	623	668	702	726	746	759	766	765	764
160	629	675	709	734	754	768	775	775	776
180	636	681	716	741	762	777	784	785	786
200	643	688	723	748	770	785	793	795	796
220	649	694	730	755	777	793	802	803	806
240	655	700	736	762	784	800	810	812	815
260	660	706	743	769	791	807	818	820	824
280	666	712	749	775	798	814	825	828	833
300	671	718	755	781	804	821	832	836	841
320	676	723	761	788	811	828	840	843	848
340	681	728	767	794	817	835	846	851	856
360	686	734	772	800	823	841	853	858	864
380	692	739	778	806	829	847	860	865	871
400	697	744	782	811	835	853	867	873	879
450	706	757	796	824	850	868	883	889	896
500	717	768	808	837	863	883	897	905	912
550	727	779	819	849	876	897	912	920	928
600	736	791	831	861	888	909	925	935	944
650	744	801	841	872	900	922	938	947	957
700		812	852	882	911	934	950	961	971
750		822	862	892	922	945	962	972	983
800		832	871	903	934	957	974	985	996
850		841	881	912	944	968	986	996	1007
900		850	891	922	953	978	997	1008	1019
950			900	931	962	988	1008	1018	1031
1000			908	940	970	996	1016	1029	1041

Примечание. Представленные в табл. 13 данные по теплопроводности воды, рассчитанные по формуле (1), согласуются с рекомендуемыми международными данными [1] в пределах 1%, с экспериментальными данными [4, 5, 7] — в пределах 1,7% и с экспериментальными данными [3, 6, 8] — в пределах 2,5%. Оценочная погрешность расчетных данных табл. 13 при температурах 273–473 К и давлениях 0,1–1000 МПа составляет 2,5%.

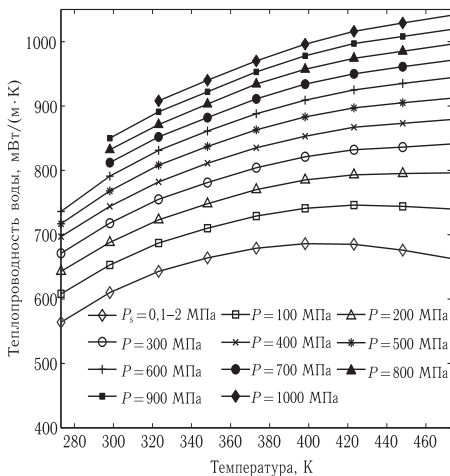


Рис. 3. Изобары теплопроводности воды, рассчитанной по формуле (1)

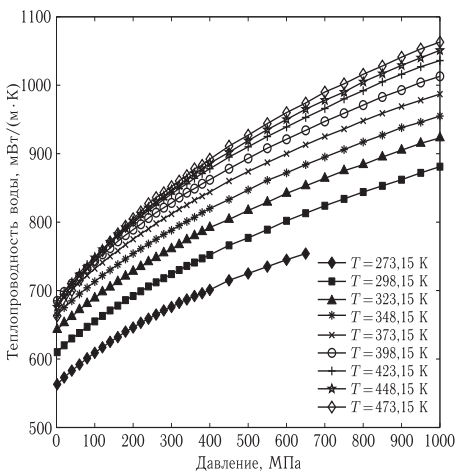


Рис. 4. Изотермы теплопроводности воды, рассчитанной по формуле (1)

ностью и представляет собой менее трудоемкую задачу, чем определение коэффициента теплопроводности.

Рассчитанные по формуле (1) значения теплопроводности согласуются с международными данными [1] и с рекомендуемыми справочными данными [13] в пределах 1%. Значения теплопроводности воды, полученные по формуле (1), в дальнейшем будут использованы в расчетах при составлении таблиц теплопроводности водных растворов неорганических веществ при температурах 293–473 К, давлениях 0,1–100 МПа и концентрациях 0–25 % (масс.).

В 1999 г. издан справочник А. А. Александрова и Б. А. Григорьева по свойствам воды и водяного пара [13], в котором приведены таблицы значений удельного объема, изобарной теплоемкости, скорости звука, динамической вязкости, теплопроводности и других свойств воды и водяного пара, рассчитанных по уравнениям, рекомендованным Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВП) для применения в промышленных расчетах с 1 января 1999 г. Таблицы

Таблица 14. Плотность воды на линии насыщения [13]

t , °C	T , К	P , МПа	ρ' , кг/м ³	ρ'' , кг/м ³
0	273,15	0,0006	999,800	0,005
20	293,15	0,0023	998,203	0,017
40	313,15	0,0074	992,162	0,051
60	333,15	0,0200	983,187	0,138
80	353,15	0,0474	971,817	0,294
100	373,15	0,1014	958,313	0,598
120	393,15	0,1987	943,129	1,122
140	413,15	0,3615	926,097	1,966
160	433,15	0,6181	907,441	3,259
180	453,15	1,0026	886,997	5,158
200	473,15	1,5547	864,678	7,860
220	493,15	2,3193	840,195	11,614
240	513,15	3,3467	813,339	16,748
260	533,15	4,6921	783,638	23,708
280	553,15	6,4165	750,300	33,167
300	573,15	8,5877	712,149	46,168
320	593,15	11,284	667,067	64,599
340	613,15	14,600	610,687	92,764
360	633,15	18,667	527,844	143,968
365	638,15	19,822	496,130	166,500
370	643,15	21,043	450,045	202,143
373,95	647,1	22,064	321,956	321,958

охватывают область параметров до температуры 800 °С и давления 100 МПа. Данные по теплофизическим свойствам воды и водяного пара, вычисляемые по принятым МАСВП уравнениям, являются международным промышленным стандартом.

Таблица 15. Справочные данные А. А. Александрова и Б. А. Григорьева по теплопроводности воды [13]

T, К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К) при P, МПа					
	P_s	20	40	60	80	100
273,15	562,0	573,6	584,8	595,6	606,0	616,0
293,15	599,5	610,1	620,4	630,3	639,9	649,1
313,15	628,5	638,8	648,6	658,2	667,4	676,3
333,15	650,7	660,9	670,8	680,2	689,3	698,1
353,15	666,9	677,4	687,4	697,0	706,2	715,1
373,15	677,7	688,6	699,0	708,9	718,4	727,5
393,15	683,6	695,1	706,0	716,4	726,3	735,7
413,15	684,8	697,1	708,8	719,8	730,2	740,2
433,15	681,8	695,0	707,6	719,4	730,5	741,0
453,15	674,6	688,9	702,6	715,4	727,4	738,6
473,15	663,3	678,9	694,2	708,1	721,1	733,2

Таблица 16. Относительные значения части формулы (1)

$$1,700 \frac{\rho(P, T)}{\rho(P_s, T)} - 0,7000$$

T, К	при давлении P, МПа					
	P_s	20	40	60	80	100
273,15	1,000	1,017	1,033	1,048	1,063	1,077
293,15	1,000	1,015	1,030	1,044	1,058	1,071
313,15	1,000	1,014	1,029	1,043	1,056	1,068
333,15	1,000	1,015	1,028	1,042	1,056	1,068
353,15	1,000	1,015	1,030	1,044	1,057	1,070
373,15	1,000	1,016	1,032	1,046	1,060	1,074
393,15	1,000	1,017	1,034	1,049	1,064	1,078
413,15	1,000	1,019	1,037	1,054	1,070	1,085
433,15	1,000	1,021	1,041	1,059	1,077	1,093
453,15	1,000	1,023	1,046	1,066	1,085	1,103
473,15	1,000	1,026	1,052	1,075	1,096	1,116

Примечания. 1. P_s — давление на линии насыщения чистой воды, которое при температуре 473 К достигает 1,555 МПа, а вблизи линии насыщения (при эксперименте по теплопроводности) оно должно быть не менее 2 МПа.

2. При составлении табл. 16 использованы данные по плотности воды [13].

Глава 2

ОБОБЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНО-СОЛЕВЫХ СИСТЕМ

2.1. Расчет теплопроводности водно-солевых систем

На основе имеющегося и вновь полученного материала разработаны новые обобщенные формулы, которые позволяют прогнозировать кинетические свойства воды и водных растворов солей в неисследованных областях при различных параметрах состояния.

Для водных растворов бинарных и многокомпонентных неорганических веществ Ридель [14, 15] предложил формулу для определения коэффициента теплопроводности водных растворов солей, кислот и щелочей при температуре 293 К без коэффициента 1,163 — для измерения теплопроводности в ккал/(м·ч·град), а мы ввели коэффициент 1,163 для измерения коэффициента теплопроводности в Вт/(м·К):

$$\lambda_3(N, T = 293) = \lambda_b(T = 293) + 1,163 \sum_i a_i N_i, \quad (2)$$

где 1,163 — коэффициент перевода единицы измерения теплопроводности из ккал/(м·ч·град) в Вт/(м·К). Характерные коэффициенты a_i приведены в [14, 15], а здесь они представлены в табл. 17.

Таблица 17. 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
I^-	-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 [*]