

Ярошенко А.А.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРСКОЙ ВОДЕ. ОТ КОЛЛАДОНА И ШТУРМА ДО НАШИХ ДНЕЙ

В статье приводятся и анализируются различные формулы для вычисления скорости звука в морской воде в зависимости от температуры, солёности и гидростатического давления. Знание вертикального распределения скорости звука необходимо для точного измерения глубины места судовыми эхолотами.

Ключевые слова: скорость звука, солёность, гидростатическое давление

Одно из самых ранних упоминаний о существовании звука в море принадлежит древнегреческому философу Аристотелю, который первым заметил, что звук можно слышать в воде так же, как и в воздухе. В 1490 г. итальянский ученый Леонардо да Винчи (1452-1519 гг.) написал: «Если вы остановите свой корабль и опустите один конец длинной трубки в воду, а другой ее конец приложите к уху, вы услышите корабли на большом расстоянии от вас» [1]. Первые количественные измерения скорости звука были выполнены в 1826 г. швейцарским физиком Ж.Д. Колладоном (1802-1893 гг.) и французским математиком Ж.К.Ф. Штурмом (1803-1855) на Женевском озере. Скорость звука в воде при температуре 8°C оказалась равной 1435 м/с, что на 3 м/с меньше значения, принятого для Женевского озера в настоящее время [1]. Последующие исследователи не только измеряли скорость звука в море, но и пытались установить соотношение между ней и какими-либо проще измеряемыми физическими величинами.

В практике судовождения знание возможно более точного значения скорости звука, как в приповерхностном слое, так и в особенности вертикального распределения скорости звука по глубине оказывается критически важным для решения задачи определения места судна в мелководных районах морей путем сличения эхолотных измерений с морской картой.

Прямые измерения скорости звука в настоящее время могут быть осуществлены с помощью специальных сложных и дорогостоящих прецизионных приборов – скоростемеров [2]. Погрешность измерений с помощью современных скоростемеров составляет 0,1 м/с.

Основными физическими характеристиками среды, от которых зависит скорость звука в море, являются температура, солёность и гидростатическое давление. Наибольшее влияние на скорость звука оказывает температура. Повышение температуры воды на 1°C увеличивает скорость звука на 2-4 м/с. Изменение солёности на 1‰ приводит к увеличению скорости звука на 1-1,2 м/с. Повышение гидростатического давления на 1 атм. приводит к увеличению скорости на 0,2 м/с.

Расчетным путем скорость звука можно найти по данным измерений температуры, солёности и давления по эмпирическим формулам, представляющим собой зависимости вида:

$$c = c_0 + \Delta c(T) + \Delta c(S) + \Delta c(P) + \Delta c(T, S, P),$$

где c_0 – некоторое опорное значение скорости звука, а остальные члены – поправки-приращения, учитывающие раздельное и совместное влияние различных факторов: температуры T (°C), солёности S (‰) и гидростатического давления P .

Впервые такая формула была предложена Кувахарой (1939 г.) и позднее неоднократно уточнялась многими авторами: Вейслером и Дель Гроссо (1950, 1951 гг.), Макензи (1959, 1960 гг.), Вильсоном (1960, 1962 гг.) [3-5]. Формула Дель Гроссо (1952г.) [6] имеет вид:

$$c = 1448,6 + 4,618T - 0,0523T^2 + 0,00023T^3 + 1,25(S - 35) - 0,011(S - 35)T + \\ + 0,0027 \cdot 10^{-5} (S - 25)T^4 - 2 \cdot 10^{-7} (S - 35)^4 (1 + 0,577T - 0,0072T^2).$$

Формула справедлива для скорости звука у поверхности моря. Чтобы учесть влияние гидростатического давления, необходимо приписать слагаемое, учитывающее изменение скорости звука с глубиной. Согласно Вуду, это слагаемое равно $0,0175h$. Погрешность расчета по формуле не превышает $0,5 - 0,8$ м/с в зависимости от солености. Если соленость $S > 15\%$, то ошибка составляет $0,5$ м/с. При солености $S < 15\%$ ошибка составляет $0,8$ м/с [6]. Эмпирическая формула Вуда (1955г.) имеет следующий вид [6]

$$c = 1450 + 4,206T - 0,0366T^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175h.$$

Ошибка расчета по этой формуле минимальна при температурах около 10°C . При этих условиях разность между измеренными и расчетными значениями скорости звука не превышает $1,5$ м/с [6].

Уточненная формула Дель Гроссо [7] имеет следующий вид

$$c_0 = 1402,392 \text{ м/с}; \\ \Delta c(T) = 5,01109398873 T - 5,50946843172 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,21535969240 \cdot 10^{-4} T^3; \\ \Delta c(S) = 1,329522907815 S + 1,25955756814 \cdot 10^{-4} S^2; \\ \Delta c(P) = 1,59136154 \cdot 10^{-1} P + 2,547548 \cdot 10^{-7} P^2 - 9,3668 \cdot 10^{-12} P^3; \\ \Delta c(T, S, P) = -1,275627834 \cdot 10^{-2} TS + 6,47715186 \cdot 10^{-4} TP + \\ + 2,760566 \cdot 10^{-10} T^2 P^2 + 1,656949 \cdot 10^{-8} TP^2 + 5,53611 \cdot 10^{-13} TP^3 - \\ - 4,4666741 \cdot 10^{-8} T^3 P - 1,681125 \cdot 10^{-11} S^2 P^2 + 9,684031564 \cdot 10^{-5} T^2 S + \\ + 4,95214594 \cdot 10^{-7} TS^2 P - 3,47312322 \cdot 10^{-5} TSP.$$

Здесь P – в дбар, $1 \text{ дбар} = 10^4$ Па. Эта формула позволяет производить расчеты с точностью до $0,05$ м/с. Для еще более высокой точности ($0,01$ м/с) пользуются таблицей поправок коэффициентов в этой формуле.

Наибольшее практическое применение получила формула Вильсона [5] (Wilson W.D. 1960, 1962)

$$c_0 = 1449,14; \\ \Delta c(T) = 4,5721T - 4,4532 \cdot 10^{-2} T^2 - 2,6045 \cdot 10^{-4} T^3 + 7,9851 \cdot 10^{-6} T^4; \\ \Delta c(S) = 1,39799(S - 35) + 1,69202 \cdot 10^{-3} (S - 35)^2; \\ \Delta c(P) = 1,60272 \cdot 10^{-1} P + 1,0268 \cdot 10^{-5} P^2 + 3,5216 \cdot 10^{-9} P^3 - 3,3603 \cdot 10^{-12} P^4 \\ \Delta c(T, S, P) = (S - 35)(-1,1244 \cdot 10^{-2} T + 7,7711 \cdot 10^{-7} T^2 + 7,7016 \cdot 10^{-5} P - \\ - 1,2943 \cdot 10^{-7} P^2 + 3,1580 \cdot 10^{-8} PT + 1,5790 \cdot 10^{-9} PT^2) + P(-1,8607 \cdot 10^{-4} T + \\ + 7,4812 \cdot 10^{-6} T^2 + 4,5283 \cdot 10^{-8} T^3) + P^2(-2,5294 \cdot 10^{-7} T + 1,8563 \cdot 10^{-9} T^2) - \\ - P^3 \cdot 1,9646 \cdot 10^{-10} T.$$

Она позволяет рассчитывать скорость звука в зависимости от температуры, солености и гидростатического давления с ошибкой $0,22$ м/с для $4^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C}$, $1 \text{ кг/см}^2 < P < 1000 \text{ кг/см}^2$,

$0 < S < 37\%$. Формула Вильсона была принята Национальным центром сбора океанографических данных (NODC) США для машинной обработки гидрологической информации. В СССР по этой формуле в 1965 г. были составлены и изданы Гидрографической службой ВМФ «Таблицы для расчета скорости звука в морской воде».

Для практических расчетов Полосин [8] предложил вместо поправки скорости звука на давление $\Delta c(P)$ использовать поправку на глубину $\Delta c(h)$. Он предложил следующую зависимость давления P от глубины h

$$P = 1,033 + 1,028126 \cdot 10^{-1} h + 2,38 \cdot 10^{-7} h^2 - 6,8 \cdot 10^{-17} h^4,$$

а поправку скорости звука на давление преобразовать в поправку на глубину следующим образом

$$\Delta c(h) = 0,1656 + 1,64802 \cdot 10^{-2} h + 1,4680 \cdot 10^{-7} h^2 + 4,315 \cdot 10^{-12} h^3 - 3,48 \cdot 10^{-16} h^4 - 3,4 \cdot 10^{-21} h^5 - 1,2 \cdot 10^{-26} h^6.$$

Лерой [9] предлагает кроме температуры солёности и глубины учитывать географическую широту места

$$c = V_o + V_a + V_b + V_c + V_d,$$

$$V_o = 1493,0 + 3(T - 10) - 6 \cdot 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \cdot 10^{-2}(T - 18)^2 + 1,2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + h/61; \quad V_a = 10^{-7} h^2 + 2 \cdot 10^{-10} h^2 (T - 18)^2 + 10^{-4} h \varphi / 90;$$

$$V_b = 2,6 \cdot 10^{-4} T(T - 5)(T - 25);$$

$$V_c = -10^{-9} h^2 (10^{-3} h - 4)(10^{-3} h - 8);$$

$$V_d = 1,5 \cdot 10^{-3} (S - 35)(1 - 10^{-3} h) + 3 \cdot 10^{-6} T^2 (T - 30)(S - 35),$$

где φ - географическая широта места в градусах. Считается, что эта формула обеспечивает точность 0,1 м/с. для $T < 20^\circ\text{C}$ и $h < 8000\text{м}$.

Фрай и Паг (1971г.) [10], основываясь на данных Вильсона, предложили более простую формулу для вычисления скорости звука по измеренным величинам температуры и солёности

$$c_0 = 1449,30;$$

$$\Delta c(T) = 4,587T - 5,356 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,604 \cdot 10^{-4} T^3;$$

$$\Delta c(S) = 1,19(S - 35) + 9,6 \cdot 10^{-2} (S - 35)^3;$$

$$\Delta c(P) = 1,5848 \cdot 10^{-1} + 1,572 \cdot 10^{-5} P^2 - 3,46 \cdot 10^{-12} P^4;$$

$$\Delta c(T, S, P) = 1,354 \cdot 10^{-5} T^2 P - 7,19 \cdot 10^{-7} T P^2 - 1,2 \cdot 10^{-2} (S - 35) T,$$

для $-3^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$, $33,1\% < S < 36,6\%$, $1,033 \text{ кг/см}^2 < P < 984,3 \text{ кг/см}^2$. Среднеквадратичная ошибка расчета скорости звука по этой формуле составляет 0,1 м/с и охватывает 99,5 % объема вод Мирового океана.

Уравнение «UNESCO equation» [11] имеет следующий вид

$$c = c_0 + C + AS + BS^{3/2} + DS^2$$

$$c_0 = 1402,388 \text{ м/с};$$

$$C = 5,03830T - 5,81090 \cdot 10^{-2}T^2 + 3,3432 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,47797 \cdot 10^{-6}T^4 + \\ + 3,1419 \cdot 10^{-9}T^5 + (0,153563 + 6,8999 \cdot 10^{-4}T - 8,1829 \cdot 10^{-6}T^2 + \\ + 1,3632 \cdot 10^{-7}T^3 - 6,1260 \cdot 10^{-10}T^4)P + (3,1260 \cdot 10^{-5} - 1,7111 \cdot 10^{-6}T + \\ + 2,5986 \cdot 10^{-8}T^2 - 2,5353 \cdot 10^{-10}T^3 + 1,0415 \cdot 10^{-12}T^4)P^2 + \\ + (-9,7729 \cdot 10^{-9} + 3,8513 \cdot 10^{-10}T - 2,3654 \cdot 10^{-12})P^3;$$

$$A = 1,389 - 1,262 \cdot 10^{-2}T + 7,166 \cdot 10^{-5}T^2 + 2,008 \cdot 10^{-6}T^3 - 3,21 \cdot 10^{-8}T^4 + \\ + (9,4742 \cdot 10^{-5} - 1,2583 \cdot 10^{-5}T - 6,4928 \cdot 10^{-8}T^2 + 1,0515 \cdot 10^{-8}T^3 - \\ - 2,0142 \cdot 10^{-10}T^4)P + (-3,9064 \cdot 10^{-7} + 9,1061 \cdot 10^{-9}T - 1,6009 \cdot 10^{-10}T^2 + \\ + 7,994 \cdot 10^{-12}T^3)P^2 + (1,100 \cdot 10^{-10} + 6,651 \cdot 10^{-12}T - 3,391 \cdot 10^{-13}T^2)P^3;$$

$$B = -1,922 \cdot 10^{-2} - 4,42 \cdot 10^{-5}T + (7,3637 \cdot 10^{-5} + 1,7950 \cdot 10^{-7}T)P;$$

$$D = 1,727 \cdot 10^{-3} - 7,9836 \cdot 10^{-6}P.$$

Формула справедлива при для $0^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$, $0\% < S < 40\%$, $0 < P < 1000 \text{ кг/см}^2$.

В более поздней работе (2008 г.) Легоу предложил следующую формулу [12]

$$c = 1402,5 + 5T - 5,44 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,1 \cdot 10^{-4}T^3 + 1,33S - 1,23 \cdot 10^{-2}ST + \\ + 8,7 \cdot 10^{-5}ST^2 + 1,56 \cdot 10^{-2}h + 2,55 \cdot 10^{-7}h^2 - 7,3 \cdot 10^{-12}h^3 + \\ + 1,2 \cdot 10^{-6}h(\varphi - 45) - 9,5 \cdot 10^{-13}Th^3 + 3 \cdot 10^{-7}T^2h + 1,43 \cdot 10^{-5}Sh.$$

Продолжается дальнейшее совершенствование уравнений и методов расчета скорости звука. Для решения задач о распространении звука в море важно не абсолютное значение скорости, а зависимость скорости звука от глубины – профиль скорости звука, который возможно вычислить по формулам, приведенным выше, при наличии данных о распределении поля температур и соленостей по глубине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бьерно Л. Гидроакустика: от Аристотеля до наших дней / Л. Бьерно // Акуст. журн. – 2003. – Т. 49, № 1. – С. 30-37.
2. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане / В.И. Бабий. – Севастополь: НПП «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – 142 с.
3. Weissler A. The Velocity of Sound in Sea Water / A. Weissler, V.A. Del Grosso // J. Acoust. Soc. Am. 1951. – Vol. 23. – No. 2. – P. 219-223.
4. Mackenzie K.V. Formulas for the Computation of Sound Velocity in Sea Water (A) / K.V. Mackenzie // J. Acoust. Soc. Am. – 1960. – Vol. 32. – No. 1. – P. 100-104.
5. Wilson W.D. Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water / W.D. Wilson // J.

-
- Acoust. Soc. Am. – 1962. – Vol. 34. – No. 6. – P. 866.
6. Сташкевич А.П. Акустика моря / А.П. Сташкевич. – Л.: Судостроение, 1966. – 354 с.
 7. Del Grosso V.A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) / V.A. Del Grosso // J. Acoust. Soc. Amer. – 1974. – Vol. 56. – No. 4. – P. 1084-1091.
 8. Полосин А.С. Вычисление скорости звука в морской воде / А.С. Полосин // Вестник МГУ.– 1967.–Сер. 5.– География.– № 3.– С. 101-106.
 9. Leroy C.C. Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic Calculation of the Speed of Sound in Seawater / C.C. Leroy // J. Acoust. Soc. Am. – 1969. – Vol. 46. – No. 1B. – P. 216-226.
 10. Frye H.W. A New Equation for the Speed of Sound in Seawater / H.W. Frye, J.D. Pugh // J. Acoust. Soc. Am. – 1971. – Vol. 50. – No. 1B. – P. 384 – 386.
 11. Fofonoff N.P. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater / N.P. Fofonoff, R.C. Millard Jr. – UNESCO , 1983. – 44. – 54 p.
 12. Leroy C.C. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans / C.C. Leroy, S.P. Robinson, M.J. Goldsmith // J. Acoust. Soc. Am. – 2008. – 124. – No. 5. – P. 2774-2782.

Ярошенко О.О.

ОБЧИСЛЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В МОРСЬКІЙ ВОДІ. ВІД КОЛЛАДОНА І ШТУРМА ДО НАШИХ ДНІВ

У статті наводяться і аналізуються різні формули для обчислення швидкості звуку в морській воді залежно від температури, солоності та гідростатичного тиску. Знання вертикального розподілу швидкості звуку необхідне для точного виміру глибини місця судновими ехолотами.

Ключові слова: швидкість звуку, солоність, гідростатичний тиск

A.A. Yaroshenko

THE CALCULATION OF SOUND VELOCITY IS IN THE SEA WATER. FROM COLLADON AND STURM TO OUR DAYS

In the article described and analysed the various formulas to the compute the sound velocity in the seawater as a function of a temperature, salinity and hydrostatic pressure. Knowledge of the vertical distributing of the sound velocity is necessary for accurate measurement of the depth of shipboard sonar.

Keywords: sound velocity, salinity, hydrostatic pressure

УДК 004.9

Богом'я В.І., Бондаренко С.І., Кривенко Н.В.

РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ПАСАЖИРСЬКИХ СУДАХ

У даній статті розглянуті можливості використання систем динамічного позиціонування для пасажирських суден. На основі проведеного аналізу запропоновано використання систем динамічного позиціонування на пасажирських судах для запобігання людських жертв та зменшення пошкоджень в аварійних ситуаціях і аваріях.

Ключові слова: система динамічного позиціонування, пасажирські судна, аварійні ситуації, людський фактор.