

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ОБЫЧНОЙ И ТЯЖЁЛОЙ ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ

**У.Б. МАГОМЕДОВ**

*Институт проблем геотермии ДНЦ РАН  
г. Махачкала, просп. Шамиля, 39а*

Представлены формулы и расчетные значения теплопроводности обычной и тяжелой воды при высоких параметрах состояния

The formulas and calculated values of a thermal conductivity usual and heavy water are represented at high parameters of state

### ОБЫЧНАЯ ВОДА (H<sub>2</sub>O)

При конструировании в энергетике теплообменных аппаратов и другого оборудования, где определяющим являются процессы переноса тепла и массы, требуется информация о теплофизических свойствах рабочего тела и, в первую очередь, данные о коэффициентах переноса (кинетических коэффициентах, транспортных свойствах), в частности о коэффициентах теплопроводности и динамической вязкости жидкостей и газов. Коэффициенты переноса присутствуют практически во всех уравнениях гидродинамики и конвективного теплообмена.

Для обычной воды существуют Международные данные о теплопроводности воды и водяного пара при температурах 0–800<sup>0</sup>С и давлениях 0,1–100 МПа [1], рекомендуемые справочные данные о теплопроводности воды при температурах 25–200<sup>0</sup>С и давлениях 100–400 МПа [2], экспериментальные данные Лавсона, Ловезелла и Жейна при температурах 30–130<sup>0</sup>С и давлениях 0,1–800 МПа [3], экспериментальные данные Бриджмена при температурах до 70<sup>0</sup>С и давлениях до 1200 МПа [4], экспериментальные данные Диегца, Гроота и Франка при температурах 30–250<sup>0</sup>С и давлениях 0,1–350 МПа [5], экспериментальные данные теплопроводности воды Амирханова, Адамова и Магомедова при давлениях 98,2–686,5 МПа и температурах 20–200<sup>0</sup>С [6], экспериментальные данные теплопроводности воды Григорьева, Ганиева, Сафронова и др. при температурах (-14–210<sup>0</sup>С) и давлениях 0,1–210 МПа [7], а также Международные данные удельного объема воды и водяного пара при температурах 0–800<sup>0</sup>С и давлениях 0,1–1000 МПа [8], данные удельного объема воды Юза, Сифнера и Мареса до 20 ГПа [9], данные удельного объема воды до 25 ГПа [10].

На основе анализа данных о теплопроводности [1–7] и плотности [8–10] получено уравнение (1), которое связывает коэффициент теплопроводности воды с плотностью при высоких давлениях и температурах до 473 К.

$$\lambda_{(P,T)} = \lambda_{(P_s,T)} \left[ 1,800 \frac{\rho_{(P,T)}}{\rho_{(P_s,T)}} - 0,8000 \right], \quad (1)$$

где  $\lambda_{(P,T)}$  и  $\rho_{(P,T)}$  – соответственно теплопроводность и плотность воды при давлении  $P$  и температуре  $T$ ;  $\lambda_{(P_s,T)}$  и  $\rho_{(P_s,T)}$  – соответственно теплопроводность и плотность воды вблизи линии насыщения при температуре  $T$ .

Важное преимущество такого метода обобщения – то, что плотность исследуемого вещества находится с более высокой точностью и представляет собой менее трудоемкую задачу, чем определение теплопроводности.

Расчетные данные о теплопроводности воды при температурах 273–473 К и давлениях 0,1–2000 МПа, полученные по формуле, представлены в табл. 1. Эти данные согласуются с критически оцененными Международными данными [1] в пределах 0,6 %, с [2–4, 6, 7] – 1,6 %, а с [5] – 2,1 %, видимо, данные [5] занижены при давлениях 250–350 МПа и температурах 453–473 К. Сопоставить расчетные данные о теплопроводности воды с экспериментальными при  $P > 1200$  МПа не представляется возможным из-за отсутствия таковых.

При расчетах по формуле использовались данные о теплопроводности воды вблизи линии насыщения из работы [1] и о плотности в диапазоне температур 273–473 К при давлениях до 2000 МПа – [8–10].

Представленные в таблице расчетные данные о теплопроводности воды согласуются со всеми справочными (до 400 МПа) и экспериментальными данными (до 1000 МПа) пределах 1,6 %. Оценочная погрешность расчетных данных (табл.) при температурах 273–473 К и давлениях 0,1–1000 МПа составляет 1,6 %, и менее 2,5 % – при давлениях 1000–2000 МПа. Эти данные могут быть использованы в расчетах при конструировании теплообменных аппаратов в энергетике.

### ТЯЖЕЛАЯ ВОДА (D<sub>2</sub>O)

Тяжелая вода применяется в теплоэнергетических установках, включая ядерные. В атомных реакторах D<sub>2</sub>O может одновременно служить защитной средой и теплоносителем, т.к. она является превосходным замедлителем нейтронов.

Экспериментальные исследования теплопроводности D<sub>2</sub>O проводились в разных странах, и к настоящему времени опубликовано достаточно большое количество работ, краткие обзоры которых даны в [15–17].

В 1982 г. в работе [18] были представлены Международные стандартные данные о теплопроводности D<sub>2</sub>O при давлениях до 100 МПа в диапазоне температур 277–825 К. В пределах этой области допуск к расчетным значениям теплопроводности D<sub>2</sub>O для жидкой фазы составляет 2 %. Рассчитанные по уравнению значения теплопроводности приведены для состояния насыщения и для однофазной области.

Однако существуют работы, в которых представлены данные о теплопроводности D<sub>2</sub>O в диапазоне температур 263–487 К при давлениях до 218 МПа – [16] и в диапазо-

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ОБЫЧНОЙ И ТЯЖЁЛОЙ ВОДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ

не температур 293–473 К при давлениях до 400 МПа – [19], а также, есть данные о плотности D<sub>2</sub>O в диапазоне давлений 0,1–400 МПа при температурах до 473 К [11], которые были получены по данным [12–14] и при этом отсутствовала обобщенная формула, которая могла бы

описать все данные о теплопроводности тяжелой воды в диапазоне давлений 0,1–400 МПа при температурах до 473 К. Надо отметить, что работы [13, 14, 16, 19–22] посвящены тяжелой воде с концентрацией 99,8 D<sub>2</sub>O.

Таблица 1.

Рассчитанные по формуле (1) значения теплопроводности воды, мВт/(м К)

P МПа	T, К								
	273,15	298,15	323,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15	473,15
0,1-2	563	610	643	664	679	685	685	676	664
20	573	620	653	675	691	698	699	692	683
40	583	629	662	685	701	710	713	708	701
60	592	638	672	695	712	721	726	723	716
80	601	647	681	704	722	732	738	734	732
100	609	655	689	713	732	743	749	748	745
120	617	663	698	722	741	753	760	760	759
140	625	671	705	730	750	762	771	771	772
160	632	678	713	738	758	772	781	782	784
180	640	686	721	746	767	781	790	792	795
200	646	692	728	754	775	789	799	802	806
220	653	699	735	761	783	797	808	812	816
240	659	706	742	768	790	806	817	821	826
260	665	712	748	775	798	814	825	830	835
280	671	718	755	782	805	821	833	838	844
300	676	724	761	788	812	828	841	847	853
320	682	730	767	795	819	836	849	854	861
340	687	736	774	801	825	843	856	863	869
360	692	741	780	807	832	849	864	871	877
380	698	747	786	814	838	856	871	877	884
400	701	752	791	820	844	862	878	886	892
450	713	766	804	833	860	878	895	902	912
500	725	777	817	847	874	893	910	919	928
550	735	789	829	861	887	908	925	935	945
600	745	802	842	872	900	921	939	950	961
650	754	813	853	884	913	934	953	965	975
700		824	864	895	925	947	966	978	991
750		834	875	906	936	959	980	990	1003
800		844	884	917	948	971	992	1005	1017
850		853	895	927	959	983	1005	1017	1029
900		862	905	938	969	993	1016	1029	1042
950		872	915	946	978	1004	1027	1040	1054
1000		881	923	955	987	1013	1036	1051	1065
1100		894	938	972	1005	1030	1052	1067	1083
1200		906	952	987	1020	1046	1069	1084	1101
1300		917	964	1001	1035	1060	1086	1100	1118
1400		928	977	1014	1050	1075	1100	1116	1134
1500		939	990	1028	1065	1090	1115	1132	1151
1600		950	1002	1042	1079	1105	1130	1149	1167
1700		961	1014	1055	1093	1122	1146	1164	1184
1800		972	1027	1069	1107	1138	1162	1180	1202
1900		984	1040	1083	1122	1152	1178	1196	1218
2000		995	1053	1096	1137	1167	1195	1212	1234

На основе анализа данных о теплопроводности D<sub>2</sub>O [16–21] и данных о плотности D<sub>2</sub>O в диапазоне давлений 0,1–400 МПа при температурах до 473 К получена обобщенная формула, которая связывает коэффициент теплопроводности с плотностью

$$\lambda_{(P,T)}^{D_2O} = \lambda_{(P_s,T)}^{D_2O} \left[ 1,800 \frac{\rho_{(P,T)}}{\rho_{(P_s,T)}} - 0,8000 \right]^{D_2O}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{(P,T)}^{D_2O}$  и  $\rho_{(P,T)}^{D_2O}$  – соответственно теплопроводность и плотность тяжелой воды при давлении  $P$  и температуре  $T$ ;  $\lambda_{(P_s,T)}^{D_2O}$  и  $\rho_{(P_s,T)}^{D_2O}$  – соответственно теплопроводность и плотность тяжелой воды вблизи линии насыщения при температуре  $T$ .

При расчетах по формуле использовались данные о плотности D<sub>2</sub>O из [12], которые приведены здесь в табл. 2 и данные о теплопроводности D<sub>2</sub>O вблизи линии насыщения из [20]. Надо отметить, что данные [20] хорошо (0,7 %) согласуются с [17, 18, 21].

**У.Б.МАГОМЕДОВ**

В настоящей работе представлены данные о плотности  $D_2O$  (табл. 2) для интервалов температур 298– 473 К и давлений 0,1– 400 МПа, в которой использованы данные до 100 МПа из скелетной таблицы удельного объема  $D_2O$  [12], до 350 МПа – из [13], до 400 МПа при температуре 298 К – из [14], а недостающие данные о плотности получены расчетным путем, используя логарифмическую экстраполяцию. Надо отметить, что для интервала температур 348– 473 К в [12] погрешность плотности оценена 0,1 %, в [13, 14] – 0,2 % и для расчетных значений – 0,25 %.

Расчетные по формуле (2) значения теплопроводности  $D_2O$  согласуются с критически оцененными Международными данными [18] в пределах 2 %, с данными [16] – 1,7 %, а с [19] менее 2 % – при давлениях до 200 МПа и менее 3 % – при давлениях от 200 до 400 МПа.

Оценочная погрешность данных табл. 3 составляет менее 3 % .

Представленные в табл. 2, 3 данные о теплопроводности и плотности  $D_2O$  могут быть использованы в расчетах при конструировании теплообменных аппаратов в энергетике.

Таблица 2.

Данные плотности тяжелой воды,  $кг/м^3$

P МПа	T, К							
	298,15	323,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15	473,15
0,1-2	1105	1097	1082	1064	1042	1017	990	958
20	1113	1106	1091	1074	1052	1029	1003	973
40	1123	1115	1100	1083	1063	1041	1016	988
60	1132	1123	1109	1092	1073	1051	1028	1001
80	1141	1132	1118	1102	1083	1061	1038	1013
100	1149	1140	1127	1110	1092	1071	1049	1025
120	1158	1148	1134	1118	1101	1080	1060	1037
140	1166	1155	1141	1125	1109	1089	1069	1047
160	1173	1162	1148	1132	1117	1098	1078	1057
180	1180	1169	1155	1140	1125	1106	1087	1066
200	1187	1176	1163	1147	1132	1113	1095	1075
220	1194	1183	1170	1154	1139	1121	1103	1083
240	1200	1189	1176	1160	1146	1128	1111	1091
260	1206	1195	1182	1167	1152	1134	1117	1099
280	1212	1201	1188	1173	1159	1141	1124	1106
300	1218	1208	1194	1179	1165	1148	1131	1114
320	1224	1213	1200	1185	1171	1154	1138	1121
340	1230	1220	1206	1191	1177	1160	1144	1128
360	1236	1225	1212	1197	1183	1167	1151	1134
380	1241	1230	1217	1202	1189	1173	1157	1141
400	1246	1236	1223	1208	1195	1179	1163	1147

Таблица 3 .

Расчитанные по формуле (2) значения теплопроводности тяжелой воды,  $мВт/(м \cdot К)$

P МПа	T, К							
	298.15	323.15	348.15	373.15	398.15	423.15	448.15	473.15
0.1-2	594	620	633	640	638	630	615	595
20	602	629	642	651	649	643	630	612
40	611	638	652	660	661	656	644	628
60	620	647	661	670	672	668	657	643
80	629	656	671	681	683	679	669	656
100	637	664	680	690	693	690	681	670
120	645	672	688	698	703	700	693	683
140	652	679	695	706	712	710	704	694
160	659	686	703	714	721	720	713	706
180	666	693	710	722	729	730	723	716
200	673	701	718	730	737	738	732	726
220	680	707	725	737	745	746	741	735
240	686	714	732	744	753	753	750	744
260	692	720	738	751	759	760	757	753
280	697	726	744	758	767	768	765	760
300	703	732	751	765	773	776	772	769
320	709	738	757	771	780	783	780	777
340	715	744	763	777	787	790	787	785
360	720	750	770	784	794	797	795	792
380	726	756	775	790	800	804	802	800
400	731	761	782	796	806	811	809	807

- [1]. Международные таблицы и уравнения для теплопроводности воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С. 70–74.
- [2]. ГСССД. Р120–85. Вода. Теплопроводность воды в диапазоне температур 25–200 °С и давлений 100–400 МПа. Таблицы рекомендуемых справочных данных / Госстандарт; ГСССД. М. 1987. 10 с. (Рукопись авторов Амирханова Х.И, Адамова А.П. и Магомедова У.Б. деп. во ВНИИКИ 10.06.87. № 370–кк 87).
- [3]. *A.W.Lawson, R.Lowell, and A.L. Jain* Thermal Conductivity of Water at High Pressures // *J. Chem. Phys.* 1959. V. 30. No. 3. P. 643–647.
- [4]. *P.W. Bridgman* The Thermal Conductivity of Liquids under Pressure // *Proc. Am. Acad. Arts. Sci.* 1923. V. 59. No. 7. P. 141–144.
- [5]. *F.J.Dietz, de J.J.Groot, and E.U. Franck* The Thermal Conductivity of Water to 250 °C and 350 MPa // *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 1981. V. 85. No.11. P. 1005–1009.
- [6]. *Х.И.Амирханов, А.П.Адамов, У.Б. Магомедов* Экспериментальное исследование теплопроводности воды при температурах 30–200 °С и давлениях 98,2–686,5 МПа // В сб. Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД. М.: Изд-во стандартов. 1984. Вып. 21. С. 35–39.
- [7]. *Б.А.Григорьев, Ю.А.Ганиев, Г.А. Сафронов. и др.* Теплопроводность обычной и тяжелой воды и водных растворов неэлектролитов / ГСССД. М.: Изд-во стандартов. 1986. 64 с.
- [8]. Скелетная таблица удельного объема и энтальпии воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1987. № 3. С. 71–77.
- [9]. *J.Jůza, O.Sifner, and R. Mares* // *Proc. 10-th Int. Conf. Prop. Water and Steam. USSR. Moscow.* 1984. P. 106–116. *Water a Comprehensive Treatise / Edited by Felix Franks.* V. 1. Plenum Press. New York- London. 1972.
- [10]. *У.Б. Магомедов* Динамическая вязкость обычной и тяжелой воды при высоких параметрах состояния // *Изв. РАН. Энергетика.* 2000. № 2. С.138–142.
- [11]. *А.А. Александров* Международное уравнение состояния для тяжелой воды // *Теплоэнергетика.* 1986. № 4. С. 72–74.
- [12]. *J.Jůza, V.Kmoniček, O. Šifner, K.Schovanec* A Contribution to the of Thermodynamic Problem Similarity of H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O // *Physica.* 1966. V. 32. № 2. P. 362–384.
- [13]. *G. A.Gaballa, G. Neilson* The Effect of Pressure on the Structure of Light and Heavy Water // *Molec. Physics.* 1983. V. 50. № 1. P. 97–111.
- [14]. *В.А. Кириллин* Тяжелая вода. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 224 с.
- [15]. Теплопроводность обычной и тяжелой воды и водных растворов неэлектролитов / *Б.А. Григорьев, Ю. А. Ганиев, Г.А. Сафронов, А.М. Ишханов, Ю.Л. Расторгуев;* Госстандарт, ВНИЦ МВ. М.: Изд-во стандартов, 1985. 64 с.
- [16]. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / *Н.Б.Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий.* М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
- [17]. *А.А. Александров* Уравнения и таблицы для определения вязкости и теплопроводности тяжелой воды // *Теплоэнергетика.* 1983. № 8. С.71–74.
- [18]. *А.П.Адамов, У.Б. Магомедов* Экспериментальное исследование теплопроводности тяжелой воды при температурах 20–200 °С и давлениях 0,1–400 МПа // *ТВТ.* 1987. Т. 25. № 6. С. 1237–1239.
- [19]. *J. E. S. Venart and N. Mani* Thermal Conductivity of Heavy Water // *J. Mech. Eng. Sci.* 1971. V. 13. № 3. P. 205–216.
- [20]. *Н.Б.Варгафтик, О.Н.Олещук, П.Е. Белякова* Экспериментальное исследование теплопроводности тяжелой воды // *Атомная энергия.* 1959. Т. 7. № 5. С. 465–468.
- [21]. *J.Kestin, J.V. Sengers* New International Formulations for the Thermodynamic Properties of Light and Heavy Water // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1986. Vol. 15. № 1. P. 305– 320.

Received: 31.01.2007