

К ИЗМЕРЕНИЯМ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА ЖИДКОСТЯМИ В СВЯЗИ С ДЕЙСТВУЮЩИМИ СТАНДАРТАМИ

Ю.А. Прохоренко, М.Н. Пеньков

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

Проанализированы некоторые особенности измерений, их соответствие действующим стандартам. Показано, что дальнейшее повышение качества научных гидрооптических исследований зависит от использования модульных оптоэлектронных элементов, вместо сборки фотометров из отдельных оптических деталей, приведены технические сведения по наиболее перспективным разработкам таких модулей.

Для быстрого и точного оценивания состояния природных вод, концентрации или вида примесей в различных жидкостях используются фотометрические измерения ослабления излучения. Области применения таких оценок только множатся, задачи усложняются, а актуальность растёт.

Исторически сложилось так, что оптические измерения выполняются в соответствии с двумя видами стандартов. Для научных исследований природных вод были созданы стандарты гидрооптических характеристик [1, 2]. В природных водоёмах по гидрооптическим свойствам можно быстро отслеживать многие процессы.

В промышленности свойства различных жидкостей контролируют по некоторым эффектам ослабления света – рассеянию под определёнными углами по отношению к прямому лучу осветителя или поглощению. Ведомственные стандарты [3] не используют стандартные характеристики по [1, 2], тем не менее, вполне удовлетворяют своему назначению – контролировать содержание определённых примесей с достаточной точностью.

По сути, и в том и в другом стандарте производятся оценки некоторых явлений ослабления света жидкостями и примесями в них. Однако различия в измеряемых характеристиках привело к тому, что используются различные измерители, а результаты представлялись в различных единицах.

Между обеими системами оценок свойств распространяющегося в жидкой среде света нет особого отличия или противоречия – регистрируется определённого вида ослабление распространяющегося в жидкой среде излучения.

Цель работы. Авторы попытались охарактеризовать некоторые особенности этих измерений, их соответствие действующим стандартам и техническое совершенство измерителей. Авторы подробнее останавливаются на менее знакомой в научной литературе промышленной специфике оптических измерений, соответствующих им стандартов и применения в них современных оптоэлектрических модулей.

Краткая характеристика выполнения измерений ослабления света в жидкостях в соответствии с действующими стандартами. Все существующие фотометрические стандарты включают определения качеств жидкостей методами визуальных наблюдений и приборных оценок путём измерений гидрооптических характеристик. Визуальные наблюдения – это определение предела видимости различных объектов через контролируемый столб воды, с использованием естественного освещения или искусственных источников. Его толщина в единицах длины (от миллиметров до метров) и определяет прозрачность (или мутность) жидкости. Отличия здесь между стандартами несут незначительные – только в условиях наблюдения и виде тест-объектов (просто белый диск, диск Секки, диски с отверстиями, графические символы и др.). Эти измерения просты, универсальны, быстро выполняются, не требуют высокой квалификации наблюдателей.

В приборных измерителях можно реализовывать измерения не просто уровня потерь света после прохода определённого пути в среде, а измерений особенностей характера распространения света в среде, определённые оптические характеристики.

С позиций геометрической оптики потери света при распространении в среде делятся на два вида – поглощённую и рассеянную под различными углами. Соответствующие удельные отношения называются показателями рассеяния и поглощения. Эти оценки также относительные. Показатели принято измерять в обратных метрах. Определения вкладов ослабления многочисленных примесей, требует выделения вкла-

да самой среды, «чистой воды». К сожалению, до сих пор не получено надёжных сведений о свойствах так называемой «чистой» воды. Используются приближённые их оценки, полученные путём нескольких последовательных процессов дистилляции, фильтрации, дегазации воды. После всего этого ещё остаётся вопрос взаимовлияния воды и примесей. Тем не менее, в практике измерений и в теоретических исследованиях часто используют простое арифметическое разделение на отдельные доли ослабления излучения водой и определёнными примесями. Природная вода обладает аномальными физическими характеристиками, высокой химической активностью, различным уровнем радиоактивности, содержит различные структурные модификации молекул и изотопы водорода и кислорода.

Стандарты на гидрооптические характеристики [1, 2], и им подобные, были созданы для исследований вод естественных водоёмов Земли и в основном согласуются, мало отличаются друг от друга. ГОСТ-19210-73 [1], предложен институтом Океанологии Академии наук СССР. Многие зарубежные океанографы используют как стандартные гидрооптические характеристики, перечисленные в работе [2].

Из 29 гидрооптических характеристик стандарта [1] наибольшее распространение в исследованиях природных водоёмов получили измерения показателя ослабления света. Рассмотрим, что и как предлагается измерять. Согласно [1], показателем ослабления излучения в водной среде является:

«Величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, распространяясь в оптически однородной водной среде в виде узкого практически параллельного пучка, ослабляется в результате суммарного действия поглощения и рассеяния в e раз (или в 10 раз)

$$\varepsilon = -\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi_s}{dl}$$

где $d\Phi_s$ – поток излучения поглощённый и рассеянный в элементарном слое dl »

В таком же виде изложены дефиниции остальных гидрооптических характеристик ГОСТ-а и соответствующей ему таблицы 1 в [2]. Там только применяются другие названия. Например, в сущности, показатель ослабления назван там общим коэффициентом ослабления – total attenuation coefficient.

Выше в тексте определения, подчёркнуты условия, которые, для их соблюдения в практике измерений, требуют более подробных разъяснений или уточнений их содержания из-за идеализации, неконкретности понятия. Например, монохроматическое излучение, в соответствии с его определением в [4] является идеализацией. Ближе всего к такому излучению приближено излучение некоторых лазеров на отдельных частотах. Только на отдельных частотах, с их помощью, а не в непрерывной видимой области спектра и было бы ограничено измерение показателей.

Формулировки определений показателей поглощения и рассеяния излучения в стандарте отличаются от приведенного для показателя ослабления, во-первых, тем, что там должно учитываться ослабление от потоков поглощённого и рассеянного излучения, соответственно. Во-вторых, указано – пучок для измерения показателя ослабления и рассеяния излучения должен быть узким, а для показателей поглощения этого не указано (неясно насколько узким, почему не для всех показателей).

Заметим, что показатель ослабления не однозначно определяет свойства жидкости, так как одно и то же ослабление может состоять из разных долей ослабления потоков за счёт рассеяния и поглощения. Это соотношение характеризует безразмерный параметр – вероятность выживания фотона.

Поглощение и рассеяние излучения происходят при распространении в процессе того же ослабления, как это и указывается в тексте стандарта. Поглощение излучения, вероятно, требуется измерять только в прямом направлении, но в том же направлении следует и значительная часть рассеянного излучения. Здесь проблема построения фотометра в том, чтобы выделить из результата долю постороннего рассеянного излучения, который занижает величину показателя поглощения. Рассеяние в оптически однородной среде, как требуется в стандарте [1], должно отсутствовать, так как порождается именно неоднородностями.

Из текста стандарта не следует, каким образом должны быть выделены доли ослабленных потоков рассеянного, поглощённого излучения или всего ослабления, чтобы определить соответствующие показатели.

Большая часть вод Мирового океана, несёт небольшую концентрацию взвеси с диапазоном изменчивости показателя ослабления вод в пределах 2-х порядков, от сотых долей обратного метра – до нескольких десятых. Для эффективного измерения в реальных фотометрах свойств таких вод приходится использовать в фотометрах измерительные базы до нескольких метров, а не оценивать их в элементарном «тонком» слое (объёме). На такой измерительной базе принимается, но не может быть однородным, контролируемый объём воды. Из-за этого измеряемые величины показателей ослабления получаются осреднёнными. Но размеры и форма измерительного объёма фотометра-измерителя, от которых в таком случае зависит результат осреднения, не оговорены в стандартах [1, 2] и является источником несоответствия оценок, выполняемых различными измерителями. Чётких правил выполнения практических измерений, согласующихся с этими стандартами, не имеется до сих пор. Это допускает разночтения при конструировании измерителей. Поэтому, на практике измерения гидрооптических показателей ослабления излучения морской водой осуществляются с различной степенью приближения, с частичным соблюдением указанных в стандарте условий. Это ведёт к несогласованности оценок, выполняемых разными измерителями.

Для прикладных задач, в промышленности и в хозяйственных нуждах получило распространение измерение мутности. Она оценивается измерителями по уровню рассеяния света искусственного источника под определённым одним или различными углами от некоторого объёма жидкости. Точного определения мутности не выработано. Определения её в ведомственных стандартах, подобных [3], различны, а в [1, 2] её нет. Слово «мутность» присутствует в научных трудах только для сравнения качества различных вод. В отдельных хозяйственных структурах применяются частные и стандарты измерения, и измерительные единицы. При измерениях мутности в ведомственных стандартах предусматривалось сравнение их со стандартными суспензиями из различных веществ. Кингсбери и Кларк в 1926 году создали формазин. Благодаря своим качествам, он вытеснил, существовавшие до него стандартные, су-

спензии. Все прочие искусственные стандарты, альтернативные или вторичные, также контролируются по формазину. Мутность измеряется в единицах мутности формазина (ЕМФ или FTU – formazine turbidity units). Программы обработки данных измерений выдают графический результат непосредственно в единицах измерения контролируемого вещества.

Определения мутности, положенные в основу соответствующих стандартов измерения, не точны, допускают некоторое разнообразие толкования. В украинском стандарте – ДСТУ ISO 7027:2003, предложенным институтом гидротехники и мелиорации Украинской академии аграрных наук и вступившем в силу с 5 июля 2003 года, мутностью называется «уменьшение прозрачности воды, вызванное присутствием нерастворимого вещества» [3]. Стандарт является непосредственным переводом, аналогом английского стандарта ISO 7027:1999 (Water quality – Determination of turbidity). Подобны им немецкая и европейская верени (DIN 38404 и EN 27027), а также стандарт Американской Ассоциации здравоохранения (АРНА). Последний стандарт определяет мутность по-своему, как "численную характеристику оптического свойства, которое вызывает рассеяние и поглощение света вместо его прохождения через образец по прямой".

Согласно государственным и ведомственным стандартам, мутность можно рассматривать (и измерять визуально) как характеристику относительной прозрачности воды. Можно, как меру рассеяния в определённом диапазоне углов, можно, как относительное распределение долей рассеяния на различных диапазонах углов или даже поглощение света.

В измерителях мутности, для расширения диапазона измерений и линейаризации зависимости вход-выход используют сигналы детекторов от рассеяния света в передней и задней полусфере, даже прошедший в прямом направлении свет. Многие оцениваемые по мутности жидкости имеют за пределами большие концентрации примесей. Поэтому приборы часто имеют кюветную или проточную конструкцию, с измерительными базами от нескольких миллиметров, до десятков сантиметров. Взвесь рассеивает в каждом направлении различную долю от общего рассеяния света, в за-

висимости от размеров и формы частиц, длины волны света. Из формы индикатрисы рассеяния самой воды следует, что под углом в 90° к оси прямого луча, в контролируемый сигнал ею вносится рассеяние, близкое к минимальному уровню. Малая измерительная база, ещё более снижает во входном сигнале долю ослабления от самой воды, повышая чувствительность к оценкам рассеяния взвеси. Это особенно важно за пределами видимой области спектра, где ослабление света водой резко увеличивается. На незначительной длине измерительной базы становятся возможными измерения за пределами видимой области при источнике света небольшой мощности. Прибор становится более информативным и экономичным.

Таким образом, оба направления использования оптических оценок по разным причинам не полностью соответствуют

своим назначениям. Это требует учёта обозначенных выше особенностей при анализе результатов измерений.

Для устранения несоответствий результатов измерений гидрооптических характеристик и действующих стандартов, требуется их уточнение и согласование с практическими возможностями.

Некоторые технические основания совершенствования измерений. В обеих областях по существу используются фотометры, измеряющие ослабление света. Они родственны по общим проблемам конструирования, построениям измерительных схем и основным принципам методик обработки сигналов. При этом в настоящее время конструкции фотометров промышленного применения используют более совершенные модульные элементы. Примеры модульных разработок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оптоэлектронные модули фирмы HAMAMATSU

Серия	Тип модуля	Рабочая полоса спектра, λ (нм)	Максимальное спектральное разрешение, λ (нм)	Главная особенность
TM	C10082CAN	200 — 800	1	ВР
	C10082CA		6	ВЧ
	C10082MD			ШДД
	C10083CAN	320 — 1000	1 ($\lambda=320 — 900$ нм)	ВР
	C10083CA		8 ($\lambda=320 — 900$ нм)	ВЧ
	C10083MD		8	ШДД
TG	C9404CAN	200 — 400	1	ВР
	C9404CA		3	ВЧ
	C9404MC			ШДД
	C9405CA	500 — 1100	5 ($\lambda=550 — 900$ нм)	ВЧ
	C9405MC		5 ($\lambda=550 — 900$ нм)	ШДД
	C9406GC	900 — 1700	7	Б Охл
	C9913GC			ШУШ (Охл)
C9914GB	1100 — 2200	8		
RC (OEM)	C9407MA	340 — 780	9	К, НЦ
	C9408MA	640 — 1050	8	
	C9409MA	340 — 780	9	
	C9410MA	640 — 1050	8	

Сокращения в таблице: ВР – высокое разрешение, ВЧ – высокая чувствительность, ШДД – широкий динамический диапазон, Б Охл – без охлаждения, ШУШ (Охл) – низкий уровень шума (с охлаждением), К – компактный, НЦ – низкая цена.

В приборах промышленного применения широко представлены широкополосные источники света и чувствительные приёмники излучения, используются высококачественные стандартные оптоэлектронные модули. Оптическим модулям, уже в силу полной герметичности, свойственны высокая стабильность характеристик, минимум постороннего рассеянного света от оптических поверхностей, что резко повышает качество преобразования сигналов. В модулях вмонтированы компактные преобразователи входного сигнала, в частности монохроматоры, с разрешением до десятых нанометра. Их электронные компоненты адаптированы для работы со стандартными компьютерными оболочками, дают количественные оценки и графически представляют окончательные результаты на мониторе обычного компьютера уже в процессе измерений. Имеются модули для самостоятельного использования или внедрения в более сложные системы мониторинга. Оптические блоки фотометров научного назначения, при постоянном недостатке финансовой поддержки, часто изготавливаются кустарно, из отдельных деталей. Это не позволяет реализовать в них широкого диапазона спектральных измерений, высокого спектрального разрешения, достаточной чувствительности и других важнейших качеств. Тем самым снижается и качество исследований, и усложняется эксплуатационное обслуживание приборов.

Разработка оптоэлектронных модулей ведётся во многих странах – Германии, Дании, Австрии, Японии, сайты [5 – 7]. Например, фирма Hamamatsu разработала гибридную компактную конструкцию, которая включает в себя: спектрометрическую головку – призмный монохроматор с линейкой фотоприёмников, управляющую схему с 16-ти разрядным АЦП и интерфейс. В устройстве исключены механические вращающиеся детали. Ввод излучения по световоду, ввод информации в компьютер и питание электроники – через порт USB. Модуль можно использовать в тестировании источников видимого света, исследовании цвета излучения или в химических измерениях.

Очень привлекательна разработка той же фирмы модулей RS-ряда. В устройствах выполнено объединение всех оптических компонентов с функциями коллимирования и фокусировки в едином кварцевом теле. На нём же помещена отражающая дифракционная решётка и линейный датчик изображения. Применение таких модулей в фотометрах резко повышает качество исследования, с упрощением эксплуатационных требований.

Заключение. В работе показано, что в некоторых требованиях стандартов применяются идеализированные понятия без уточнения степени их соблюдения на практике. Такое изложение основных определений допускает их неоднозначное толкование, что отражается в разнообразии применяемых измерительных схем фотометров и ведёт к несогласованности результатов измерений.

Вне зависимости от области применения, в фотометрах целесообразно применение модульных оптоэлектронных элементов.

Приведены краткие сведения по наиболее интересным для применения в спектрофотометрах оптоэлектронным модулям.

Литература

1. Госстандарт СССР, Гидрооптические характеристики Термины и определения. ГОСТ-19210-73. Издание официальное. Госком стандартов СМ СССР, Москва.
2. U.S. Joint Global Ocean Flux Study, Appendix B-1, Terminology and units in optical oceanography, A. Morel and R.C. Smith, Table B. 2, 1993.
3. Якість води. Визначання каламутності (ISO 7027:1999, IDT), ДСТУ ISO 7027:2003. Видання офіційне, Київ, Держспоживстандарт України, 2004.
4. Большая советская энциклопедия. Главный редактор А.М. Прохоров. 3-е издание, Москва, Изд-во «Советская энциклопедия», 1974.
5. jp.hamamatsu.com
6. wetlabs.com
7. s::can.at