

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 (H₂O)

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 0–800⁰С и давлениях 0,1–100 МПа [1], рекомендуемые справочные данные о теплопроводности воды при температурах 25–200⁰С и давлениях 100–400 МПа [2], экспериментальные данные Лавсона, Ловезелла и Жейна при температурах 30–130⁰С и давлениях 0,1–800 МПа [3], экспериментальные данные Бриджмена при температурах до 70⁰С и давлениях до 1200 МПа [4], экспериментальные данные Диегца, Гроота и Франка при температурах 30–250⁰С и давлениях 0,1–350 МПа [5], экспериментальные данные теплопроводности воды Амирханова, Адамова и Магомедова при давлениях 98,2–686,5 МПа и температурах 20–200⁰С [6], экспериментальные данные теплопроводности воды Григорьева, Ганиева, Сафронова и др. при температурах (-14–210⁰С) и давлениях 0,1–210 МПа [7], а также Международные данные удельного объема воды и водяного пара при температурах 0–800⁰С 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 (D₂O)

Тяжелая вода применяется в теплоэнергетических установках, включая ядерные. В атомных реакторах D₂O может одновременно служить защитной средой и теплоносителем, т.к. она является превосходным замедлителем нейтронов.

Экспериментальные исследования теплопроводности D₂O 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 D₂O при давлениях до 100 МПа в диапазоне температур 277–825 К. В пределах этой области допуск к расчетным значениям теплопроводности D₂O 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 D₂O 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 D₂O 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 D₂O.

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 D₂O [16–21] и данных о плотности D₂O 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 D₂O из [12], которые приведены здесь в табл. 2 и данные о теплопроводности D₂O 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 D₂O (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 D₂O [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 D₂O 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 D₂O могут быть использованы в расчетах при конструировании теплообменных аппаратов в энергетике.

Таблица 2.

Данные плотности тяжелой воды, кг/м³

| 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 · 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 °С and 350 МПа // *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 H₂O and D₂O // *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