

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ДОППЛЕРОВСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

A.H. Греков, Д.В. Степаненко

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

*В статье подробно рассмотрены погрешности акустических допплеровских профилографов течений (АДПТ). На примерах дана оценка величины этих погрешностей: от скорости звука, отклонения прибора, допплеровского сдвига частоты и перемещений прибора.*

**Введение.** При исследовании течений в океанах и морях в последнее время отдают предпочтение допплеровским измерителям скорости течений. Цель настоящей статьи – показать возможности этих измерителей и очеркнуть границу их применимости в сравнении с гидрологическими вертушками и их аналогами.

Известно, что акустические допплеровские профилографы скорости течения, работающие в импульсном режиме, зондируют водную толщу снизу вверх или сверху вниз двумя или более остронаправленными лучами [1, 2]. Акустические сигналы, отраженные от неоднородностей воды, несут в себе информацию о скорости течения, плотности отражателей и дальности до слоев в виде соответственно допплеровского сдвига частоты, амплитуды и временной задержки.

Величина допплеровского сдвига несущей частоты излученного сигнала зависит от скорости течения, которая определяется по формуле [3]

$$V = \frac{c \Delta f}{2 F_s \cos \alpha} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость течения;  $C$  – скорость распространения акустического сигнала в воде в точке или слое отражения;  $\Delta F$  – разность частот двух принятых сигналов;  $F_s$  – излучаемая частота;  $\alpha$  – угол

между осью акустического луча и вектором скорости течения.

**Постановка задачи.** Скорость течения, измеренная с помощью АДПТ, отличается от реальной скорости потока, и это зависит от следующих факторов [4]:

- не знание истинного профиля скорости звука по акустическим трассам измерителя;
- отклонение прибора от вертикального положения;
- не соответствие допплеровского сдвига частоты в точке отражения реальной скорости течения;
- перемещение прибора по вертикали.

Сделаем подробный **анализ этих факторов**. В реальной среде скорость звука зависит от стратификации и может изменяться по акустической трассе в море и водоеме на единицы процентов. Это приводит как к погрешностям измерения скорости потока, так и к погрешностям пространственной привязки по трассе результатов измерения. Как известно, скорость звука в океане изменяется приблизительно от 1450 до 1540 м/с. Следовательно, не учет скорости звука дает максимальное значение погрешности 5 % при измерении расстояния до слоя. Это означает, что при измерении профиля вектора скорости течения до глубин 100 м ошибка в определении расстояния до слоя может достигать 5 м. Однако такие погрешности не типичны для большей части Мирового океана, но характерны для шельфовой зоны. Кроме того, скорость звука напрямую входит в измерительное уравнение АДПТ, что в свою очередь влияет на погрешность определения скорости течения. В этом случае для коррекции показаний АДПТ проводят измерения скорости звука по всей акустической трассе. Делают это при помощи непосредственно измерителей скорости звука (погрешность лучших измерителей составляет 0,01 %) или рассчитывают из результатов зондирования CTD-приборами. Вопрос точности используемых эмпирических формул для определения скорости звука в воде является на сегодняшний день открытым.

Основная причина очевидно в том, что различные исследователи использовали свою аппаратуру и методику измерения при определении скорости звука в

воде, температуры, солености и давления. Например, три широко используемых эмпирических уравнений (Wilson W.D., 1960 [5]; V.A. Del Grosso, 1974 [6]; C-T. Chen и F.J. Millero, 1977 [7]) дают расхождение между собой по скорости звука 0,5 м/с, хотя измерения выполнялись в лабораторных условиях на специализированном оборудовании. В 1993 г. J.M. Pike и F.L. Beiboer [8] сделали сравнение трех вышеупомянутых формул для расчета скорости звука. По их мнению, использование уравнения Wilson W.D. нецелесообразно. Формулу C-T. Chen и F.J. Millero можно использовать только для континентального шельфа, в то время как формулу Del Grosso необходимо использовать для глубинных океанских вод.

Эти погрешности в итоге входят в погрешность измерения АДПТ. Помимо этого, профиль скорости звука подвержен пространственно-временной изменчивости, и нет основания считать профиль скорости звука «замороженным» после его измерения каким-нибудь из предложенных методов. Еще одним обстоятельством, негативно сказывающимся на точности измерения АДПТ, является расходящиеся акустические лучи. Так как профиль скорости звука измеряется чаще всего по вертикали, нельзя утверждать наверняка, что он будет соответствовать профилям скорости звука по всем трем или четырем измерительным лучам АДПТ.

Отклонение прибора (крен и дифферент) от вертикальной оси приводит к тому, что отраженные акустические сигналы, пришедшие в один и тот же момент времени, соответствует разным слоям.

Несоответствие отраженных сигналов в определенный момент времени одному слою приводит к тому, что искаются значения векторов скорости течения в профиле, причем величина искажения растет по мере удаления слоя от профилографа. Это видно из рис. 1, где угол  $\beta$  равен углу отклонения профилографа от вертикали  $n$ . Расстояние  $\Delta h$  между точками  $H_1$  и  $H_2$ , измеряемое по оси, может быть выражено через углы  $\gamma$ ,  $\beta$  и путь  $S$ , проходимый лучом за определенный промежуток времени:

$$\Delta h = 2S \sin \beta \sin \gamma. \quad (2)$$

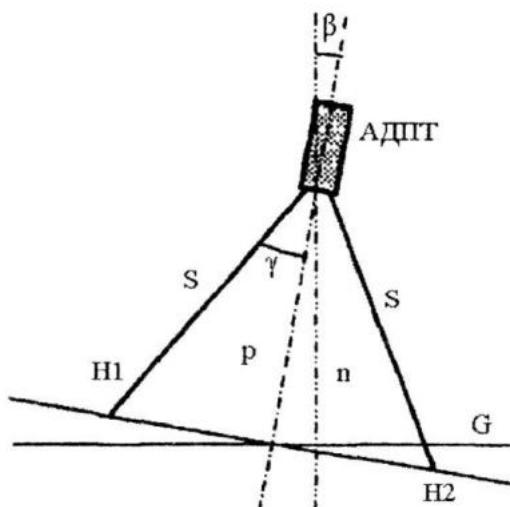


Рис. 1. Геометрия лучей профилографа

Значение  $\Delta h$  определяет расстояние между горизонтальными слоями воды, которые пересекают лучи, пройдя путь  $S$ . Для наглядности, путь  $S$ , проходимый лучом, в выражении (2) удобнее заменить значением дистанции зондирования  $h$ , тогда (2) преобразуется в следующее уравнение

$$\Delta h = 2h \cdot \tan \gamma \cdot \sin \beta. \quad (3)$$

Так в случае ориентации лучей профилографа с углом отклонения  $\gamma=30^\circ$  относительной собственной оси, при отклонении прибора от вертикали  $\beta=10^\circ$ , на глубине  $h=200$  м,  $\Delta h$  будет равно 39 м. Это значит, что при измерении, например, вектора скорости течения на глубине 200 м, отраженный сигнал одного луча будет фактически нести информацию о векторе скорости течения для глубины 182 м, а другой для глубины 218 м.

Для исключения методической погрешности, вызванной отклонением прибора от вертикали, в АДПТ предусмотрена процедура коррекции. Однако, о способе ее введения ни в литературе, ни в техническом описании приборов ничего не сообщается. Если предположить, что процедура введения коррекции основывается на указанных тригонометрических соотношениях, тогда величина методической погрешности будет целиком зависеть от инструментальной погрешности измерения указанных углов, а также погрешности измерения пути  $S$ , который проходит акустический сигнал.

В проспектах ведущих фирм, производящих АДПТ, указано, что углы крена и дифферента измеряются с погрешностью от  $0,1^\circ$  до  $2^\circ$ . Для примера возьмем среднее значение в  $1^\circ$ . При этом погрешность в определении слоя для глубины 104 м составит 2,26 м или 0,6 %. Определить влияние наклона прибора на результат измерения профиля скорости течения не представляется возможным, так как оно зависит от распределения скоростей течения по измеряемому профилю. В худшем случае, когда величина или направление скорости течения в соседнем слое существенно отличается от них же в измеряемом слое, погрешность может достигать 100 %.

Измерения с помощью АДПТ осуществляются в предположении, что доплеровский сдвиг частоты зондирующего сигнала адекватно соответствует скорости переноса водных масс в выделенных для анализа слоях. На практике это не всегда оказывается так. Дело в том, что реально профилограф измеряет не скорость течения воды, а скорость движения частиц находящихся в воде, так как акустический луч может в достаточной мере отражаться только от твердых частиц находящихся в воде (взвеси, планктон, пузырьки) [9], или различных градиентов (температуры, плотности). В этом случае принимается второе допущение, что скорость частиц, от которых отражается акустический сигнал, адекватно соответствуют скорости движения воды. Это допущение верно, если рассматривать пассивные частицы, когда же речь идет о малых подвижных активных объектах, таких как маленькие рыбки и других представителях фауны подводного мира, то скорость и направление их движения может не совпадать с направлением и скоростью движения водных масс. Это, например, касается стай рыб. Во многих случаях этой методической погрешности можно избежать, проанализировав данные непосредственно во время измерения. Коэффициент отражения от стаи рыб будет во много раз большим, чем от обычных взвесей, растворенных в воде. А также будет замет-

но изменение значений результатов измерения, тогда полученные данные можно будет интерпретировать, как выброс и исключить их из выборки осреднения. Когда же профилограф работает автономно и записывает результаты в память без визуального контроля оператора, ошибочные выбросы результатов измерения могут попасть в выборки усреднения и исказить окончательный результат измерения. Также выбросы могут попасть в выборку усреднения в тех случаях, когда концентрация рыб в стае не велика, и стая двигается не очень быстро, тогда не происходит резкого скачка коэффициента отражения и изменения направления скорости течения. Такие условия измерений трудно прогнозировать, так как они носят случайный непредсказуемый характер.

Исключить указанную методическую погрешность можно векторным осреднением результатов измерения на больших выборках, но это может привести к нежелательным искажениям результатов измерения по причинам, которые были указаны выше.

Вертикальное перемещение профилографа может быть вызвано соответствующими вертикальными перемещениями объекта, на котором он установлен. В свою очередь, перемещение самого объекта обусловлено, как правило, наличием поверхностного волнения. Высота волн в океане лежит в пределах от 2 до 20 м для типичной скорости ветра от 10 до 30 м/с. Как известно [10], отдельные районы Мирового океана сильно различаются по интенсивности волнения, как из-за различий в условиях погоды, так и из-за разных размеров акватории. Наиболее часто в океанах встречается крупная зыбь с высотами волн порядка метров, чем развитые ветровые волны. Но если даже не брать экстремальные значения высоты волн, то высота волны в 3-5 м будет давать соответствующее смещение профиля на 3-5 м. Уменьшить значение этой методической погрешности может введение векторного осреднения результатов измерений. Однако для этого необходим

достаточно длинный ряд измерений, если же судно производит измерения на ходу, то это приведет к осреднению значения вектора скорости течения на определенном расстоянии, что может исказить реальную картину скоростей течения в областях океана, имеющих большую пространственную изменчивость. В общем же случае необходимо определение уровня волнения, при котором не имеет смысла проводить измерения из-за слишком большого значения компоненты погрешности из-за него. В настоящее время такой оценки допустимого уровня волнения нет, каждый исследователь определяет ее субъективно или не определяет вовсе.

**Заключение.** Сделанный в статье анализ и приведенные примеры показывают, что к полученным результатам измерения с помощью АДПТ следует относиться с осторожностью. Особенно для больших глубин (от 1 км и более) от допплеровского измерителя невозможно получить точный количественный результат, поскольку эти приборы перед проведением измерений невозможно обеспечить априорной информацией о профиле плотности и другим данными, рассмотренными выше.

Однако преимущества этих измерителей перед зондирующими, несомненно, есть и заключаются они в получении почти мгновенных значений осредненных по слою векторов скорости течения и концентрации взвеси с грубой привязкой по глубине, т.е. они являются индикаторами.

Кроме того, проведенные исследования в работе [11], где проводились лабораторные испытания АДПТ и его натурные сравнения с механическими вертушками и другими измерителями скорости, показали, что в лабораторных условиях погрешность измерения скорости течения составляет 0,51 % и 1,10 % в зависимости от установки АДПТ. В натурных условиях при измерении расхода воды в реках ошибка измерения АДПТ составила в среднем 5 %. Таким образом, практика показывает, что в ряде

случаев индикаторы могут давать удовлетворительную точность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oceanography Applications and Products* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sontek.com/oceanography.php>.
2. *Products* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nortek-as.com/en/products>.
3. *Gordon R.L. Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation: A Practical Primer / R.L. Gordon.* – RD Instruments, 1996. – 54 p.
4. *Храбров А.А. Исследование метрологических характеристик акустического допплеровского профилографа скорости течения: дис. ... к.т.н.: 05.11.16 / Храбров Алексей Анатольевич.* – С.-Пб., 2004. – 166 с.
5. *Wilson W.D. Equation for the Speed of Sound in Seawater. J Acoust Soc Am, 32(10), 1960.* – 1367 p.
6. *Del Gross V.A. New Equation for the Speed of Sound in Natural Waters (with Comparisons to Other Equations). J Acoust Soc Am, 56(4), 1974.* – P. 1084 – 1091.
7. *Chen C-T. and Millero F.J. Speed of Sound in Seawater at High Pressures. J Acoust Soc Am, 32(10), 1977, p. 1357.*
8. *Pike J.M. and Beiboer F.L. A Comparison Between Algorithms for the Speed of Sound in Seawater. The Hydrographic Society, Special Publication No. 34.* 1993.
9. *Виноградов М.Е. Вертикальное распределение океанического зоопланктона / М.Е. Виноградов.* – М.: Наука, 1968. – 113 с.
10. *Физика Океана / под ред. А.С. Монина.* – М.: Наука, 1978. – 455 с.
11. *Kevin Oberg and David S. Mueller. Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 12, December 1, 2007.*