

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД

M.H. Пеньков

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

В статье приводится краткий обзор оптических методов определения плотности жидкостей.

Основным методом определения плотности ρ в океане в настоящее время является косвенный метод. Измеряется соленость S , температура T и гидростатическое давление P . При этом соленость также определяется косвенно через электропроводность C , которая зависит от T , S и P , а также от химического состава. Все уравнения связи описывают сложную нелинейную зависимость, последние уточнения которой сделаны в TEOS-10 [1].

Ошибки в определении ρ могут зависеть от изотопного состава морской воды и солей (до $\pm (3 - 7) \cdot 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) и наличие растворенных газов (до $\pm 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) [2].

Дополнительная ошибка вносится также из-за разной инерционности датчиков температуры и электропроводности в слоях с большими градиентами этих величин по глубине.

С прошлого века проводятся работы по определению плотности жидкостей сред через показатель преломления света. При известном коэффициенте преломления света n по формуле Лоренца может быть рассчитана плотность

$$A\rho = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}, \quad (1)$$

где A – (в некоторых источниках упоминается как удельная рефракция) для большинства сред практически не зависит от температуры и плотности. Для большинства жидкостей, температурная зависимость A лежит в пределах от $-0,0004$ до $-0,0006$ 1/град, ниже только для воды и разбавленных водных рас-

творов ($-0,0001$), глицерина ($-0,0002$), гликоля ($-0,00026$) [2].

Линейная экстраполяция показателя преломления допустима при небольшой разности температур ($10 - 20^\circ\text{C}$). Точное определение показателя преломления в широких температурных интервалах производится по эмпирическим формулам вида: $n_t = n + at + bt^2 + \dots$

Давление влияет на показатель преломления жидкостей на порядок меньше, чем температура. При изменении давления на 1 атм. изменение n составляет для воды $1,48 \cdot 10^{-5}$, спирта $3,95 \cdot 10^{-5}$, для бензонала $4,8 \cdot 10^{-5}$, т.е. изменение температуры на 1°C влияет на показатель преломления жидкости примерно также, как изменение давления на 10 атмосфер.

После преобразования с разложением в ряд в районе точки $n = n_0$ и принимая во внимание первые два члена, получаем

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = a\Delta n,$$

где $a = 6n_0 / (n_0^2 - 1)(n_0^2 + 2)$. Подставляя стандартные значения $\rho_0 = 1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ и $n_0 = 1,338$ (показатель преломления на 486 нм [3]), имеем $a\rho_0 = 2,68$, что позволяет определять $\Delta\rho$ с погрешностью $\sim 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, если абсолютное изменение ρ не превышает $10^{-2} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ [4].

Сложность заключается в том, что параметр A из (1) различен для различного состава и для многокомпонентной среды, которой является, например, морская вода, правая часть формулы Лоренца-Лоренца будет представлять сумму

$$\sum_{i=1}^N A_i \rho_i \text{ по компонентам состава.}$$

Поэтому для точного определения плотности необходимо будет применение спектрометра, для параллельного определения химического состава измеряемой среды, если он неизвестен.

Так как оптические измерения со-пряжены с визуализацией, то применяются три метода получения информации. Самый простейший из них – метод тени. Такой метод относительно прост в реализации, связан с эффектом колебания тени, производимым колебанием индекса преломления, применяется при значи-

тельных градиентах плотности, т.к. ма-
лочувствителен, поэтому непригоден для
количественных измерений плотности в
жидких средах и находит применение в
индикаторных измерениях.

Другим, часто используемым, мето-
дом является интерферометрический.
Имея высокую чувствительность, он до-
рог в исполнении.

Интерферометрический метод пред-
полагает расщепление луча на два с про-
хождением одного из них через изме-
ряемую среду, после чего сведенные лу-
чи из-за фазовой разницы между опор-
ным лучом и лучом, проходящим через
среду, образуются интерференционные
полосы. Величина сдвига полосы Δn оп-
ределяет величину Δp . Классический
метод предполагает измерение фазы
опорного луча и луча, проходящего че-
рез среду.

Промежуточный метод – метод по-
лос получен путем модификации метода
тени и измеряет смещения интерферен-
ционной полосы, возникающей при слож-
ении двух лучей – опорного и проходя-
щего через среду. При фокусировке
полосы можно достичь высокого разре-
шения, которое ограничивается только
длиной волны источника света

$$\Delta z = \Delta n l = \frac{1}{2} \lambda a, \quad (2)$$

где Δz – разность хода светового луча;
 l – длина базы прибора; Δn – изменение
коэффициента преломления; λ – длина
световой волны; a – относительный
сдвиг интерференционной полосы (в дол-
лях ее ширины) [4].

На рис. 1 приведены параметры, ко-
торые необходимо измерять в различных
методах.

При первом методе производится
измерение колебания тени по уровню
колебания засветки или вторая произ-
водная от плотности Δu . При методе по-
лос измеряются колебания угла смеще-
ния луча θ , т.е. первая производная по
плотности (градиент) и при третьем ин-
терферометрическом методе произво-
дится измерение фазового сдвига на оп-
ределенной частоте – что соответствует
изменению величины плотности Δp .

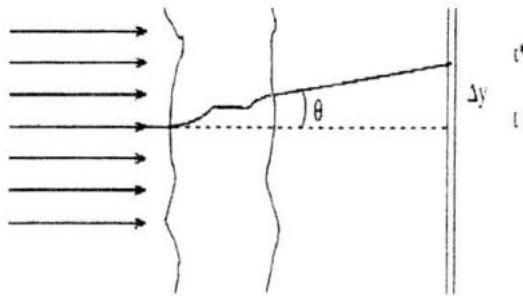


Рис. 1. Параметры, измеряемые
при различных методах

В работе [5] описывается установка
для сравнения измерения градиента
плотности акустическим методом и ме-
тодом полос в импедансном лотке.

Приведенные в работе [5] графики
показывают примерное совпадение из-
меренных градиентов плотности в испы-
тательном лотке, полученных полосо-
вым оптическим и акустическим мето-
дом.

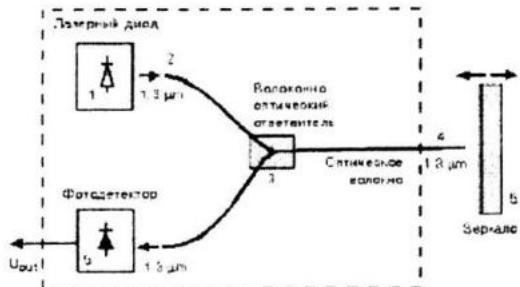
Наибольшие трудности возникают
при выборе способа регистрации.

До настоящего времени, для точного
измерения находит применение ФЭУ как
наиболее чувствительного элемента при
использовании теневого и полосового
методов регистрации.

Существует множество различных
интерферометров, применяемых в раз-
личных областях.

В работе [2] упоминается о проведе-
нии измерения плотности в океане опти-
ко-интерференционным методом, однако
несовершенство в то время АЦП не по-
зволяло добиться точности измерения
сдвига интерференционной полосы бо-
льше чем $\pm 0,025$ ширины, что соответст-
вовала точности отсчета $\Delta p = \pm 4,3 \cdot 10^{-6}$
 $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Появление оптоволоконной техники
позволило создать компактные измери-
тели для промышленного применения. В
лабораторных исследованиях находят
применения световодные датчики с от-
ражением от зеркала. В этом случае
применяется раздвоенный световод с
излучателем на одном конце и фотопри-
емником на другом (рис. 2).



1 – лазерный диод; 2 – световод; 3 – оптический разветвитель; 4 – выход световода на границе среды; 5 – зеркало, диаметр световода – 1,3 $\mu\text{м}$

Рис. 2. Принцип действия торцевого волоконно-оптического интерферометра

В других датчиках, вместо зеркала используется срез на конце раздвоенного оптического волокна. При этом измеряется отношение опорного сигнала и отраженного от среза волокна.

Отношение падающего U_p сигнала к отраженному U_o вычисляется по формуле

$$\frac{U_p}{U_o} = k \left(\frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2, \quad (3)$$

где n – показатель преломления среды и n_0 – показатель преломления оптоволокна. Коэффициент k – является чисто технологическим и зависит от качества сборки.

Недостатком последнего служит необходимость калибровки датчика перед каждой постановкой из-за загрязнения торца световода, вследствие чего происходит изменение коэффициента отражения от границы среда – оптоволокно. Кроме того возникает неоднозначность при определении n , которая может быть устранена, если заранее известно, что, например, $n_0 > n$, что приемлемо для измерения n – морской воды (показатель преломления не превышает 1,35) и кварцевого волокна с показателем $n_0 = 1,445$ [3].

Другим вариантом использования световодного датчика может быть измеритель со световодами, один из которых находится в изоляции и используется в качестве эталонного источника луча [6].

В этом случае происходит многократное отражение луча от стенок измерительного датчика (рис. 3).

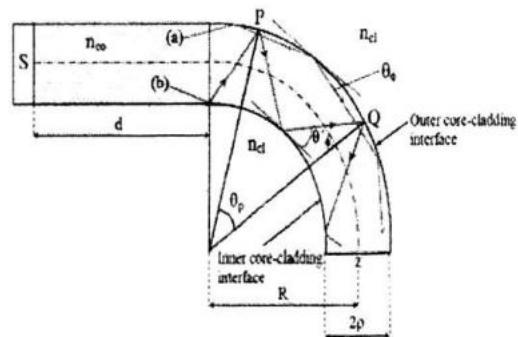


Рис. 3. Пути светового луча в датчике с радиусом R

Блок-схема подобного измерителя приведена на рис. 4.

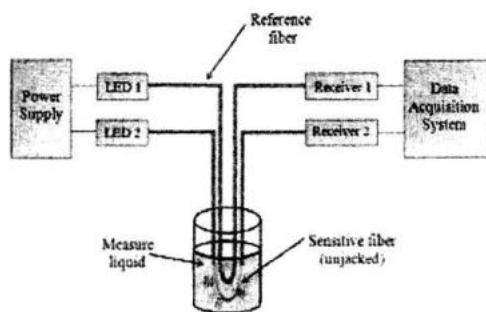


Рис. 4. Схема световодного измерителя

В этой же работе приведена зависимость чувствительности датчика от радиуса изгиба световода. Применялись несколько образцов световодов и наибольшая чувствительность попадала в диапазон с радиусом 5 – 7 мм (рис. 5).

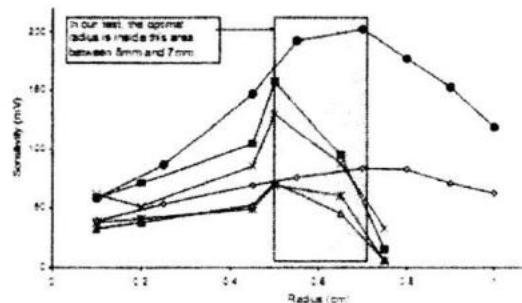


Рис. 5. Зависимость чувствительности датчика от радиуса изгиба. Выделенная зона – зона наибольшей чувствительности

На рис. 6 приведена фотография промышленного оптоволоконного измерителя плотности, применяемого в производстве вина.



Рис. 6. Вид оптоволоконного датчика без защитного кожуха

По-прежнему стоит вопрос о датчике-фотоприемнике. В точных измерениях вместо до сих пор используемых ФЭУ, ввиду его высокой чувствительности и большого динамического диапазона, можно использовать линейки фотоприемников, применяемых в сканерах. Например, линейка S11108 имеет разрешение 2048 пикселей на дюйм [7].

Матричный фотоприемник фирмы Kodak имеют разрешение до 21 Мпикселя. Он работает паре с сигнальным процессором, например, AD9814, фирмы Analog Device.

Заключение. Использование оптических методов для определения плотности жидких сред в настоящее время находит, хоть и ограниченное применение, в промышленности.

Есть только одно упоминание об использовании оптического датчика для определения плотности морской воды в экспедиционных условиях [2]. Среди

множества разработанных схем интерферометров, для морских условий возможно применение схем интерферометров Жамена или Фабри-Перро на основе современных приемников светового потока. Необходимы дополнительные исследования возможности применения их в экспедиционных условиях.

Что касается применения метода полос, то его применяют при измерении скорости потока жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *TEOS-10, Manuals and Guides No.56, UNESCO (English).* – 196 pp.
2. Беляев В.С., Власов Р.В., Озмидов Р.В. Исследование тонкой вертикальной структуры плотности воды в океане оптико-интерференционным методом // Изв. АН СССР. – ФАО, 1979. – Т.15. – № 8. – С. 855 – 863.
3. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. Москва. 1991. – Энергоатомиздат. – 1232 с.
4. Авдеев М.А, Баграташвили, Джси Ке и др. Оптоволоконная денситометрия сверхкритических сред. – Сборник трудов ИПЛИТ РАН. – С. 104 – 110.
5. Priya Narayanan. Quantative measurement of the density gradient field in a normal impedance tube using an optical deflectometr // University of Florida, 2003. – 82 pp.
6. Ana M. Cao-Paz, Jorge Marcos-Acevedo, Alfredo del Rio-Vazquez and str. A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries., // Sensors. – 2010, 10. – P. 2587 – 2608.
7. www.hamamatsu.com