

## **Контроль прозрачности воды с использованием многоволнового сенсора оптического и ИК диапазонов волн**

Е.В. Кривенко<sup>1</sup>, В.И. Луценко<sup>1</sup>, М.Ф. Бабаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я. Усикова НАНУ, 61085, Харьков, ул. Проскуры, 12. тел.: +38 (093)-123-2881, Факс: 8 (057) 3152105, E-mail: secretar@ire.kharkov.ua*

<sup>2</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, г. Харьков, 61070, Харьков, ул. Чкалова 17 Тел.: +38 057 788-44-28, Факс: +38 057 788-48-67, E-mail: [AutonomEnergy@khai.edu](mailto:AutonomEnergy@khai.edu)*

*Представлено описание многоволнового оптического сенсора контроля прозрачности воды и результаты его испытаний по определению прозрачности загрязненной воды. Изучено влияние степени загрязненности, длины волны и цвета загрязненной воды на величину затухания. Предложен подход для уменьшения погрешностей, связанных с загрязнением датчика в процессе эксплуатации. Приведены соотношения для оценки концентрации загрязняющих воду примесей по результатам измерений.*

*A description of a multiwave optical sensor for monitoring water transparency and the results of its testing to determine the transparency of polluted water is given. The effect of the degree of contamination, wavelength and color of polluted water on the attenuation value was studied. An approach is proposed to reduce errors associated with sensor contamination during operation. The ratios for estimating the concentration of water polluting impurities from the measurement results are given.*

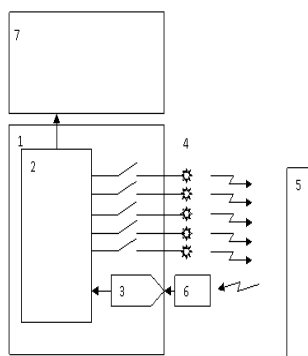
### **Введение**

Прозрачность – одна из важных характеристик, определяющих потребительские качества воды. Контроль прозрачности или мутности воды может основываться на регистрации в оптическом диапазоне коэффициентов прохождения и рассеяния света контролируемым образцом воды на нескольких длинах волн. Поскольку помутнение воды, обычно сопровождается и изменением ее цвета (от голубоватого к желтому), то в сенсорах целесообразно использовать несколько длин волн. Это позволяет оценивать частотную дисперсию затухания в мутной среде и дать косвенную оценку размеров загрязняющих воду частиц. Кроме того это может использоваться для повышения точности оценки степени загрязнения воды. Ранее такой подход был предложен в работах [1-4]. Настоящая работа является дальнейшим развитием этих идей.

### **1. Аппаратура и методика измерений**

На рис.1,2 показан макет измерителя прозрачности воды на 5 длинах волн оптического (690нм - красный, 530нм - зеленый, 450нм - синий) и инфракрасного (850нм и 940нм) диапазонов. В нем используется 5 излучателей, работающих в разных диапазонах длин волн и один широкополосный приемник. Измерение затухания на различных длинах волн осуществляется одноканальным приемником, последовательно во времени. Для повышения помехозащищенности от внешних источников освещения используется низкочастотная (с частотой 1кГц) модуляция источника излучения и узкополосный синхронный прием прошедшего через образец излучения. Укрупненная структурная схема сенсора представлена на рис.1, общий вид сенсора с блоком в который помещается кювета с исследуемой водой – рис.2. Спектральная чувствительность используемого в нем широкополосного фотоприемника (opt101) показана на рис.3. Там же нанесены длины волн используемые для просвечивания образца. Видно, что максимальная чувствительность приемника приходится на области красного и ближнего ИК диапазонов

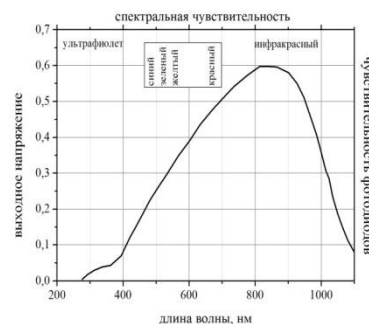
В устройстве последовательно производится генерация пачек импульсов 5 светодиодными источниками, имеющими различную длину волны излучаемого сигнала (источники от 1 до 5 слева направо). Приемником отраженного сигнала является фотоприемник (opt101), поле усиления сигнала фотоприемником сигнал подается на вход 12 разрядного АЦП, входящего в состав микроконтроллера. Микроконтроллер производит модуляцию излучаемого сигнала, цифровое синхронное детектирование сигнала принятого на фотоприемник, цифровую фильтрацию и отображение информации об уровне принимаемого сигнала попавшего на фотоприемник от каждого из источников (от 1 до 5 слева направо, сверху вниз) на экране дисплея. Использование модуляции позволяет исключить влияние естественной засветки, фильтрация позволяет повысить соотношения сигнал / помеха, а 32 кратная передискретизация позволяет повысить эффективную разрядность АЦП до 14 бит, что увеличивает динамический диапазон системы. Данное устройство позволяет исследовать коэффициенты прохождения и отражения сред на нескольких длинах волн в оптическом и инфракрасном диапазонах волн. В нем реализован динамический диапазон измерений ослаблений светового потока до 30дБ, что позволяет контролировать прозрачность (мутность) воды в широких пределах.



**Рис. 1. Структурная схема:**  
**1 – микроконтроллер,**  
**2 – арифметическое – логическое – устройство (АЛУ) микроконтроллера,**  
**3 – АЦП микроконтроллера,**  
**4 – излучатели (светодиоды),**  
**5 – исследуемый объект,**  
**6 – фотоприемник,**  
**7 – индикатор.**



**Рис. 2. Общий вид многоволнового измерителя прозрачности воды:**  
**1 – измерительная кювета;**  
**2- блок для кюветы с излучателями и приемником;**  
**3 – индикаторное устройство.**

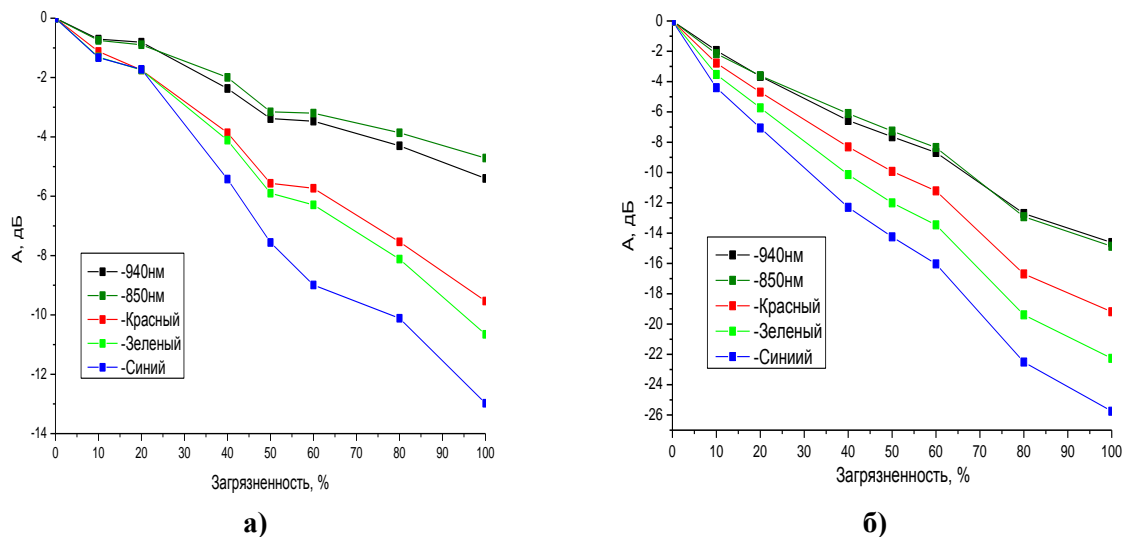


**Рис. 3. Спектральная чувствительность приемника многоволнового сенсора.**

Использование многоволнового режима позволяет повысить точность измерений и проводить дифференциацию размеров загрязняющих частиц. Результаты оценки оптической прозрачности воды приведены на рис.4.

Зависимость затухания оптического сигнала от степени загрязненности воды грунтом приведена на рис.4а, а на рис. 4б – от степени загрязнения микрофлорой зеленого цвета при цветении водоемов.

Видно, что для загрязненной грунтом воды характерны существенно большие затухания (примерно в 2 раза), чем для загрязненной микрофлорой зеленого цвета (от цветения воды в водоеме). С укорочением длины волны затухание возрастает. Увеличение степени загрязнения также приводит к возрастанию затухания, причем в логарифмическом масштабе эта зависимость, как видно из рис.4, может удовлетворительно аппроксимироваться линейной зависимостью.



**Рис.4. Затухание от степени загрязнения воды: а- зеленого цвета; б- коричневого цвета для разных длин волн оптического и ИК диапазонов:1-940нм, 2- 850нм, 3- красный, 4- зеленый, 5 – синий.**

Это означает, что в линейном масштабе эта зависимость экспоненциальная. Для воды коричневого цвета наименьшая разница затуханий получаемых на волнах 940нм и 850нм. В то время, как для воды зеленого цвета между затуханиями на волнах 690нм (красный цвет), 530нм (зеленый) и 450нм (синий).. В процессе эксплуатации оптические окна через которые световой поток вводится в водную среду от источников света и поступает к приемнику могут загрязняться, что будет приводить к смещению зависимостей затухания.

$$\gamma(\lambda) = \Delta(t) + a(\lambda) + c b(\lambda) \quad (1)$$

где  $c$ - концентрация загрязнений воды;

$a(\lambda)$  – начальное затухание для чистой воды определяется при калибровке системы;

$b(\lambda)$ - градиент изменения затухания от концентрации загрязняющих веществ;

$\Delta(t)$  дополнительное затухание из-за загрязнения оптических окон ввода и вывода света в процессе эксплуатации.

Полагаем, что в начальный момент времени  $t = t_0$  окна чистые и это затухание отсутствует, т.е.  $\Delta(t = t_0) = 0$ .

Начальные затухания в чистой воде могут быть получены в процессе калибровки измерительного комплекса в начале эксплуатации по чистой незагрязненной воде и затухание при загрязнении отсчитывается относительно уровня, получаемого при чистой воде.

$$\Delta\gamma(\lambda) = \gamma(\lambda) - a(\lambda) \quad (2)$$

Именно такие зависимости и представлены на рис.4. Взяв в качестве опорного значения дополнительное затухание, получаемое на волне 940нм и, вычтя его от затухания, получаемого при другой длине волны можно устранить погрешность, обусловленную загрязнением оптических окон.

$$\begin{aligned} \Delta^2\gamma(\lambda_i, \lambda_0) &= \Delta\gamma(\lambda_i) - \Delta\gamma(\lambda_0) = \\ &= (\gamma(\lambda_i) - a(\lambda_i)) - (\gamma(\lambda_0) - a(\lambda_0)) = \\ &= c(b(\lambda_i) - b(\lambda_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношение(3) позволяет оценить концентрацию загрязнения воды:

$$c_i = \frac{\Delta^2\gamma(\lambda_i, \lambda_0)}{(b(\lambda_i) - b(\lambda_0))} \quad (4)$$

где  $c_i$  – оценка концентрации загрязнений при использовании дифференциальных данных по затуханиям в жидкости на волне  $\lambda_i$  по сравнению с волной  $\lambda_0$ .

Из соотношения (4) видно, что для оценки концентрации загрязнений жидкости необходимо провести измерения затухания в столбе жидкости не менее чем на двух длинах волн. Если измерения проводятся на большем количестве длин волн ( в нашем случае на 5, то это позволяет получить 4 оценки концентрации. Избыточность можно использовать для повышения точности оценок.

Следует отметить, что в достаточно большом диапазоне загрязнений (от 0 до 80%) затухание от степени загрязнения удовлетворительно описывается линейной зависимостью. Это означает, что для них справедлив принцип аддитивности. Кроме того, затухание, выраженное в логарифмическом масштабе, в столбе загрязненной жидкости будет пропорционально толщине этого столба  $l_0$ , т.е.

$$\begin{aligned} a(\lambda) &= \alpha(\lambda)l_0 \\ b(\lambda) &= \beta(\lambda)l_0, \end{aligned} \quad (4)$$

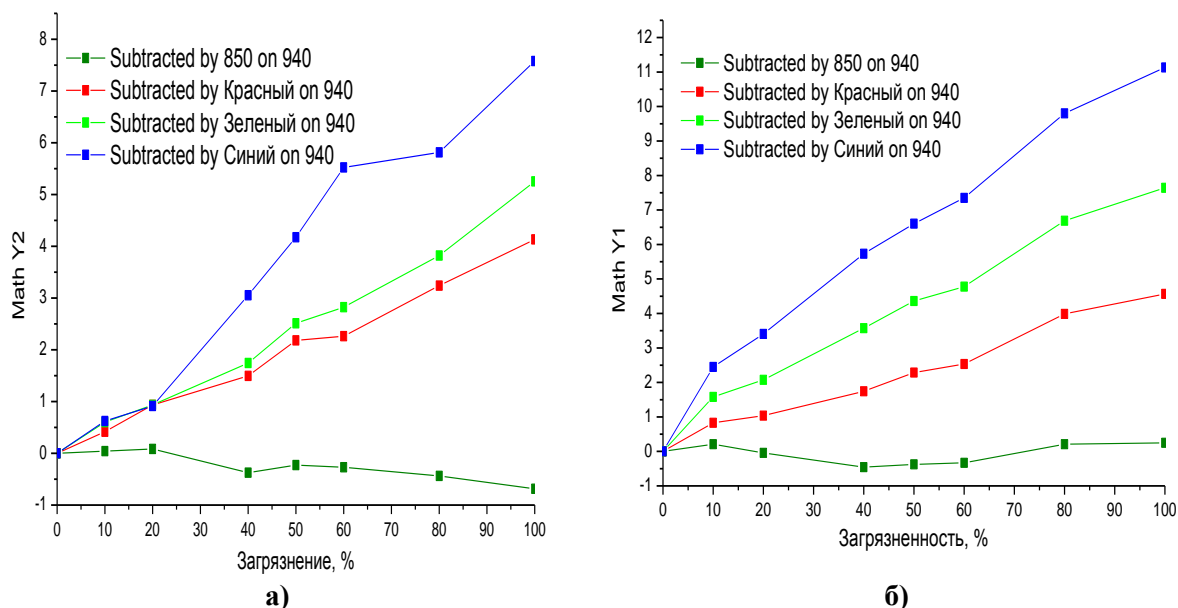
где  $\alpha(\lambda)$  - удельное на единицу длины затухание в чистой воды;

$\beta(\lambda)$  - удельный градиент изменения затухания от концентрации загрязнений.

Соотношение (4) позволяет оценить удельные параметры затуханий для загрязненной воды, а также может использоваться для пересчета коэффициентов затухания ( $a(\lambda), b(\lambda)$ ) для иных высот столба жидкости в датчике:

$$\frac{a(\lambda_1, l_1)}{a(\lambda_2, l_2)} = \frac{l_1}{l_2} \quad (5)$$

На рис. 5 приведены дифференциальные (относительно затухания на волне 940нм) затухания на других длинах волн.



**Рис.5. Дифференциальное (относительно длины волны 940нм) затухание от степени загрязнения воды: а- зеленого цвета; б- коричневого цвета для разных длин волн оптического и ИК диапазонов:1- 850нм, 2- красный, 3- зеленый, 4 – синий.**

Видно, что для воды как зеленого –рис.5а, так и коричневого –рис.5б цветов в ИК диапазоне разность затуханий на волнах 940нм и 850нм невелика. С укорочением длины волны величина затухания возрастает, причем больше для загрязненной воды коричневого цвета – рис.5б. Дифференциального затухания для практических расчетов могут аппроксимироваться линейной зависимостью:

$$\Delta^2 \gamma(\lambda_i, \lambda_0) = a + bc \quad (6)$$

Результаты аппроксимации для различных типов загрязнений, длин волн приведены в табл.1.

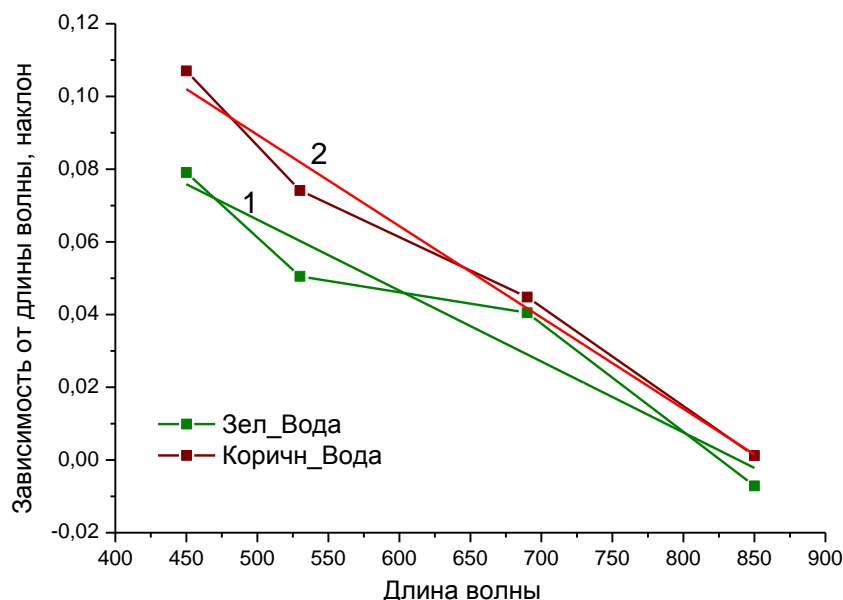
**Таблица 1. Коэффициенты аппроксимации дифференциальной (относительно волны 940нм) зависимости затухания в загрязненной воде**

Вода зеленого цвета			Вода коричневого цвета		
Длина волны. нм	<i>a</i>	<i>b</i>	Длина волны. нм	<i>a</i>	<i>b</i>
850	0,08678	-0,00712	850	-0,122	0,00121
690	0,01038	0,0405	690	0,10643	0,04482
530	-0,0623	0,05053	530	0,50026	0,07414
450	-0,09809	0,07907	450	0,99347	0,10702

Видно, что начальное значение затухания при различных видах загрязнений невелико и при практических расчетах можно полагать:

$$a \approx 0 \quad \text{излучения и} \quad (7)$$

На рис.6 приведены зависимости параметра *b* от длины волны излучения, цвета загрязнения, а также показаны их аппроксимации линейными зависимостями. Параметры которых приведены в табл.2.



**Рис.6. Зависимость скорости изменения дифференциального затухания от длины волны облучения для воды зеленого-1 и коричневого-2 цвета и их аппроксимации линейными зависимостями.**

**Таблица 2. Коэффициент аппроксимации зависимостей скорости убывания от длины волны облучения**

Тип воды	<i>a</i>	<i>b</i>
Зеленого цвета	0,16369	-1,95E-04
Коричневого цвета	0,21511	-2,51E-04

Видно, что для воды коричневого цвета крутизна дисперсионной характеристики существенно больше. Чем для воды зеленого цвета.

Проведенные исследования показали, что использование измерений на нескольких частотах оптического диапазона позволит решить задачу создания сенсоров контроля

воды, обладающих высокой чувствительностью к загрязнениям и относительно низкой стоимостью.

### **Заключение**

Комплексное использование многоволновых датчиков (оптического, ИК и микроволнового диапазонов) позволяет повысить чувствительность и достоверность оценки качества воды. В оптическом и ИК диапазонах, в качестве информативного параметра используется затухание сигнала при его распространении через изучаемую среду. Использование разности затуханий на различных волнах позволяет устранить погрешности, возникающие из-за загрязнения излучающей и приемной поверхностей датчика. Использование избыточной информации в виде нескольких разностей затухания на различных волнах позволяет повысить точность оценки степени загрязнения. При укорочении длины волны затухание в загрязненной воде возрастает. Для практических расчетов можно использовать линейную аппроксимацию скорости изменения затухания от длины волны.

### **Литература**

1. Использование smart grid технологий как основы модернизации системы водоснабжения для будущего устойчивого развития общества: Proceedings of the International Humboldt conference ["Science and technology as a basis of modernization for future sustainable development SSF—2014"], (Minsk, Belarus, 18—21 September), 2014— P. 57—61.
2. В.Ф. Кравченко Применение технологий smart grid для устойчивого развития и модернизации систем водоснабжения / В.Ф. Кравченко, Е.В. Кривенко, С.А. Левченко, В.И. Луценко, С.В. Плюта // Известия Национальной академии наук Беларуси Серия Физико-технических наук, №4, 2015. С.67-79.
3. В.Ф. Кравченко Smart grid технология - основа модернизации системы водоснабжения для будущего устойчивого развития общества / В.Ф. Кравченко, Е.В. Кривенко, С.А. Левченко, В.И. Луценко // Физические основы приборостроения 2015, Т.4, №1.-С. 12-29.
4. V.F. Kravchenko, E.V. Krivenko, V.I. Lutsenko, I.V. Popov Sensors of Control of Water Transparency in Optical and Microwave Ranges / Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.9, No4, 2018, Sum No20, P.354-359.