

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЗРАЧНОМЕРАМИ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТА В ВОДНЫХ СРЕДАХ

В.И. Маньковский

Морской гидрофизический институт
НАНУ

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: emankovskaya@mail.ru

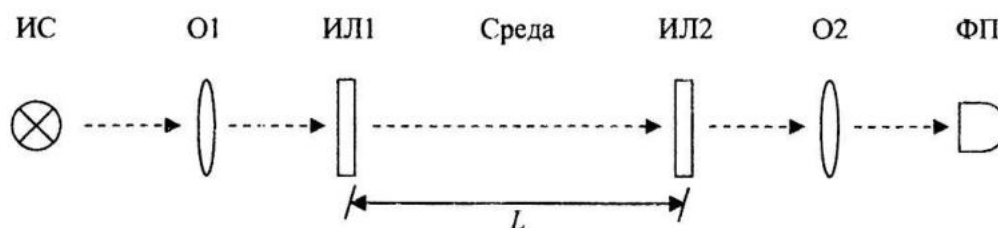
Используя методы фотометрии светового луча, рассматриваются некоторые методические аспекты определения показателя ослабления света в водных средах фотометрами-прозрачномерами.

Прозрачномеры в физической оптике относятся к классу фотометров – приборов измеряющих энергию, переносимую оптическим излучением в какой либо среде. В результате поглощения и рассеяния света в среде энергия светового луча ослабевает. В гидрооптике рассматривается ослабление в воде луча света с

малой угловой расходимостью, практически параллельного. Ослабление такого направленного светового луча в среде оценивают коэффициентом пропускания, представляющем собой отношение интенсивности луча света, прошедшего через среду, к его начальной величине $T_{cp} = F / F_0$. Он связан с оптической плотностью среды соотношением $\tau_{cp} = \ln(1/T_{cp})$. Оптическая плотность определяется через показатель ослабления света средой ϵ_{cp} как $\tau_{cp} = \epsilon_{cp}L$, где L – расстояние, пройденное световым лучом в среде. Показатель ослабления света средой $\epsilon_{cp} = \tau_{cp} / L$; выражают его в обратных метрах (m^{-1}).

Рассмотрим некоторые методические аспекты определения показателя ослабления света фотометрами-прозрачномерами в водных средах, используя методы фотометрии светового луча.

Оптическая схема прозрачномера. На рис. 1 показана принципиальная оптическая схема прозрачномера.



Р и с. 1. Оптическая схема прозрачномера: ИС – источник света; О1 – объектив, формирующий направленный пучок света; О2 – объектив фотоприемника; ИЛ1, ИЛ2 – иллюминаторы; ФП – фотоприемник; L – оптическая база прозрачномера

Световой луч интенсивностью F , выходящий из источника света, по пути до фотоприемника ослабляется оптическими деталями прозрачномера и средой, находящейся в его базе. Напряжение на выходе фотометра

$$V = FT_{\text{приб}}T_{\text{илл}}T_{\text{ср}}SK_{\text{ус}}, \quad (1)$$

где F – интенсивность светового луча (люмен), выходящего из источника света; $T_{\text{приб}}$ – коэффициент пропускания света

оптическим трактом прибора (кроме внешних граней иллюминаторов); $T_{\text{илл}}$ – коэффициент пропускания света внешними гранями иллюминаторов; $T_{\text{ср}}$ – коэффициент пропускания света средой, находящейся в базе прозрачномера; S – коэффициент преобразования светового потока, падающего на фотоприемник, в напряжение на его выходе (вольт/люмен); $K_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления сигнала с фотоприемника.

Для определения оптической плотности среды, находящейся в базе прозрачномера, необходимо измерить нулевой сигнал, соответствующий яркости светового луча, входящего в базу. В формуле (1) это соответствует условию $T_{cp} = 1$, то есть

$$V_0 = FT_{приб} T_{илл} SK_{yc}. \quad (2)$$

При условии неизменности всех параметров фотометра, входящих в формулу (1), оптическая плотность среды и показатель ослабления, согласно закону Бугера ослабления света в мутных средах, определяются как

$$\tau_{пд} = \ln\left(\frac{V_0}{V}\right) = \ln\left(\frac{1}{T_{пд}}\right);$$

$$\varepsilon_{cp} = \tau_{cp}/L. \quad (3)$$

Отметим, что согласно формуле (3), если выполняется условие неизменности параметров фотометрической схемы, нет необходимости производить градуировку прозрачномера с помощью эталонных ослабляющих светофильтров. Для соблюдения этих условий необходимо использовать фотодиоды с линейной световой характеристикой и применять схемы, обеспечивающие либо стабильность параметров фотометра, либо учитывающие их изменчивость. Для этого разработан ряд методов, которые здесь не рассматриваются.

Чтобы использовать формулу (3) при измерениях в воде, необходимо знать величину V_0 для воды. Для этого используют два метода: 1) определяют величину V_0 на воздухе и вводят затем в результаты измерений в воде поправку на просветление иллюминаторов; 2) проводят измерения в эталонной воде. Рассмотрим эти методы.

Метод поправки на просветление. Современные морские прозрачномеры делают, как правило, с короткой базой длиной 0,25 м и меньше. При $L = 0,25$ м оптическая плотность воздуха в базе для длины волны $\lambda = 550$ нм составит $\tau_{возд} = \varepsilon_{возд} L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$

[1, табл. 1. 2]. Коэффициент пропускания будет равен

$T_{возд} = \exp(-\tau_{возд}) = 0,99995$. То есть, с высоким приближением можно считать при измерении нулевого сигнала на воздухе коэффициент пропускания воздушной среды в базе такого прозрачномера $T_{пд} = 1$. С учетом спектральной изменчивости показателя ослабления света в воздухе $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon(550)_{возд} (550/\lambda)^a$, для которого величина a (параметр Ангстрема) лежит в пределах 0,5 – 1,5 единицы, условие $T_{возд} = 1$ практически будет соблюдаться для всех длин волн в видимом диапазоне.

Соотношение (3) с величиной $V_{(возд)0}$ определенной на воздухе, можно использовать при измерениях в воде, вводя поправку на просветление иллюминаторов. Суть ее состоит в том, что при погружении прозрачномера в воду изменяется величина $T_{илл}$ из-за изменения коэффициента отражения света на внешних гранях иллюминаторов в воде по сравнению с воздухом. В воде коэффициент отражения намного меньше, вследствие чего меньше потери света за счет отражения, и интенсивность проходящего через воду пучка света возрастает по сравнению с воздухом. То есть, для воды величина $V_{(вода)0}$ будет больше, чем на воздухе. Поправка на просветление определяется следующим образом.

Коэффициент пропускания светового луча при прохождении его через границу двух сред выражается формулой

$$T_{cp1/cp2} = (1 - r), \quad (4)$$

где r – коэффициент отражения света на границе. При количестве границ равно N

$$T_{cp1/cpN} = (1 - r_1)(1 - r_2) \dots (1 - r_N). \quad (5)$$

Если коэффициент отражения на всех границах одинаков

$$T_{cp1/cpN} = (1 - r)^N. \quad (6)$$

В схеме прозрачномера (рис. 1) таких границ для $T_{\text{илл}}$ две: для светового пучка, выходящего через первый иллюминатор ИЛ1 в среду и при вхождении светового пучка из среды во второй иллюминатор ИЛ2.

По формуле (6) коэффициент пропускания внешних граней иллюминаторов на воздухе и в воде ($N=2$): $T_{(\text{возд})\text{илл}} = 0,9158$; $T_{(\text{вода})\text{илл}} = 0,9916$.

Подставляя эти значения в формулу (1), имеем

$$V_{(\text{возд})} = 0,9158 FT_{\text{приб}} T_{\text{возд}} SK_{\text{ус}} \quad (7)$$

$$V_{(\text{вода})} = 0,9916 FT_{\text{приб}} T_{\text{вода}} SK_{\text{ус}} \quad (8)$$

Определим соотношение в показаниях прибора при нулевой величине оптической плотности среды в его базе на воздухе и в воде, то есть

$T_{\text{возд}} = T_{\text{вода}} = 1$. Разделив (8) на (7), получим

$$V_{(\text{вода})} = 1,0828 V_{(\text{возд})} \quad (9)$$

То есть, при измерениях в воде, оптическую плотность водной среды определяем, используя соотношение (3) с учетом (9)

$$\tau_{\text{вода}} = \ln \left(1,0828 \frac{V_{(\text{возд})0}}{V_{\text{вода}}} \right) \quad (10)$$

Если при измерениях в воде используется градуировка прозрачномера, сделанная на воздухе, то поправка в его показаниях, учитывающая просветление иллюминаторов, составит величину

$$\delta \varepsilon = 1/L \ln(1,0828) = 1/L \cdot 0,0796 \quad (11)$$

Метод эталонной воды. Используется вода с известным показателем ослабления света $\varepsilon_{(\text{вода})\text{этал}}$. Для такой воды

$$\begin{aligned} T_{(\text{вода})\text{этал}} &= \exp(-\tau_{(\text{вода})\text{этал}}) = \\ &= \exp(-\varepsilon_{(\text{вода})\text{этал}} L) \quad (12) \end{aligned}$$

Проведя измерения в эталонной воде, получим, согласно формуле (1), сигнал

$$V_{(\text{вода})\text{этал}} = FT_{\text{приб}} T_{\text{илл}} T_{\text{вода}} SK_{\text{ус}} \quad (13)$$

Используя величину $V_{(\text{вода})\text{этал}}$ вместо V_0 в формуле (3), получим соотношение

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{V_{(\text{вода})\text{этал}}}{V_{\text{вода}}} \right) &= \ln \left(\frac{T_{(\text{вода})\text{этал}}}{T_{\text{вода}}} \right) = \\ &= \tau_{\text{вода}} - \tau_{(\text{вода})\text{этал}} = \tau^*_{\text{вода}} \quad (14) \end{aligned}$$

То есть, измерив сигнал $V_{\text{вода}}$ в исследуемой воде и используя формулу (14), получим значение оптической плотности исследуемой воды с вычетом оптической плотности эталонной воды. Истинное значение оптической плотности исследуемой воды

$$\tau_{\text{вода}} = \tau^*_{\text{вода}} + \tau_{(\text{вода})\text{этал}} \quad (15)$$

В качестве эталонной используют абсолютно чистую воду, которую получают на специальных установках, удаляющих из воды взвешенные частицы и растворенные органические соединения. Спектральные показатели ослабления света для такой воды известны [2].

Можно использовать воду, для которой определен показатель ослабления с помощью какого-либо «образцового» лабораторного прозрачномера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Гидрометеиздат, 1983. – 278 с.
2. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – Vol. 36. – N. 32. – P. 8710 – 8723.