

АКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН

*А.Н.Греков, Д.М.Васильев,
М.Н.Котов*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Проведен анализ работы акустического волнографа. Приведены структурная схема, описание работы и алгоритм программы управления прибором, а также результаты испытаний на малых глубинах в опытовом бассейне и результаты натуральных испытаний в бухте.

Акустические волнографы предназначены для измерения высоты и периода поверхностных волн. Известны приборы аналогичного назначения различных фирм. Например, автономный измеритель волнения SBE-26, предназначенный для наблюдения за волнением в открытом море. Время наблюдения 1–30 секунд, частота измерения 2 Гц [1]. В качестве измерителя волнения используется датчик гидростатического давления. Диапазон измерения глубины 0–20 метров с точностью 0,01%. Аналогичный прибор создан в центральном конструкторском бюро гидрометеорологического приборостроения (волнограф ГМВ), который измеряет параметры волн с периодом 1–25 с, высотой 0,1–20 метров с погрешностью $0,5 \pm 0,002$ м [2]. И прибор WTR 9 с глубиной постановки 0–60 метров, при этом диапазон измерения высоты волн 0–20 метров с точностью 2 сантиметра и диапазон измерения периода волн 0–20 секунд с точностью 0,02 секунды [3].

Этим приборам свойственен недостаток: необходимо использовать гидродинамическую модель, которая учитывает изменение давления жидкости от высоты поверхностных волн в зависимости от глубины расположения измерителя. На глубине, больше половины длины волны, возмущение от поверхностных волн на датчик давления практически отсутствует. И если поместить ниже этого уровня датчик давления, то его показания будут соответствовать среднему давлению и не зависеть от поверхностного волнения и,

соответственно, измерить параметры будет невозможно. Поэтому данные модели волнографов корректно работают на глубине от 5 до 20 метров. В буе прибрежного мониторинга СМВ 4280 используется датчик высоты волн на базе акселерометра. Однако, долговременная постановка такого буя проблематична.

В основе акустического способа измерения высоты и периода волн лежит принцип отражения акустических волн от границы раздела вода-воздух. Разработанный в ОАОИ МГИ акустический волнограф устанавливается на карданном подвесе на глубине и излучает зондирующий импульс перпендикулярно поверхности моря. При данном методе измерения непосредственно формируется реализация поверхностных возвышений, и период волны может измеряться прямым счетом.

Внешний вид измерителя параметров волн представлен на рисунке 1.

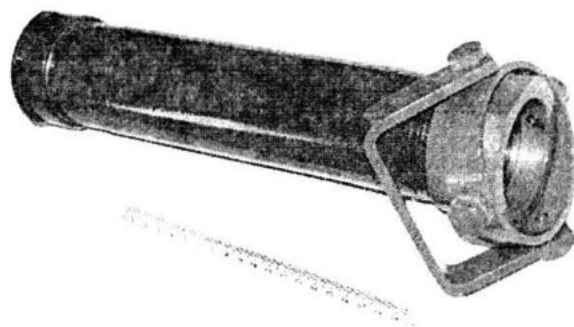


Рисунок 1 – Внешний вид измерителя параметров волн

Принцип работы измерителя показан на рисунке 2.

Если в толще воды установлены излучатель акустического сигнала И и приемник П с базой L между ними, то путь S , проходимый акустическим сигналом от излучателя до поверхности воды и обратно до приемника, определяется выражением [4]

$$S = 2 \cdot l = 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} = C \cdot t, \quad (1)$$

где h – расстояние, от уровня установки излучателя и приемника до поверхности воды;

C – скорость звука в воде;

t – время прохождения акустическим сигналом пути S ;

L – расстояние между передатчиком и приемником;

l – путь, проходимый сигналом от излучателя до поверхности воды.

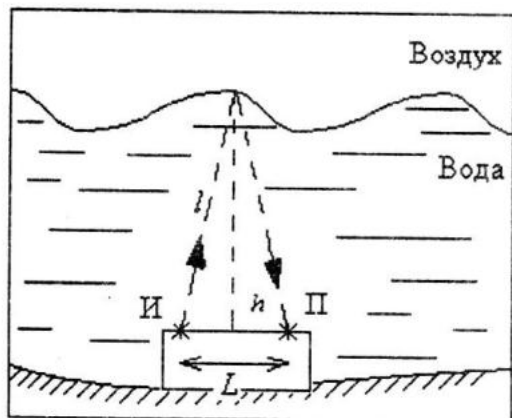


Рисунок 2 – Принцип работы акустического волнографа

Из выражения (1) следует, что глубина определяется соотношением

$$H = \sqrt{\left(\frac{C \cdot t}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}. \quad (2)$$

Т.к. $h \gg L$ (для излучения и приема используется один облучатель), то величина $\left(\frac{L}{2}\right)^2$ будет мала по сравнению

с величиной $\left(\frac{C \cdot t}{2}\right)^2$ и, пренебрегая ею, можно считать

$$h \approx \frac{C \cdot t}{2}. \quad (3)$$

Для определения высоты волны H используется разность между максимальной и минимальной глубиной h (рис. 3), полученной по формуле (3)

$$H = h_{\max} - h_{\min} = \frac{C}{2}(t_{\max} - t_{\min}). \quad (4)$$

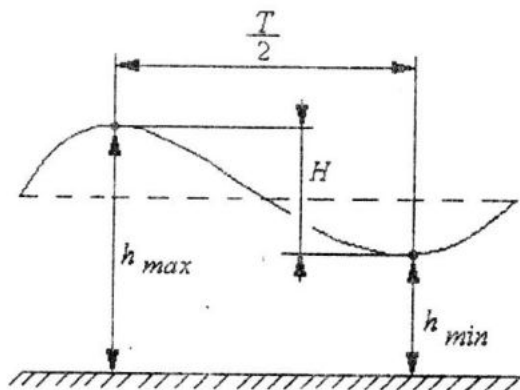


Рисунок 3 – Определение параметров волн по известным h_{\max} и h_{\min}

Рассмотрим составляющие погрешности волнографа при измерении высоты волны. Поскольку, пьезоизлучатель работает на частоте 1,16 МГц, то длина волны в воде составляет $\sim 0,13$ см, и это для импульсного метода измерения является разрешением по дальности, при этом погрешность от дрожания фронта не превысит 1 см.

Вторая составляющая погрешности обусловлена изменением средней скорости звука на трассе акустического луча. Используя уравнение (4) и границы диапазона изменения скорости звука для морской воды (1300÷1550 м/с), для максимальной высоты волны (10 м) погрешность определения высоты может достигать $\sim 0,8$ м. Учитывая, что волнограф планируется установить на шельфе Черного моря, где диапазон изменения скорости 1450÷1511 м, то без корректировки погрешность может достигать $\sim 0,2$ м.

Ширина диаграммы направленности для разработанного волнографа с учетом диаметра и частоты пьезокерамической пластинки составляет $1,53^\circ$ [5]. Поэтому диаметр пятна на поверхности моря при максимальной глубине постановки прибора 50 м не превысит 1,4 м. В работе [6] приведена оценка искажения формы измеряемого спектра возвышений и ошибки измерения средней высоты волны. Отфильтрованная пятном средняя высота волны определяется уравнением $A = 0,05DM$ и в нашем случае составит 0,067 м.

Следовательно, основной вклад в погрешность определения высоты волны вносит составляющая погрешности от из-

менения скорости звука. Величину этой погрешности можно уменьшить, используя данные о скорости звука для конкретного района постановки прибрежной станции.

Период волн определяется как разность времени между двумя соседними максимумами (или минимумами)

$$T = |t_2 - t_1|. \quad (5)$$

Учитывая, что диаметр пятна может достигать 1,4 м, длина достоверно регистрируемых поверхностных волн, составляет 2,8 м, что соответствует минимальному периоду волны 1 с.

Структурно акустический волнограф можно представить в виде двух крупных блоков: приемника и передатчика, соединенных с устройством управления и обработки данных, и использующих для излучения зондирующего импульса и приема отраженного эхоимпульса один пьезокерамический датчик. Обобщенная структурная схема акустического волнографа представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Обобщенная структурная схема акустического волнографа

По «стартовому» сигналу с устройства управления и обработки данных передатчик формирует электрический радиоимпульс требуемой амплитуды и длительности. Сформированный импульс подается на датчик, представляющий собой пьезокерамическую пластину, которая преобразует электрические колебания в акустические, и дальше излучается в направлении поверхности воды. Отражившись от границы раздела вода-воздух (двух неоднородных в акустическом отношении сред), акустические колебания поступают на датчик и преобразовываются им в электрические. Далее сигнал подается на приемник, который представля-

ет сигнал в удобной для дальнейшей обработки форме (формирует «стоповый» сигнал). С приемника «стоповый» сигнал подается на устройство управления и обработки данных, которое измеряет время t , прошедшее с момента формирования «стартового» сигнала до момента прихода «стопового» сигнала. При известном t по формуле (3) вычисляется расстояние h_i , запоминается и хранится в памяти устройства. Затем цикл повторяется заново.

После некоторого количества таких циклов представляется возможным определить h_{max} и h_{min} . Эти данные могут быть представлены как в форме мгновенных значений $h(t)$, так и в форме зависимости высоты волн от времени.

В качестве устройства управления и обработки данных используется микроконтроллер PIC16F877 (МК), в который интегрирован счетчик с возможностью «захвата времени на лету». Для обеспечения автономности прибора в схему также включена флэш-память.

Алгоритм программы управления акустическим волнографом представлен на рисунке 5.

Подача питания на плату волнографа включает МК и запускает программу.

После процесса инициализации начинается основной цикл работы контроллера:

1. Пуск таймера, и очистка его регистров
2. Формирование импульса, запускающего генератор зондирующего импульса
3. Далее в зависимости от того, будет ли волнограф работать с Временными воротами (ВВ) или без, происходит выбор дальнейших операций:

Если режим работы без ВВ, то программа в течение времени $T1$ порядка 10 мс ожидает прием первого отраженного импульса.

Если же режим ВВ включен, то сначала МК отбрасывает в течение времени $T2$ все принимаемые импульсы. По истечении этого времени, микроконтроллер ожидает прихода ближайшего ответного импульса еще в течении $T3$.

4. В случае удачного исхода, по интерфейсу RS232 данные измерений поступают на центральный модуль, где дальше и обрабатываются по формуле (3) непосредственно в расстояние h .

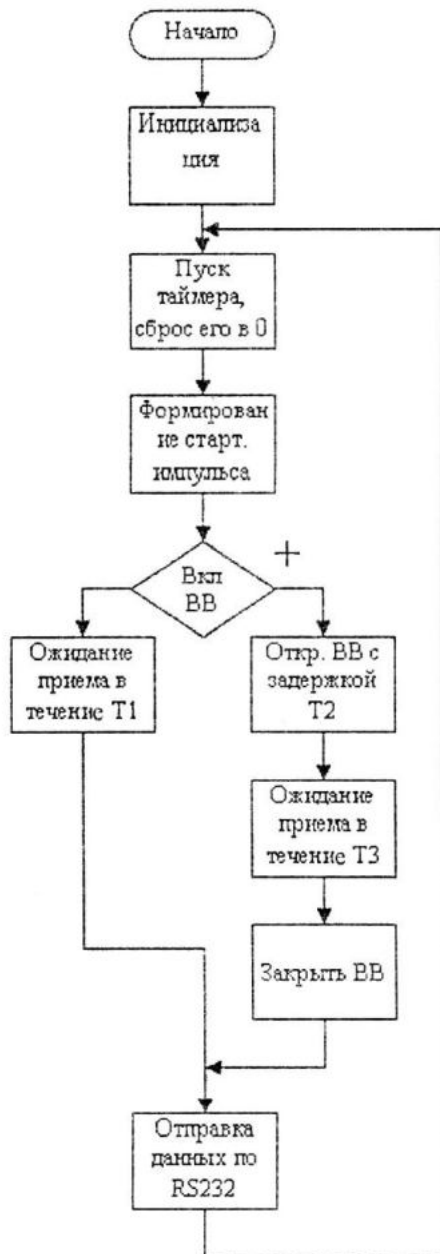


Рисунок 5 – Алгоритм работы МК

Структурная схема ИПВ представленная на рисунке 6. Передатчик состоит из управляемого генератора УГ, буферного каскада БК и резонансного усилителя РУ. Управляемый генератор формирует радиоимпульсы с прямоугольной огибающей и высокочастотным гармоническим заполнением, когда на его вход воздействует стартовый импульс. Период следования и длительность генерируемых импульсов зависят от глубины постановки волнографа и определяются периодом следования и длительностью стартовых импульсов. Частота заполнения импульса постоянна и равна резо-

нансной частоте пьезокерамического датчика. Буферный каскад служит для согласования генератора с усилителем и для того, чтобы последующие каскады не влияли на работу генератора. Резонансный усилитель усиливает сигнал до напряжения 100 В и подает его на датчик.

Такой уровень напряжения необходим для обеспечения работы волнографа на глубинах порядка 50м. Его можно достигнуть, если между выходом резонансного усилителя и датчиком подключить повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации напряжения 1:5.

Приемник состоит из входной цепи ВЦ, усилителя радиочастоты УРЧ, амплитудного детектора АД и формирователя импульсов ФИ. Входная цепь и усилитель радиочастоты обеспечивают прием, выделение принятого эхоимпульса из смеси сигнала и шума и усиление высокочастотного сигнала до уровня, достаточного для детектирования. Амплитудный детектор выделяет из сигнала низкочастотную составляющую. Форма сигнала на его выходе повторяет форму огибающей высокочастотного сигнала на его входе. Продетектированный сигнал имеет, как правило, колоколообразную форму. Поэтому часто бывает сложно определить точный момент прихода эхоимпульса, в результате чего возникает большая погрешность измерений. Для устранения этого нежелательного эффекта в схеме применяется формирователь импульсов, который представляет собой ключевую схему. Пока напряжение на входе формирователя импульсов не достигнет некоторого порогового уровня, на его выходе напряжение равно нулю. Как только напряжение на входе ФИ превышает пороговый уровень, на его выходе устанавливается постоянное напряжение до тех пор, пока напряжение на его входе превышает пороговый уровень. Таким образом, из размытых колоколообразных импульсов формируются прямоугольные «стоповые» импульсы, которые подаются на микропроцессор.

Чтобы зондирующий импульс не попал непосредственно на вход приемника через пьезокерамический датчик, а отраженный эхоимпульс не попадал на выход передатчика, необходимо использовать развязывающий каскад. В простейшем виде это два включенных встречно и параллельно диода.

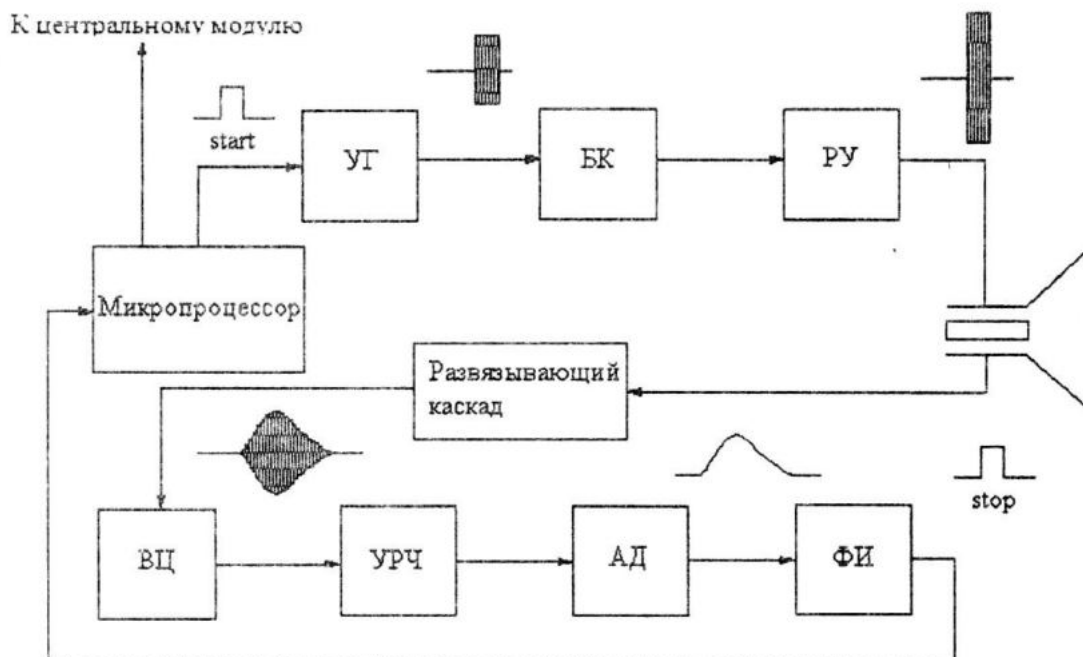


Рисунок 6 – Структурная схема акустического измерителя параметров волн

Информация передается в центральный модуль для последующей обработки.

Испытания ИПВ на малых глубинах проводились в опытовом бассейне СевНТУ. В ходе эксперимента ИПВ располагался в центре бассейна на глубине 1 м на расстоянии 5 м от волнопродуктора. Т.к. прибор рассчитан для установки на глубинах до 50 м, то при испытаниях имели место множественные переотражения зондирующего импульса. Для устранения этого эффекта на программном уровне, были сформированы временные ворота. Для их формирования, из эксперимента был произведен подсчет количества принятых переотраженных импульсов. При излучении одного зондирующего импульса принималось 4 отраженных импульса. Продолжительность приема и устойчивого детектирования всех переотраженных эхоимпульсов составляет 8 мс, после чего их амплитуда становится ниже порога срабатывания формирователя импульсов. Исходя из условия, что последующий зондирующий импульс должен излучаться только после того, как все переотраженные эхоимпульсы от предыдущего зондирующего импульса затухнут, был выбран период следования зондирующих импульсов. Он составил 100мс.

После отправки зондирующего сигнала, микроконтроллер переходит в режим ожидания. Как только на вход микроконтроллера поступает первый стоповый импульс, в соответствующие регистры копируется текущее значение счетчика. После этого микроконтроллер игнорирует все дальнейшие импульсы до момента отправки следующего стартового импульса и повторения всего цикла измерений.

Испытания проводились в двух режимах: стоячих и бегущих волн. Для обеспечения последнего, в конце бассейна устанавливался волногаситель. В режиме бегущих волн испытания проводились в диапазоне волн от $T = 2$ с, $A = 10$ см до $T = 1$ с, $A = 30$ см. Параллельно с испытаниями ИПВ, те же волны записывались гидродинамическим волнографом [7]. Сравнительный анализ показаний акустического и гидродинамического волнографов представлен на рисунке 7.

Кроме того, была проведена проверка дальности действия ИПВ. Прибор был установлен у одной из стенок опытового бассейна параллельно поверхности воды на глубине 1 м и направлен в сторону противоположной стенки.

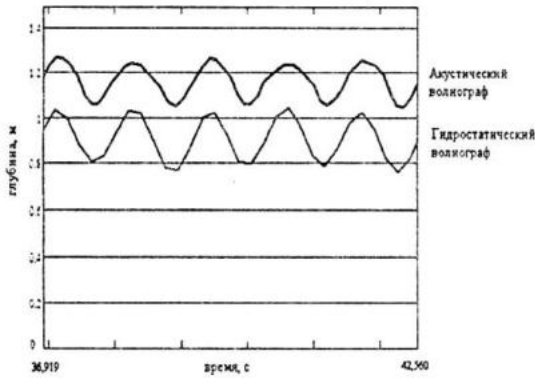


Рисунок 7 – Показания акустического и гидродинамического волнографов

Измерения дальности были ограничены максимальным расстоянием между стенками бассейна, составляющим 10 м. ИПВ стабильно принимал сигнал, отраженный от противоположной стенки. После чего, не прекращая измерений, трасса акустической волны была укорочена в 2 раза, путем установки перпендикулярно направлению измерения плоского экрана на расстоянии 5 м. напротив прибора. При этом показания на индикаторном устройстве уменьшились в 2 раза. Результаты эксперимента представлены на рисунке 8.

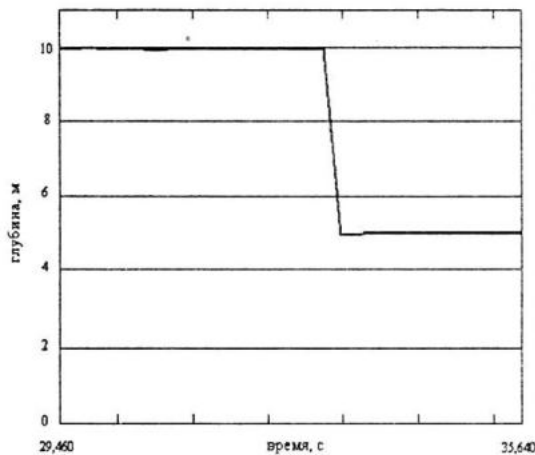


Рисунок 8 – Результат исследования дальности действия ИПВ

Натурные испытания ИПВ проводились на причале в Севастопольской Артбухте. Глубина погружения прибора составляла около 4 м. Фиксировались волны, вызванные прохождением пассажирских катеров. ИПВ продемонстрировал стабильную работу и высокую разрешающую способность. Пример записи волнения представлен на рисунке 9.

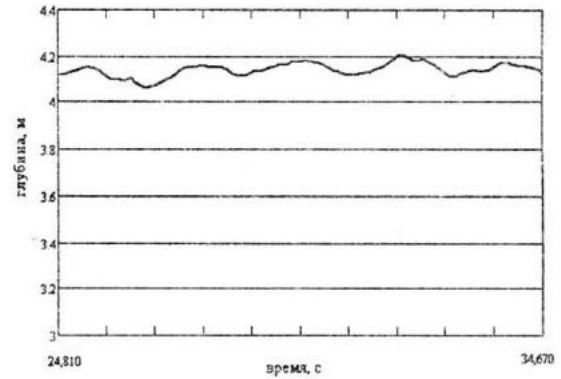


Рисунок 9 – Пример записи волнения ИПВ при натуральных испытаниях

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.seabird.com>.
2. <http://www.ckb-gmp.ru>.
3. <http://www.infomarcompany.com>.
4. Федоров И.И. Эхолоты и другие гидроакустические средства. — Л.: Электро-связь, 1960. — Т. 5. — 368 с.
5. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник. — Л.: Судостроение, 1984. — 302 с.
6. Парицкий А.С. Фильтрация спектра морского волнения волнографом конечного размера // Неконтактные методы измерения океанографических параметров. — М.: Гидрометеониздат, 1977. — С. 105 – 112.
7. Греков А.Н., Греков Н.А, Строганов А.С. Автоматизированный гидродинамический волнограф // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь, 2004. — С. 52 – 57.