

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
СТАНДАРТИЗАЦИИ И МЕТРОЛОГИИ
(ГОССТАНДАРТ РОССИИ)
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ
ДАНЫХ (ГСССД)



Разрешаю на депонирование

директор ВНИЦСМВ

стандарта России

А.Д.Козлов

18 сентября 2000 г.

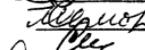
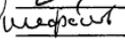
УДК 546.212:534.22 (08)

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАНЫХ

А. А. Александров, В.А. Белогольский, В.И. Левцов,
Л.М. Саморукова, С.С. Секоян, С.Р. Стефанов

Вода. Скорость звука при температурах 0...100 °С
и давлениях 0,101325...100 МПа

ГСССД 190 – 2000

Авторы:  А.А. Александров
 В.А. Белогольский
 В.И. Левцов
 Л.М. Саморукова
 С.С. Секоян
 С.Р. Стефанов

Москва – 2000

РАЗРАБОТАНЫ ГП "ВНИИФТРИ" и Московский энергетический институт (технический университет)

АВТОРЫ : д – р техн. наук А.А. Александров, В.А. Белогольский, канд. техн. наук В.И. Левцов, Л.М. Саморукова, канд. техн. наук С.С. Секоян, канд. техн. наук С.Р. Стефанов

РЕКОМЕНДОВАНЫ К АТТЕСТАЦИИ Российским национальным комитетом Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

д – ра техн. наук В.В. Рошупкина, д – ра техн. наук Л.Р. Фокина, С.Н. Скородумова, канд. техн. наук П.В. Попова

УВЕРЖДЕНЫ Государственным комитетом Российской Федерации по стандартизации и метрологии "18" декабря 2000 г. (протокол № 16)

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 546.212 : 534.22 (08)

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 190 – 2000. Вода. Скорость звука при температурах 0...100 °С и давлениях 0,101325...100 МПа/Александров А.А., Белогольский В.А, Левцов В.И. и др. ; Всеросс. науч. – иссл. центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта РФ. – 2000. 12 с. : Ил. : - Библиогр. – 17 назв. – Рус. – Деп. во ВНИЦСМВ *18, 12. 2000 г, N 782-00 кк.*

Таблицы содержат значения термодинамической скорости распространения звука в нормальной, деаэрированной воде при температурах от 0 до 100 °С и при давлениях от атмосферного до 100 МПа.

Авторы : *Александров* А.А. Александров
Белогольский В.А. Белогольский
Левцов В.И. Левцов
Саморукова Л.М. Саморукова
Секоян С.С. Секоян
Стефанов С.Р. Стефанов

Таблицы стандартных справочных данных

ВОДА. СКОРОСТЬ ЗВУКА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ
от 0 до 100°C И ДАВЛЕНИЯХ от 0,101325 до 100 МПа

ГСССД
190 - 2000
Взамен
ГСССД 117 –88

Tables of Standard Reference Data
Ordinary water. Sound velocity in the
temperature range 0 to 100 °C and the
pressure range 0,101325 to 100 MPa

GSSSD
190 - 2000
Instead of
GSSSD 117 –88

Аннотация

Настоящие таблицы стандартных справочных данных содержат значения термодинамической скорости распространения звука в нормальной, деаэрированной, дистиллированной (ГОСТ 6709 –72) воде при температурах от 0 до 100°C и при давлениях от атмосферного до 100 МПа.

Таблицы составлены на основе уравнения, полученного в результате статистической обработки массива имеющихся в литературе экспериментальных данных, основу которого составляют значения скорости звука, измеренные в ГП «ВНИИФТРИ» с помощью рабочего эталона нулевого разряда УВТ-90-А-96.

Погрешности табличных значений определены в соответствии с ГОСТ 8.381-80. Средняя квадратическая погрешность значений скорости звука при атмосферном давлении составляет 0,02 м/с, а величины средней квадратической погрешности значений скорости звука при повышенных давлениях, изменяющиеся в зависимости от температуры и давления от 0,03 до 0,25 м/с, представлены в отдельной таблице.

Таблицы стандартных справочных данных

ВОДА. СКОРОСТЬ ЗВУКА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ
от 0 до 100°C И ДАВЛЕНИЯХ от 0,101325 до 100 МПа

ГСССД
190 - 2000
Взамен
ГСССД 117 -88

Tables of Standard Reference Data
Ordinary water. Sound velocity in the
temperature range 0 to 100 °C and the
pressure range 0,101325 to 100 MPa

GSSSD
190 - 2000
Instead of
GSSSD 117 -88

Применение стандартных справочных данных обязательно во всех отраслях народного хозяйства

Вводная часть

Настоящие таблицы стандартных справочных данных содержат значения термодинамической скорости распространения звука в нормальной, деаэрированной, дистиллированной (ГОСТ 6709 -72) воде при температурах от 0 до 100°C и при давлениях от атмосферного до 100 МПа

Уравнение, описывающее зависимость скорости распространения звука от температуры и давления принятое для построения этих таблиц в предыдущем издании [1], базировалось на совокупности высокоточных и хорошо согласующихся между собой экспериментальных данных для атмосферного давления [2 -6] и данных работ [6 -10] для высоких давлений, признанных наиболее надежными из экспериментальных исследований в этой области параметров, полный список которых приведен в [1]. Несколько позже в 1994 г. автор работы [10] указал на необходимость корректировки приведенных в ней значений и предложил поправочную формулу для диапазона температур от 0 до 15°C и давлений до 100 МПа [11].

В последующие годы в ГП "ВНИИФТРИ" был разработан метод [12,13] и создан рабочий эталон нулевого разряда (УВТ -90 -А -96) для воспроизведения единицы скорости звука в дистиллированной воде в диапазоне температур 0 40°C и избыточных давлений 0 60 МПа. [14]. С помощью него были проведены систематические измерения скорости звука в дистиллированной воде во всей этой области параметров [15]. Полученные значения для атмосферного давления согласуются с величинами [1,2], а также с полученными несколько

позже данными [16], в пределах погрешности эталона. При повышенных давлениях отклонения табличных величин [1] в некоторых местах превышают эту погрешность.

Указанные обстоятельства и введение новой Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) обусловили необходимость корректировки таблиц [1].

В дальнейшем использованы следующие условные обозначения:

w – скорость распространения звука в воде, м/с;

p – давление, МПа;

t – температура, °С (МТШ-90);

$\pi = p - 0,101325$;

$\tau = t / 100$;

Δw – абсолютная средняя квадратическая погрешность, м/с.

Методическая часть

При разработке настоящих таблиц сохранена структура уравнения, принятая в [1], и часть его, описывающая скорость звука при атмосферном давлении, оставлена такой же как и в [1] с коррекцией лишь на температурную шкалу МТШ-90. При получении уравнения для области высоких давлений в качестве исходных величин использованы новые данные, полученные в ГП «ВНИИФТРИ» для дистиллированной воды на рабочем эталоне нулевого разряда УВТ-90-А-96 [15], и данные работ [6, 8,11], относящиеся к температурам и давлениям более высоким, чем исследованы в [15]. После проверки согласованности исходных величин по изотермам и изобарам, им приданы статистические веса, соответствующие погрешностям их экспериментального измерения, и коэффициенты уравнения определены с помощью метода наименьших квадратов с учетом их значимости.

Основой оценки погрешности табличных значений скорости звука в воде при атмосферном давлении является средняя квадратическая погрешность, полученная обычным методом расчета погрешности линейной функции при статистической обработке исходных экспериментальных данных. Однако, имея в виду возможное влияние на скорость звука способов приготовления образцов воды, на что указывается, например, в [17], и отсутствие надежных данных для учета такого влияния, значение погрешности получено удвоением результата статистического расчета. Средние квадратические погрешности табличных

значений скорости звука в воде при повышенных давлениях получены на основе экспертной оценки и анализа их согласования с экспериментальными данными.

Основная часть.

При температурах от 0 до 100°C и при давлениях от давления насыщения и до 100 МПа скорость распространения звука в воде w описывается уравнением, полученным в результате обработки наиболее достоверных экспериментальных данных с учетом их статистических весов

$$w = \sum_{i=0}^5 a_{i0} \tau^i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} \tau^i \pi^j$$

где a_{ij} – коэффициент при члене уравнения, содержащем τ в степени i и π в степени j

Первая сумма в правой части этого уравнения передает значения скорости звука при нормальном (0,101325 МПа) атмосферном давлении и при проведении расчетов для этого давления вторая сумма может быть отброшена.

Коэффициенты a_{ij} в уравнении определялись методом наименьших квадратов при использовании указанных выше массивов исходных данных. Значения их приведены в табл. 1.

Таблица 1. Числовые значения коэффициентов a_{ij}

i^*	$j^*=0$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
0	1402,3874	149,94347	39,695230	-15,235495
1	503,83617	81,039755	-200,48177	66,311236
2	-581,17292	-111,69791	328,56051	-105,55834
3	334,63882	172,922898	-334,0451345	105,03105
4	-148,25967	-76,999585	137,256278	-45,780857
5	31,658502	-	-	-
* степень τ в уравнении				
** степень π в уравнении				

В табл. 2 приведены рассчитанные по уравнению значения скорости распространения звука в воде при атмосферном давлении. При этом значение, указанное для температуры $t=100^\circ\text{C}$, является экстраполированным значением для жидкой фазы, так как в шкале МТШ-90 температура насыщения воды при атмосферном давлении 0,101325 МПа равна $99,974^\circ\text{C}$ и при температуре 100°C

вода находится в паровой фазе. Средняя квадратическая погрешность значений скорости звука, приведенных в табл. 2, равна 0,02 м/с.

Значения скорости звука в воде при повышенных давлениях, рассчитанные по уравнению, приведены в табл. 3. Средние квадратические погрешности этих значений указаны в табл. 4.

Список литературы

- 1 Вода. Скорость звука при температурах 0...100 °С и давлениях. 0.101325...100 МПа. ГСССД 117–88. Изд –во стандартов. –1989. –19стр.
2. Del Grosso V, A., Mader C. W. Speed of sound in pure water. J. Acoust. Soc. Amer. - 1972. - Vol. 52. - N 5. - P. 1442-1446.
3. Del Grosso V. A. Sound speed in pure water and sea water. J. Acoust. Soc, Amer. - 1970. - Vol. 47. - P. 947-949,
4. Barlow A. J. , Yazgan E, Phase -change method for measurements of ultrasonic wave velocity and determination of the speed of sound in water, Brit. J. Appl. Phys. - 1966. - Vol. 17. " P. 807-819.
5. Kroebel W., Mahrt K. H. Recent results of absolute sound velocity measurements in pure water and sea water at atmospheric pressure. Acoustica. - 1976. - Vol. 35. - P. 154-164.
6. Александров А. А., Ларкин. Д. К. Экспериментальное определение скорости ультразвука в воде в широком диапазоне температур и давлений. Теплоэнергетика.-1976. - N. 2. - С. 75-78.
7. Barlow A. J. , Yasgan E. Pressure dependence of the velocity of sound in water as a function of temperature. Brit. J. Appl. Phys. - 1967. - Vol. 18. - P. 645-651.
8. Александров А. А. , Кочетков А. И. Экспериментальное определение скорости ультразвука в воде при температурах 266-423 К и давлениях до 100 МПа. Теплоэнергетика. - 1979. - N. 9. - С. 65-66.
9. Wilson Y. D. Speed of sound in distilled water as a function of temperature and pressure. J. Acoust. Soc. Amer, - 1959. - Vol. 51. - N. 8. - P. 1067-1072.
10. Chen-Tung Chen. Millero F. J, Reevaluation of Wilson's sound speed measurements for pure water. J. Acoust, Soc. Amer, - 1976, — Vol. 60. - N 6. - P. 1270-1273;

11. Millero F.J., Xu L. Comments on equations for the speed of sound in seawater. *J. Acoust. Soc. Am.* - 1994. - V. 95. - N 5. - Pt. 1. - P. 2757-2759.

12. Белогольский В.А., Саморукова Л. М. Анализ временной задержки импульсных преобразователей скорости звука. Метрологические проблемы гидрофизических и гидроакустических измерений. Сборник научных трудов. Москва. 1990 г.

13. Белогольский В. А., Оводов Г. И., Саморукова Л. М., Левцов В. И., Власов Ю.Н. Времяпролетный способ определения скорости звука в жидкой среде и устройство для его реализации. Заявка на патент РФ N 92-000526/28 1992 г. Изобретения. Официальный бюллетень комитета Российской Федерации по патентам и товарным знакам,- 1996.- N 35.

14. Белогольский В.А., Оводов Г.И., Саморукова Л. М, Лабораторный комплекс для измерений скорости звука в водных средах. Законодательная метрология. - 1995. - N 6. - С. 20-22.

15. Белогольский В.А., Секоян С.С., Саморукова Л. М. , Стефанов С. Р., Певцов Б. И. Исследование зависимости скорости звука от давления в дистиллированной воде. Измерительная техника. – 1999. -№ 4. –С. 66 -69.

16. Fujii Ken-ichi, Masui R. Accurate measurements of the sound velocity in pure water by combining a coherent phase –detection technique and a variable path – length interferometer. *J. Acoust. Soc. Amer.* –1993. –Vol. 93. –№ 1. –P. 276 –282.

17. Juszkiowicz A., Kopyłowicz J., Kozłowski Z. Measurements of some anomalies in the propagation of ultrasonic waves in pure water. *Proc. Congr. of Federation of Acoust. Soc. of Europe, FASE –78.* –Warszawa, 1978. –Vol. 1. -p. 25 –

Таблица 3. Значения скорости звука ,м/с при повышенных давлениях

t, °C	Давление p, МПа									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	1409,83	1417,60	1425,56	1433,68	1441,95	1450,36	1458,90	1467,56	1476,33	1485,20
10	1455,03	1463,04	1471,15	1479,36	1487,65	1496,01	1504,45	1512,95	1521,51	1530,11
20	1490,36	1498,58	1506,84	1515,15	1523,48	1531,85	1540,25	1548,66	1557,10	1565,55
30	1517,39	1525,81	1534,23	1542,65	1551,07	1559,49	1567,91	1576,31	1584,71	1593,10
40	1537,37	1546,01	1554,61	1563,19	1571,74	1580,26	1588,75	1597,21	1605,64	1614,05
50	1551,32	1560,21	1569,03	1577,81	1586,53	1595,20	1603,82	1612,39	1620,91	1629,39
60	1560,05	1569,22	1578,31	1587,32	1596,26	1605,12	1613,92	1622,65	1631,32	1639,93
70	1564,19	1573,68	1583,06	1592,35	1601,55	1610,65	1619,67	1628,61	1637,47	1646,25
80	1564,24	1574,07	1583,78	1593,38	1602,87	1612,26	1621,54	1630,72	1639,80	1648,80
90	1560,58	1570,78	1580,84	1590,77	1600,58	1610,27	1619,85	1629,31	1638,66	1647,91
100	1553,56	1564,11	1574,52	1584,80	1594,95	1604,97	1614,86	1624,64	1634,29	1643,84

Продолжение табл. 3

t, °C	Давление p, МПа									
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	1494,15	1503,17	1512,25	1521,39	1530,56	1539,76	1548,98	1558,20	1567,41	1576,60
10	1538,76	1547,44	1556,14	1564,87	1573,61	1582,36	1591,10	1599,84	1608,56	1617,25
20	1574,01	1582,48	1590,96	1599,43	1607,89	1616,35	1624,79	1633,21	1641,61	1649,99
30	1601,48	1609,85	1618,20	1626,53	1634,84	1643,13	1651,40	1659,65	1667,87	1676,06
40	1622,42	1630,76	1639,08	1647,36	1655,62	1663,84	1672,04	1680,21	1688,34	1696,45
50	1637,83	1646,22	1654,57	1662,88	1671,14	1679,38	1687,57	1695,73	1703,86	1711,95
60	1648,48	1656,97	1665,41	1673,79	1682,13	1690,42	1698,67	1706,88	1715,05	1723,18
70	1654,96	1663,60	1672,17	1680,68	1689,13	1697,53	1705,87	1714,16	1722,41	1730,61
80	1657,71	1666,54	1675,29	1683,96	1692,56	1701,10	1709,57	1717,98	1726,34	1734,65
90	1657,06	1666,12	1675,08	1683,96	1692,75	1701,47	1710,11	1718,68	1727,18	1735,62
100	1653,27	1662,60	1671,83	1680,96	1689,99	1698,93	1707,79	1716,55	1725,24	1733,85

Таблица 4. Средняя квадратическая погрешность значений скорости звука в воде при повышенных давлениях

t, °C	Δw, м/с, при давлении p, МПа									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,15	0,17	0,20	0,24
10	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,13	0,15	0,18	0,22
20	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,12	0,14	0,17	0,20
30	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,11	0,13	0,16	0,18
40	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,12	0,14	0,17	0,20
50	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,10	0,14	0,16	0,18	0,21
60	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,15	0,17	0,19	0,22
70	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,15	0,17	0,19	0,22
80	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,15	0,17	0,19	0,22
90	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,17	0,19	0,21	0,24
100	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,19	0,21	0,23	0,25